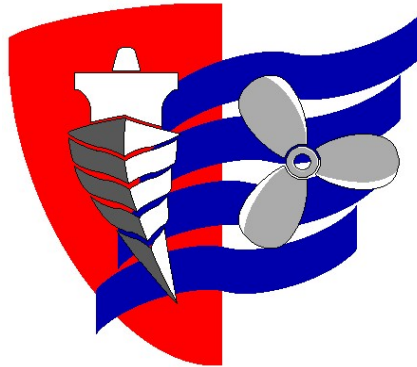


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**La transición en el empleo del acero a los
materiales compuestos en construcción naval**

**The transition in the use of steel to
composite materials in shipbuilding**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARINA

Autor: Javier Larreta Aldave

Directora: María Victoria Biezma Moraleda

12 - 2023

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**La transición en el empleo del acero a los
materiales compuestos en construcción naval**

**The transition in the use of steel to
composite materials in shipbuilding**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARINA

12 - 2023

Índice	
Índice	III
Resumen	VIII
Palabras clave	VIII
Abstract	IX
Key words	IX
1. Introducción	12
1.1. Contexto de la construcción naval	12
1.2. Elección de materiales en la industria naval	14
1.3. Justificación del estudio y motivación del autor	15
1.4. Objetivos del trabajo	16
2. Estado del arte	17
2.1. Uso histórico del acero en la construcción naval	17
2.1.1. Historia del acero y barcos emblemáticos	17
2.1.1.1. <i>La Era de la Experimentación (Siglos XVIII y XIX)</i>	17
2.1.1.2. <i>La Era de los Acorazados (XIX - Principios del XX)</i>	19
2.1.1.3. <i>La Revolución del Acero en la Construcción Comercial (XIX - Principios del XX)</i>	21
2.1.1.4. <i>El Siglo XX y más allá</i>	21
2.1.2. Propiedades del acero en la construcción naval	27
2.1.2.1. <i>Comparativa entre el acero y su antecesor (madera)</i>	27
2.1.2.2. <i>Avances en la tecnología del acero en la construcción naval</i>	31
2.1.2.3. <i>Reducción del contenido de carbono</i>	33
2.1.2.4. <i>Introducción de elementos de aleación</i>	34
2.1.2.5. <i>Tratamientos térmicos y termoquímicos</i>	37
2.1.2.6. <i>Estructuras cristalinas del acero y sus propiedades</i>	39
2.1.2.7. <i>Clasificación de los aceros</i>	44
2.1.2.8. <i>Comparativa de equivalencias de aceros entre distintas sociedades de clasificación</i>	48
2.1.2.9. <i>Análisis químico de los aceros</i>	49
2.1.3. Ejemplos de innovaciones tecnológicas en la industria del acero aplicadas a la construcción naval.	49
2.1.3.1. <i>Corte y conformado</i>	50
2.1.3.2. <i>Automatización y robotización</i>	50
	III

2.1.3.3.	<i>Monitorización y tecnologías inteligentes</i>	51
2.1.3.4.	<i>Manufactura aditiva</i>	54
2.2.	Introducción a los materiales compuestos en la construcción naval	57
2.2.1.	Componentes aspectos importantes y fabricación de materiales compuestos.	58
2.2.1.1.	<i>Componentes</i>	58
2.2.1.2.	<i>Aspectos importantes</i>	62
2.2.1.3.	<i>Fabricación</i>	64
2.2.2.	Ventajas clave de los materiales compuestos en la construcción naval y su aplicabilidad inicial.	69
2.3.	Estado actual de la construcción naval con materiales compuestos	71
2.3.1.	Embarcaciones de Recreo y Deportivas	72
2.3.2.	Yates de Lujo y Superyates	74
2.3.3.	Embarcaciones Comerciales	77
2.3.4.	Aplicaciones Offshore	81
2.4.	Uniones	82
2.4.1.	Uniones mecánicas (Remachado)	82
2.4.2.	Uniones de acero (Soldadura)	84
2.4.3.	Unión de materiales compuestos (Adhesivos)	97
2.4.4.	Unión entre materiales compuestos y acero	101
2.5.	Tendencias Futuras y planteamientos realistas en el ámbito de la construcción naval	104
2.5.1.	Tendencias futuras en la construcción naval: expansión del uso de materiales compuestos en barcos más grandes.	104
2.5.1.1.	<i>Tendencias futuras</i>	105
2.5.1.2.	<i>Expansión del uso de materiales compuestos en barcos más grandes</i>	110
2.5.2.	Enfoques híbridos que aprovechan las fortalezas tanto del acero como de los materiales compuestos.	112
3.	Conclusiones	115
4.	Referencias	117

Listado de Figuras

Figura 1: Papel de la Construcción Naval a lo largo de la historia (Autor)	13
Figura 2: Objetivos de desarrollo sostenible (un.org)	14
Figura 3: Representación del SS Great Eastern (History Today)	17
Figura 4: Representación del RMS Titanic (National Geographic)	17
Figura 5: City of Adelaide (thecaptainandthecook.com)	18
Figura 6: Cutty Sark (Royal Museums Greenwich)	18
Figura 7: HMS Warrior (National Historic Ships)	19
Figura 8: La Gloire (U.S. Naval Institute)	19
Figura 9: USS Monitor (National Museum of American History)	20
Figura 10: CSS Virginia (National Museum of American History)	20
Figura 11: SS Great eastern (Britannica)	21
Figura 12: Yamato (FDRA-Fuerza Naval)	24
Figura 13: HMS Queen Elizabeth (GOV-UK)	24
Figura 14: Barcos emblemáticos y tendencias en la CN entre 1990 y 2023 (Autor). 25	
Figura 15: Diagrama representativo de la historia de la construcción naval (Autor) 26	
Figura 16: Diferentes salinidades en los mares y océanos del globo (marinebio.net) 27	
Figura 17: Composición química de un kilo de agua de mar con una salinidad de 35‰ (perodni.com)	28
Figura 18. Factores que pueden producir el deterioro de la madera (Blanco del Río, 2015)	29
Figura 19: Corrosión por proceso electroquímico (Autor)	32
Figura 20: Representación de la protección de un acero inoxidable (Autor)	32
Figura 21: Soldabilidad de los aceros en función del CE (thermofisher.com)	36
Figura 22: Esquema representativo de los tratamientos térmicos (Autor)	38
Figura 23: Material cementado (Autor)	39
Figura 24: Microestructura de la ferrita (soldadurayestructuras.com)	39
Figura 25: Microestructura de la perlita (Derematerialia)	40
Figura 26: Microestructura de la martensita (derematerialia.com)	41
Figura 27: Microestructura de la austenita (surcosistemas.com)	41
Figura 28: Microestructura de la cementita (researchGate)	42
Figura 29: Microestructura de la bainita (mecanica242)	42
Figura 30: Diagrama parcial hierro-carbono (University of Cambridge)	44
Figura 31: Delimitación de las clases de acero (UNE-EN 10020:2001)	46
Figura 32: Representación de un gemelo digital (DNV-GL)	52
Figura 33: Avances e impacto de los materiales compuestos (Autor)	54
Figura 34: Material compuesto con estructura tipo sándwich (researchgate.net)	58
Figura 35: Polímero termoestable, resina de poliéster (navalcomposites.com)	59
Figura 36: De izda. a dcha. fibras de vidrio, carbono y kevlar (navalcomposites.com)	60
Figura 37: Distintas orientaciones de las fibras (Autor)	61
Figura 38: Representación esquemática de la interfase (Autor)	62
Figura 39: Laminación manual (navalcomposites.com)	65
Figura 40: Ejemplo de RTM (navalcomposites.com)	65
Figura 41: Esquema del E.F. (modelodemetalesypolimeros.wordpress.com)	66
Figura 42: Infusión al vacío de un casco de velero (navalcomposites)	67

Figura 43: Diagrama de Ashby con diversos materiales (Ashby,2008)	70
Figura 44: Buque Canopée (Marinetraffic.com)	72
Figura 45: AC75 "American Magic" (Airbus.com)	73
Figura 46: Extracto de la página web de Feadship (Feadship.nl)	76
Figura 47: Extracto de la página web de Oceanco (oceancoyacht.com).....	76
Figura 48: Quilla fabricada 100% en carbono (candela.com).....	78
Figura 49: Imágenes del Aero 1 Highspeed (Braa.no).....	80
Figura 50: Un esquema que muestra las cargas, la disposición de capas y el corte transversal de las capas de un riser de composite (Ocean Engineering).....	82
Figura 51: Combinación de remachado y soldadura para la unión de planchas metálicas (Marine Engineering & Shipping Age)	83
Figura 52: Esquema de una soldadura (Autor)	85
Figura 53: Soldadura por forja (electrónica básica).....	86
Figura 54: Soldador utilizando oxígeno (Fractory)	87
Figura 55: Soldadura por resistencia (bearcat).....	88
Figura 56: Electrodo de carbono (directindustry).....	89
Figura 57: Esquema de funcionamiento de soldadura por electrodo (ingemecánica).....	90
Figura 58: Representación del funcionamiento de la soldadura MIG (lorch.eu).....	92
Figura 59: Esquema de soldadura TIG (Technox Machine)	94
Figura 60: Soldadura SAW (thefabricator.com).....	95
Figura 61: Adhesivo estructural de cianoacrilato y acrílico marca Loctite (Henkel-adhesives.com).....	98
Figura 62: Ensamblaje de la cubierta y del casco con adhesivo estructural (boatindustry.es).....	101
Figura 63: Esquema de preparación de acero y composites para su unión y aspectos para tener en cuenta (Autor).....	102
Figura 64: Circunferencia formada por los colores de cada uno de los objetivos de desarrollo sostenible (un.org).....	108
Figura 65: Representación esquemática de un barco (general cargo) utilizando composites y acero en su construcción (Autor)	114

Listado de Tablas

Tabla 1: Composición de sales del océano en condiciones estándar (perodni.com)..	28
Tabla 2: Comparativa de fortalezas y debilidades entre el acero y la madera (Autor)	30
Tabla 3: Equivalencias de aceros entre distintas sociedades de clasificación (Caro 2016)	48
Tabla 4: Composición química de los aceros (Caro 2016)	49
Tabla 5: Listado de productos y aplicaciones de la empresa Gurit para la construcción naval (gurit.com)	81
Tabla 6: Ventajas e inconvenientes del remachado (Autor)	84
Tabla 7: Contraste entre el remachado y la soldadura (Autor)	85
Tabla 8: Pros y contras de la soldadura por forja (Autor)	86
Tabla 9: Pros y contras de la soldadura por oxigás (Autor)	87
Tabla 10: Ventajas y aplicaciones comunes de la soldadura por resistencia (Autor)..	88
Tabla 11: Ventajas y desafíos que presenta la soldadura con arco de carbono (Autor)	89
Tabla 12: Características de los electrodos más comunes (Gavilán, 2020)	91
Tabla 13: Ventajas y desafíos que presenta la SMAW (Autor)	92
Tabla 14: Ventajas y desafíos que presenta la GMAW (Autor)	93
Tabla 15: Ventajas y desafíos que presenta la GTAW (Autor)	94
Tabla 16: Ventajas y aplicaciones comunes de la soldadura SAW (Autor)	96
Tabla 17: Ventajas que presentan los adhesivos (Autor)	99
Tabla 18: Resinas epoxy, diferenciación entre su uso como adhesivo o matriz (Autor)	99
Tabla 19: Tipos de adhesivos, características principales y su ambito de aplicación (Autor)	100
Tabla 20: Pruebas para comprobar una unión (Autor)	103
Tabla 21: Tabla resumen de las tendencias futuras en la construcción naval (Autor)	109
Tabla 22: Tabla resumen sobre la aplicación de materiales compuestos en barcos de gran envergadura (Autor)	112

Resumen

La transición del empleo del acero a los materiales compuestos ha sido una tendencia significativa en la industria naval, impulsada por las ventajas en peso, resistencia a la corrosión y diseño que ofrecen los materiales compuestos. Este cambio ha llevado a la construcción de embarcaciones más eficientes y sostenibles, y continúa siendo un tema importante en la industria naval. Este Trabajo Fin de Grado “La transición en el empleo del acero a los materiales compuestos en construcción naval” realiza una revisión sobre esta transición aportando datos que justifiquen y expliquen la misma. Para ello el trabajo enfatiza los métodos de construcción, las técnicas de unión, el tamaño de las embarcaciones, su peso, y demás aspectos relevantes que se mencionan a lo largo del trabajo. La actual panorámica de la construcción naval revela una armonía entre el acero tradicional y los vanguardistas materiales compuestos. La realidad actual no es sólo una muestra de la coexistencia, sino un capítulo en la historia de la construcción naval, donde la diversidad del empleo de materiales, tanto los clásicos del sector, como los materiales nuevos, que abarca desde aleaciones de aluminio, como materiales compuestos, es la clave para desbloquear nuevos niveles de eficiencia y rendimiento. Así, la introducción de materiales compuestos no es simplemente un cambio de materia prima, es el inicio de una era donde la resistencia y la ligereza convergen en una ruta que impulsa a la construcción naval hacia horizontes aún más prometedores.

Palabras clave

Barcos, Construcción naval, Acero para construcción naval, Materiales compuestos, Uniones.

Abstract

The transition from steel to composites has been a significant trend in the shipbuilding industry, driven by the weight, corrosion resistance and design advantages offered by composites. This shift has led to the construction of more efficient and sustainable vessels and continues to be an important topic in the shipbuilding industry. This Final Degree Project "The transition from the use of steel to composite materials in shipbuilding" reviews this transition, providing data that justify and explain it. To this end, the work emphasises construction methods, joining techniques, the size of the vessels, their weight, and other relevant aspects that are mentioned throughout the work. The current overview of shipbuilding reveals a harmony between traditional steel and state-of-the-art composite materials. The current reality is not only a sign of coexistence, but a chapter in the history of shipbuilding, where the diversity of the use of materials, both classic and new materials, ranging from aluminium alloys to composites, is the key to unlocking new levels of efficiency and performance. Thus, the introduction of composite materials is not simply a change of raw material, it is the beginning of an era where strength and lightness converge on a path that propels shipbuilding towards even more promising horizons.

Key words

Ship, Shipbuilding, Shipbuilding steel, Composite, Joints.

A

ABS	
<i>American Bureau Of Shipping</i>	48
AISI	
<i>American Iron and Steel Institute</i>	35, 44, 47
AM	
<i>Additive Manufacture</i>	66
ASTM	
<i>American Society for Testing and Materials</i>	44, 46, 47
AWS	
<i>American Welding Society</i>	35

B

BV	
<i>Bureau Veritas</i>	48

C

CEO	
Chief Executive Officer	79
CMM	
<i>Coordinate Measuring Machine</i>	103
CN	
Construcción Naval	24
CNC	
Control Numérico Computarizado	50

D

DNV-GL	
<i>Det Norske Veritas And Germanischer Lloyd</i>	48, 66, 81

E

EBW	
<i>Electron Beam Welding</i>	96
E-LASS	
<i>European network for Lightweight Applications at Sea</i>	110
ETS	
Escuela Técnica Superior	77

F

FSW	
<i>Friction Stir Welding</i>	96
FW	
<i>Friction Welding</i>	96

G

GMAW	
<i>Gas Metal Arc Welding</i>	92
GTAW	
<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>	93

I

IA	
Inteligencia Artificial	109, 112
IMO	
<i>International Maritime Organization</i>	110
IoT	
<i>Internet of Things</i>	112

L

LBW	
<i>Laser Beam Welding</i>	97
LR	
<i>Lloyd's</i>	48

M

MAG	
<i>Metal Active Gas</i>	92
MaLECoN	
Material Laminado Estructural para Construcción Naval.....	77
MIG	
<i>Metal Inert Gas</i>	92

O

ODS	
Objetivos de Desarrollo Sostenible	116

P

PAW	
<i>Plasma Arc Welding</i>	97

R

RFID	
<i>Radio Frequency Identification</i> ..	108
Rina	
<i>Registro Italiano Navale</i>	48
RTM	
<i>Resin Transfer Molding</i>	65

S

SAE	
<i>Society of Automotive Engineers</i> .	46
SAW	
<i>Submerged Arc Welding</i>	94, 95
SMAW	
<i>Shielded Metal Arc Welding</i>	90
SOLAS	
<i>Safety of Life at Sea</i>	110
SRIM	
<i>Structural Reaction Injection Molding</i>	65

T

TIG	
<i>Tungsten Inert Gas</i>	93, 94

U

UNS	
<i>Unified numbering system</i>	45
UV	
Ultra Violeta.....	100

Z

ZAT	
Zonas Afectadas Térmicamente...	85

1. Introducción

1.1. Contexto de la construcción naval

La construcción naval, como una de las industrias más antiguas y fundamentales de la civilización, ha desempeñado un papel crucial en la economía global y la conectividad de naciones a lo largo de la historia. Es un sector multifacético que abarca la fabricación de una amplia variedad de embarcaciones, desde barcos mercantes y cruceros hasta buques de guerra y plataformas offshore. Además de su importancia económica, la construcción naval es esencial para el transporte de mercancías, la defensa nacional, la exploración marina y la investigación científica en el océano. La Figura 1: Papel de la Construcción Naval a lo largo de la historia (Autor) esquematiza distintos papeles que ha tenido y sigue teniendo o aspectos en los que ha influido la construcción naval.

La elección de materiales en la construcción naval es un factor crítico que ha influido en la eficiencia, la seguridad y la competitividad de las embarcaciones a lo largo del tiempo.

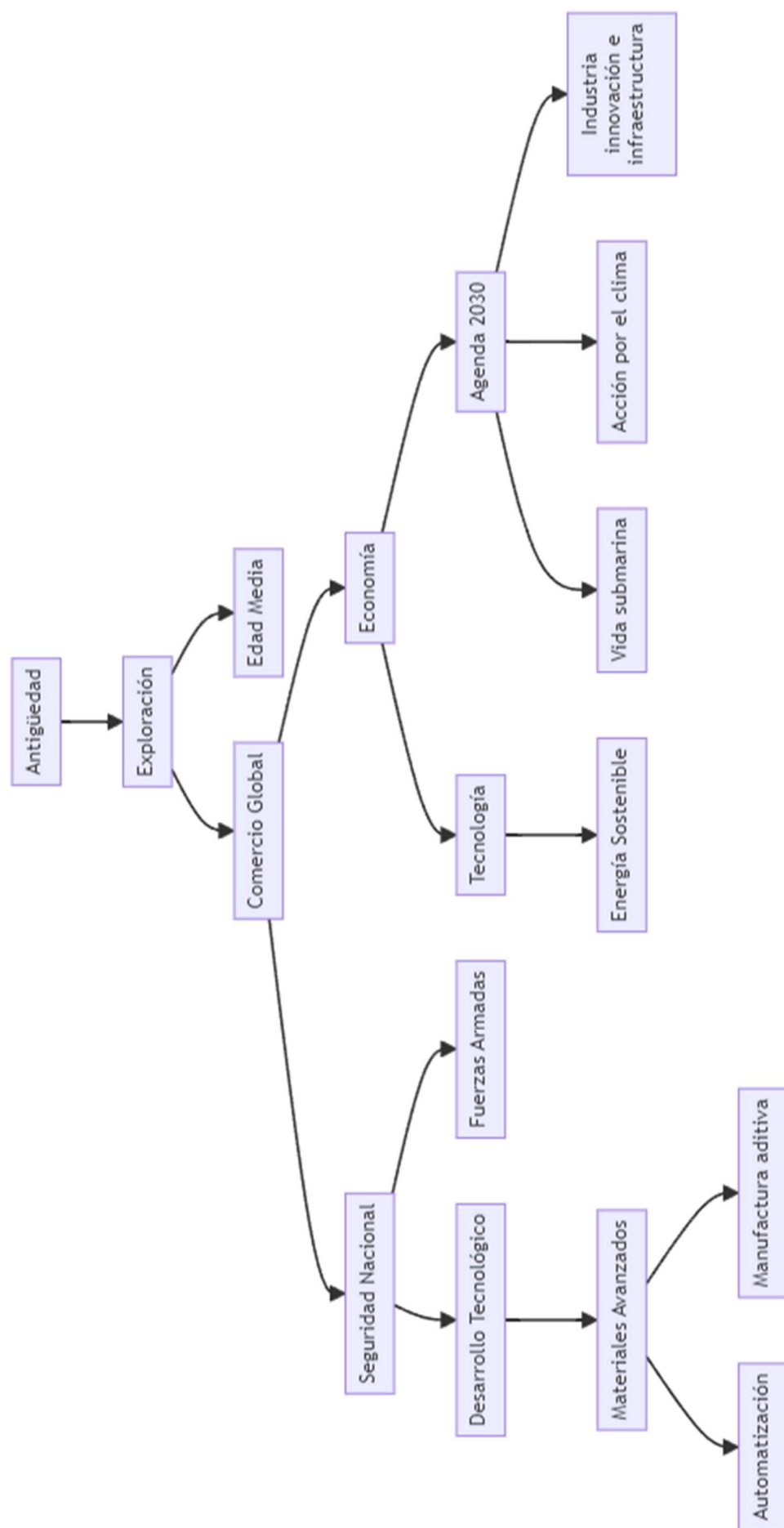


Figura 1: Papel de la Construcción Naval a lo largo de la historia (Autor)

1.2. Elección de materiales en la industria naval

La elección de materiales en la construcción naval es un proceso crítico que afecta directamente a la eficiencia operativa, la vida útil y la sostenibilidad de las embarcaciones. Durante siglos, el acero ha sido el material dominante en la construcción naval debido a su resistencia mecánica, durabilidad y capacidad para resistir las condiciones marinas extremas. Sin embargo, en las últimas décadas, los materiales compuestos han surgido como una alternativa prometedora.

La elección entre el acero y los materiales compuestos de matriz polimérica en la construcción naval tiene un impacto significativo en varios aspectos clave:

- **Eficiencia y rendimiento:** Los materiales compuestos al ser más ligeros, pueden reducir el peso de la embarcación, lo que a su vez se traduce en una mejora de la eficiencia en términos de consumo de combustible y velocidad.
- **Resistencia a la corrosión:** La exposición constante al agua de mar hace que la corrosión sea un desafío muy importante en la construcción naval. Los materiales compuestos ofrecen ventajas en este aspecto.
- **Seguridad y durabilidad:** La elección de materiales influye en la seguridad de la tripulación y la embarcación en general. Los materiales compuestos pueden ofrecer propiedades de absorción de impactos y ligereza, mientras que el acero es conocido por su resistencia estructural y durabilidad (siempre y cuando sea tratado correctamente para prevenir que se corroa).
- **Sostenibilidad:** La creciente conciencia ambiental ha llevado, junto con una búsqueda de reducción de emisiones a una búsqueda de materiales más sostenibles en la construcción naval. Además, se han desarrollado políticas y establecido objetivos, como la Agenda 2030 o los objetivos de desarrollo sostenible. Los materiales compuestos pueden ser reciclables y tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En la Figura 2 se muestran todos los objetivos del desarrollo sostenible, a color aquellos en los que la Construcción Naval puede impactar de forma más directa como industria.



Figura 2: Objetivos de desarrollo sostenible (un.org)

En este contexto, la transición del empleo del acero a los materiales compuestos en la construcción naval representa una evolución significativa en la industria que merece un análisis detallado. Una transición equiparable a la vivida por el sector cuando se introdujo el acero como sustituto de la madera. A lo largo de este estudio, exploraremos cómo esta transición ha ocurrido a lo largo de la historia y cuáles son las tendencias actuales y futuras en la elección de materiales para la construcción naval.

Previo al acero, la construcción de las embarcaciones de todo el globo se realizaba por lo general utilizando madera, lo que la convirtió debido a sus propiedades y pese a sus problemas en el material indiscutible para el desarrollo de las naves (Hidrobo Bedón, 2028). A medida que la sociedad se ha desarrollado han surgido innovaciones que han mejorado poco a poco la navegabilidad de los barcos, en una de esas innovaciones surgió el acero como nuevo material de referencia en la construcción naval.

1.3. Justificación del estudio y motivación del autor

La justificación de este estudio radica en la importancia de comprender cómo la transición de materiales ha influido en la construcción naval. Los materiales compuestos ofrecen ventajas significativas respecto al acero, como una mayor resistencia con relación a su peso, resistencia a la corrosión y una mayor eficiencia en el consumo de combustible. Comprender estas ventajas y desafíos es esencial para el avance de la industria naval y para tomar decisiones informadas por parte de diseñadores y constructores en esta industria.

La motivación principal que impulsa este estudio se origina en un profundo interés por la construcción naval y su constante adaptación a los avances tecnológicos y las necesidades cambiantes de la sociedad. El autor de este trabajo busca comprender de manera exhaustiva cómo la adopción de materiales compuestos ha transformado el panorama de la construcción naval. A continuación, se listan motivaciones complementarias que han contribuido a la elección de este trabajo:

- **Exploración de la innovación tecnológica:** El autor siente una profunda curiosidad por la innovación tecnológica en la industria. Esta curiosidad lo lleva a explorar cómo los materiales compuestos, con sus propiedades únicas, han revolucionado y están revolucionando la forma en que se diseñan y construyen embarcaciones de todos los tamaños y categorías.
- **Interés en tendencias tecnológicas:** El estudio de la transición de acero a materiales compuestos permite al autor explorar cómo las tendencias tecnológicas están dando forma al futuro de la construcción naval. Esto incluye el análisis de cómo se están utilizando materiales compuestos en embarcaciones de diversas categorías, desde yates deportivos de alto rendimiento hasta barcos comerciales y militares.

- **Potencial aplicación práctica:** El autor está interesado en la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en futuros proyectos relacionados con la construcción naval.
- **Búsqueda de conocimientos fundamentados:** En el proceso de investigación, el autor persigue el conocimiento sólido y fundamentado. La búsqueda de conocimiento confiable y basado en evidencia es un pilar fundamental de este estudio.

1.4. Objetivos del trabajo

El propósito fundamental de este estudio del estado del arte es llevar a cabo un análisis completo y detallado de la transición en el empleo del acero a los materiales compuestos en la industria de la construcción naval. Este análisis tiene como objetivo principal entender cómo ha evolucionado esta transición a lo largo del tiempo, cuáles son las razones detrás de este cambio y cómo está configurando el presente y el futuro de la construcción naval.

Los objetivos que guían este estudio son los que siguen:

- **Rastreo histórico:** Este estudio se propone investigar y analizar la evolución histórica de la transición del uso de acero a materiales compuestos en la construcción naval. Se investigará la historia del uso del acero en la construcción naval desde sus primeras aplicaciones hasta su consolidación como material dominante. Se identificarán los hitos clave que marcaron su empleo en embarcaciones las decisiones estratégicas y los factores que impulsaron la transición a los materiales compuestos.
- **Evolución tecnológica del acero:** Se examinarán los avances tecnológicos que han permitido el desarrollo de aceros de alta resistencia y la optimización de su uso en la construcción naval.
- **Introducción de materiales compuestos:** Se explorará el surgimiento y la introducción de materiales compuestos en la construcción naval, destacando los factores que impulsaron esta transición.
- **Estado actual y ejemplos de aplicación:** Se ofrecerá una visión actualizada de cómo se emplean los materiales compuestos en la construcción naval en la actualidad, incluyendo ejemplos concretos de embarcaciones que han adoptado estos materiales y sus beneficios. Se prestará especial atención a la construcción de barcos más grandes y especializados, lo que proporcionará información sobre las perspectivas futuras de esta tecnología.
- **Tendencias futuras y desafíos:** Se busca identificar y evaluar los beneficios y desafíos asociados con la adopción de materiales compuestos en comparación con el acero en la construcción de embarcaciones con un enfoque en cómo los materiales compuestos podrían continuar expandiendo su presencia en la industria. Esto permitirá una comprensión más profunda de las implicaciones prácticas de esta transición. Se abordarán también los desafíos técnicos y regulatorios que deben superarse.

2. Estado del arte

2.1. Uso histórico del acero en la construcción naval

2.1.1. Historia del acero y barcos emblemáticos



Figura 3: Representación del SS Great Eastern (History Today)

La implementación del acero en la construcción naval a lo largo de los siglos ha evolucionado desde una novedad técnica hasta convertirse en un pilar fundamental en la industria de la construcción naval, dejando una marca perdurable en la industria marítima. Este apartado se sumerge en los avances tecnológicos, los desafíos de ingeniería y

los hitos históricos que llevaron al uso generalizado del acero en la construcción de barcos. Desde la transición del hierro al acero en el siglo XIX hasta las hazañas de la ingeniería naval del siglo XX, este recorrido explora el papel fundamental del acero en la creación de algunas de las naves más influyentes de la historia, barcos emblemáticos que marcaron hitos en la navegación, la guerra y el comercio. Desde el majestuoso SS *Great Eastern* (Figura 3) de Isambard Kingdom Brunel (Lavery, 2017) hasta los icónicos transatlánticos como el RMS *Titanic* (Figura 4). A lo largo de estas páginas, se expondrán barcos emblemáticos que redefinieron la navegación, la guerra y el comercio, y que continúan siendo testimonios de la habilidad humana para conquistar los mares con precisión y durabilidad.



Figura 4: Representación del RMS Titanic (National Geographic)

2.1.1.1. La Era de la Experimentación (Siglos XVIII y XIX)

El uso del acero en la construcción naval comenzó como una serie de experimentos en el siglo XVIII, cuando la industria naval estaba buscando formas de mejorar la resistencia y durabilidad de sus embarcaciones, este suceso coincidió con los albores de la revolución industrial y fue una etapa que transformaría para siempre la industria marítima. En el siglo XVIII, los constructores navales comenzaron a explorar las posibilidades del hierro y el acero como alternativas al tradicional uso de la madera en la construcción de barcos ya que esta enfrentaba limitaciones en términos de resistencia y durabilidad. A mediados del siglo XVIII, se inició una construcción mixta de madera-hierro que permitió un aumento considerable del tamaño de los barcos a la vez que los hacía más ligeros y resistentes, también se construyeron algunos barcos experimentales con cascos de hierro. Estos primeros intentos tenían como objetivo

evaluar la resistencia y la durabilidad del hierro en comparación con la madera. El acero de esa época aún no contaba con la calidad suficiente para poder sustituir al hierro. La introducción del vapor como propulsor sustitutivo del viento y la hélice como alternativa a la rueda de paletas también fue determinante en el auge de la construcción naval en hierro y posteriormente en acero (Lavery, 2017).

Como ejemplo de barco de construcción mixta (o de materiales compuestos) tenemos el *City of Adelaide* (Figura 5) construido en Inglaterra en 1862 para transportar pasajeros y carga ligera entre Gran Bretaña y Australia. Junto con el *Cutty Sark* (Figura 6) son los dos únicos clippers de materiales compuestos que se conservan hoy en día (City of Adelaide Clipper Ship; Cutty Sark | Royal Museums Greenwich).



Figura 5: City of Adelaide
(thecaptainandthecook.com)

CITY OF ADELAIDE	
Origen Inglaterra	Fecha de botadura 1864
Eslora 74 m	
Desplazamiento 791 t	



Figura 6: Cutty Sark (Royal Museums
Greenwich)

CUTTY SARK	
Origen Escocia	Fecha de botadura 1869
Eslora 64,8 m	
Desplazamiento 921 t	

2.1.1.2. La Era de los Acorazados (XIX - Principios del XX)

A medida que avanzaba el siglo XIX, el acero se convirtió en el material preferido para la construcción de buques de guerra, especialmente acorazados. Uno de los ejemplos más notables es el *HMS Warrior* (Figura 7), un acorazado de la Marina Real Británica lanzado en 1860. *Warrior* fue el primer buque de guerra completamente construido con hierro y acero y marcó el comienzo de la era de los acorazados.



Figura 7: HMS Warrior (National Historic Ships)

HMS WARRIOR	
Origen Inglaterra	Fecha de botadura 1860
Eslora 127,4 m	
Desplazamiento 9210 t	

El desarrollo del buque blindado fue una respuesta crucial a la vulnerabilidad de los buques de guerra de madera frente a los proyectiles incendiarios y explosivos, marcando un punto de inflexión en la evolución de la construcción naval militar. El primer buque de este tipo, *La Gloire* (Figura 8) (era de casco de madera y su blindaje protegía todo el casco, hasta incluso debajo de la línea de flotación) de la Armada de Francia en 1859, y su contraparte británica, el *HMS Warrior*, fueron pioneros en esta nueva era de la construcción naval (HMS Warrior | National Museum of the Royal Navy).



Figura 8: La Gloire (U.S. Naval Institute)

LA GLOIRE	
Origen Francia	Fecha de botadura 1859
Eslora 78,22 m	
Desplazamiento 5618 t	

Durante la Guerra Civil de Estados Unidos, se produjeron los primeros enfrentamientos entre buques blindados, como el *USS Monitor* (Figura 9), y buques de madera. Estos combates demostraron claramente que los buques blindados eran superiores en términos de resistencia y poder de fuego. El enfrentamiento entre el *Monitor* y el *CSS Virginia* (Figura 10) (anteriormente *USS Merrimack*) en la Batalla de Hampton Roads en 1862 es un ejemplo icónico de esta nueva era de la guerra naval, ya que fue la primera batalla naval entre *Ironclads* (The Royal Navy: today and tomorrow : HILL, J. R; War at sea in the ironclad age : Hill, J. R).



Figura 9: *USS Monitor* (National Museum of American History)

<i>USS MONITOR</i>	
Origen EE. UU.	Fecha de botadura 1862
Eslora 52 m	
Desplazamiento 987 t	



Figura 10: *CSS Virginia* (National Museum of American History)

<i>CSS VIRGINIA</i>	
Origen EE. UU.	Fecha de botadura 1862
Eslora 84 m	
Desplazamiento 4500 t	

El buque blindado reemplazó a los buques de madera como la fuerza naval más poderosa de su época y dejó un legado duradero en la historia de la construcción naval y la guerra en el mar. Este cambio hacia el buque blindado marcó una transformación fundamental en la guerra naval. Estos nuevos barcos blindados establecieron el estándar para la construcción naval militar moderna y cambiaron la balanza de poder en los océanos del mundo (National Museum of the US Navy).

2.1.1.3. *La Revolución del Acero en la Construcción Comercial (XIX - Principios del XX)*

La adopción del acero en la construcción naval comercial también tuvo un impacto significativo. Un ejemplo destacado es el *SS Great Eastern* (Figura 11), un barco de pasajeros y carga lanzado en 1858. Fue el barco más grande de su época y estaba construido principalmente con hierro y acero. Este buque allanó el camino para la construcción de barcos transatlánticos más grandes y estableció un estándar para la construcción de barcos comerciales duraderos y de gran tamaño.

Uno de los inventos clave que impulsaron la revolución del acero fue el convertidor Bessemer, patentado en 1856 por Henry Bessemer. Este dispositivo permitió la producción masiva de acero de alta calidad al eliminar impurezas del hierro fundido. Esto hizo que el acero fuera más asequible y accesible para la construcción naval. A mediados del siglo XIX, el horno Siemens-Martin se convirtió en otra innovación crucial. Este horno permitía la producción de acero de alta calidad a través de un proceso de refinamiento que reducía las impurezas. La combinación de este horno con el convertidor Bessemer permitió la producción eficiente de acero de construcción naval (Bessemer process | Britannica).

La adopción del acero en la construcción naval tuvo un impacto profundo en el comercio internacional. Los barcos de acero podían navegar distancias más largas y soportar condiciones más adversas, lo que impulsó el comercio mundial y la expansión de rutas comerciales. La mayor resistencia del acero permitió que los barcos comerciales llevaran más carga, lo que también mejoró la eficiencia y la rentabilidad del comercio naval (Historic England).

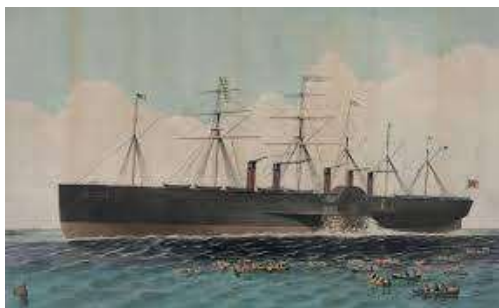


Figura 11: *SS Great eastern* (Britannica)

<i>SS GREAT EASTERN</i>	
Origen Inglaterra	Fecha de botadura 1858
Eslora 211 m	
Desplazamiento 32160 t	

2.1.1.4. *El Siglo XX y más allá*

A medida que avanzaba el siglo XX, el acero se consolidó como el material estándar en la construcción naval. La Segunda Guerra Mundial desempeñó un papel crucial en esta evolución, ya que vio la construcción de una flota masiva de buques de guerra de acero, incluyendo portaaviones, acorazados y destructores. En este apartado

exploraremos cómo el acero se mantuvo como el material dominante en la construcción naval durante este período y su papel en la creación de esta flota masiva de buques de guerra.

A medida que avanzaba el siglo XX, la tecnología de producción de acero continuó mejorando. Los métodos de refinamiento y aleación permitieron la creación de aceros más fuertes y resistentes, ideales para aplicaciones en la construcción naval. Dado que el acero seguía ofreciendo ventajas fundamentales en términos de resistencia, durabilidad y capacidad de carga en comparación con otros materiales como la madera o el aluminio siguió siendo el material predilecto para la construcción, puesto que estas propiedades eran cruciales para la construcción de buques de guerra que debían soportar condiciones extremas en el mar. Esto consolidó al acero como el material por excelencia para la construcción naval.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la demanda de buques de guerra se disparó. Los acorazados, portaaviones, submarinos y destructores eran esenciales para el esfuerzo bélico de las naciones involucradas. El acero era el material preferido para la construcción de estos buques debido a su resistencia y capacidad para soportar daños. La guerra llevó a una producción en masa de buques de acero. Los astilleros en todo el mundo trabajaron a toda velocidad para construir flotas de barcos militares. Esto impulsó la industria del acero y la construcción naval a niveles sin precedentes. También hubo importantes avances en tecnología naval, como la introducción de los portaaviones como buques de guerra clave. Estos gigantes de acero demostraron ser cruciales en la estrategia naval.

Después de la Segunda Guerra Mundial, muchas naciones tenían flotas navales masivas de buques de acero. Esto influyó en las estrategias de defensa y en la geopolítica de la Guerra Fría, ya que el poder naval seguía siendo un elemento importante en la seguridad global. A lo largo del siglo XX y en la actualidad, la construcción naval ha seguido evolucionando con la incorporación de materiales compuestos y tecnologías avanzadas. Sin embargo, el acero todavía desempeña un papel esencial en la construcción de barcos, incluidos los buques de guerra modernos. Además de los buques de guerra, el acero también siguió siendo el material preferido en la construcción de barcos comerciales y de carga debido a su capacidad de carga, durabilidad y resistencia a la corrosión (Lehigh River Watershed Explorations).

El Siglo XX trajo consigo transformaciones radicales en la construcción naval. La soldadura reemplazó al remachado, y se estableció el sistema de construcción modular. Este cambio estratégico optimizó recursos, acortó plazos y redujo costos al ensamblar previamente bloques fabricados en talleres (Fundación Nuestromar).

Estos barcos representan diferentes aspectos de la historia naval del Siglo XX, desde la época de la Segunda Guerra Mundial hasta el auge de los transatlánticos de lujo. Cada uno tiene su propia historia y contribución única a la evolución de la construcción naval y la navegación en esa época.

USS Enterprise (CV-6): Este portaaviones estadounidense fue uno de los buques más decorados y respetados de la Segunda Guerra Mundial. Sirvió en numerosas batallas del Pacífico y fue fundamental en la victoria de los Aliados.

- CV: Indica que es un portaaviones (*Carrier*) de la Marina de los Estados Unidos.
- 6: Número de serie asignado al portaaviones. En este caso, el sexto portaaviones de la Marina de los Estados Unidos con el nombre *Enterprise*.

USS Missouri (BB-63): Conocido como el *Mighty Mo*, el *USS Missouri* fue un acorazado estadounidense que jugó un papel crucial en la rendición de Japón en la Segunda Guerra Mundial. La ceremonia de rendición japonesa tuvo lugar a bordo de este buque en la bahía de Tokio.

- BB: Indica que es un acorazado (*Battleship*) de la Marina de los Estados Unidos.
- 63: Número de serie asignado al acorazado. En este caso, el sexagésimo tercer acorazado de la Marina de los Estados Unidos con el nombre *Missouri*.

HMS Queen Elizabeth (R08): (Figura 13). Es un portaaviones de propulsión por turbinas de gas y motores diésel de la clase Queen Elizabeth de la Royal Navy, así nombrado en honor al acorazado *HMS Queen Elizabeth* el cual fue el líder de la clase de acorazados Queen Elizabeth.

- R08: es su número de identificación

Bismarck: El acorazado alemán Bismarck fue uno de los buques más poderosos de la Kriegsmarine durante la Segunda Guerra Mundial. Su hundimiento tras una intensa persecución naval fue un hito en la contienda.

SS United States: Este transatlántico estadounidense, botado en 1952, ostenta el récord de la travesía más rápida del Atlántico. Con su elegante diseño, era un símbolo de la elegancia en los viajes marítimos.

Yamato: El acorazado japonés *Yamato* (Figura 12) fue uno de los barcos de guerra más grandes y poderosos jamás construidos. Su participación en la Segunda Guerra Mundial, incluyendo su hundimiento en 1945, es parte integral de la historia naval.

SS Normandie: Este transatlántico francés, botado en 1932, fue conocido por su lujoso diseño art déco. Aunque su carrera comercial fue breve debido a un incendio, sigue siendo recordado como uno de los barcos más elegantes de la época.



Figura 12: Yamato (FDRA-Fuerza Naval)

YAMATO	
Origen Japón	Fecha de botadura 1940
Eslora 263 m	
Desplazamiento 65027 t	



Figura 13: HMS Queen Elizabeth (GOV-UK)

HMS QUEEN ELIZABETH (R08)	
Origen Reino Unido	Fecha de botadura 2014
Eslora 280 m	
Desplazamiento 65000 t	

El diagrama recogido en la (Figura 14) se centra en el período de tiempo entre 1990 y 2023, representando barcos emblemáticos construidos en esta época y las tendencias de la CN. El diagrama, recogido en la (Figura 15), es una representación esquemática de los acontecimientos que sucedieron durante la historia del acero en la construcción naval; el eje vertical se ha dividido en función de las eras que se vivieron a lo largo del tiempo (eje horizontal). La línea roja representa el día de hoy, los rectángulos distintos periodos y los rombos la construcción de barcos relevantes en cada era.

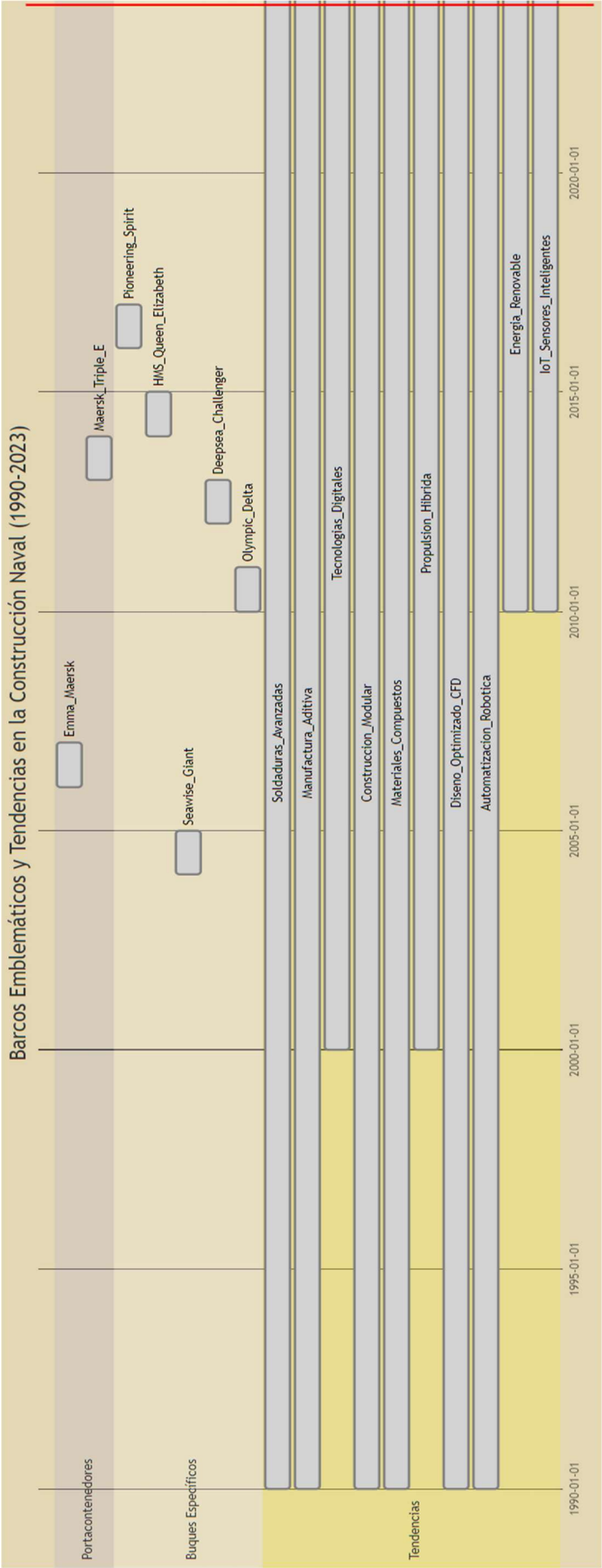


Figura 14: Barcos emblemáticos y tendencias en la CN entre 1990 y 2023 (Autor)

Historia del Acero en la construcción naval

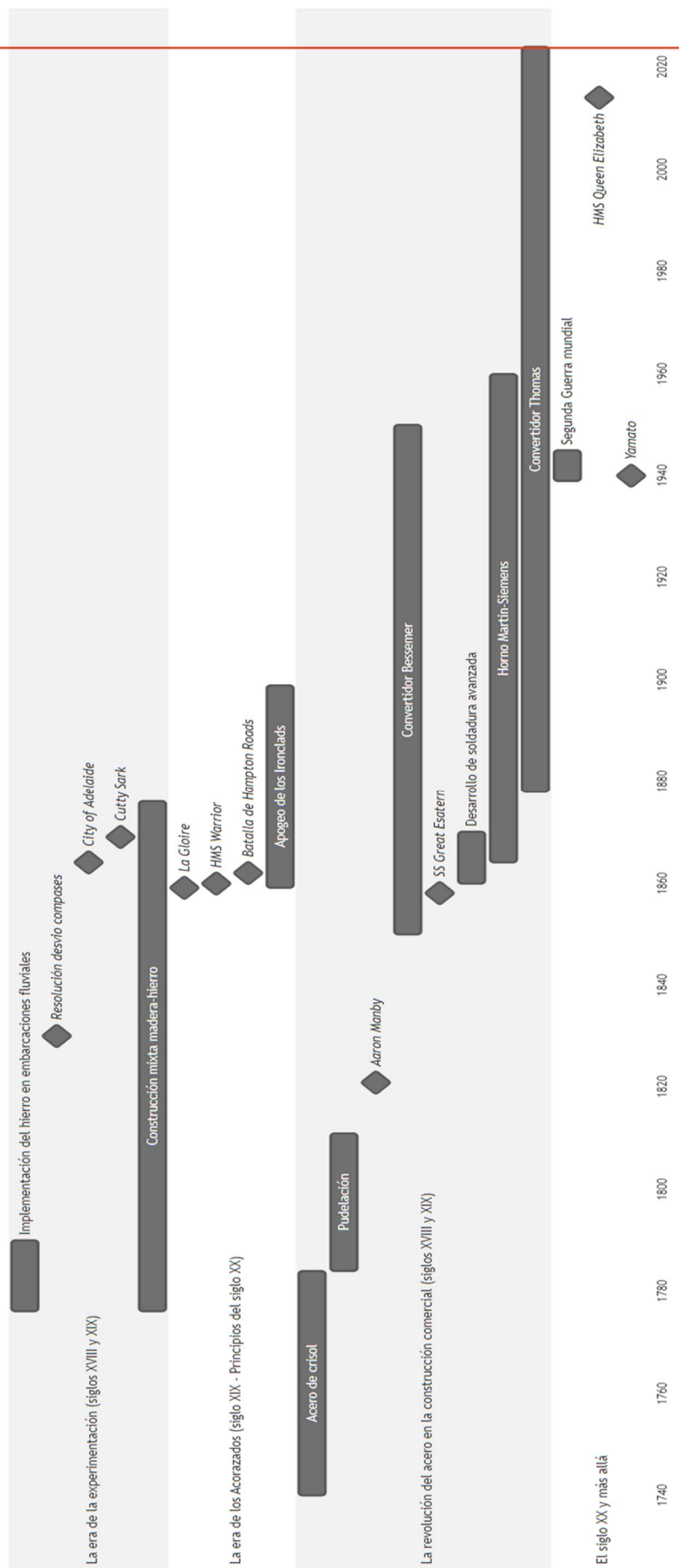


Figura 15: Diagrama representativo de la historia de la construcción naval (Autor)

2.1.2. Propiedades del acero en la construcción naval

2.1.2.1. Comparativa entre el acero y su antecesor (madera)

El agua de mar es un medio natural que afecta a la madera y al acero, la primera sufre una degradación, mientras que el acero se corroe. Esto es debido a las propiedades inherentes de estos materiales y a cómo interactúan con el entorno marino.

Agua de mar

El agua de mar, además de ser una disolución basada en agua que cubre la mayor parte del planeta es el medio en el que la gran mayoría de los barcos existentes operan y navegan. La Figura 16 muestra mediante un mapa de colores como la concentración salina varía a lo largo del globo, las áreas de alta salinidad (36‰) indicadas con el color verde, las de salinidad media (35‰) en azul y las de baja salinidad (34‰) en morado.

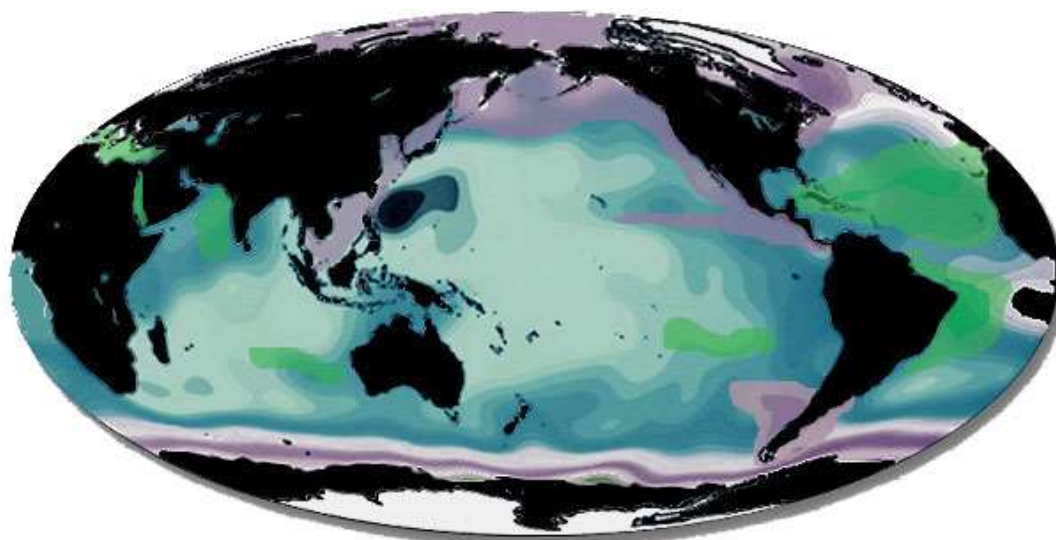


Figura 16: Diferentes salinidades en los mares y océanos del globo (marinebio.net)

A pesar de encontrar distintos grados de salinidad en los diferentes océanos, todos poseen las mismas sales y estas se encuentran en la misma proporción másica, sea cual sea la salinidad del mar u océano en el que se tomen. El grado de salinidad varía en función de múltiples factores, pero el más común de ellos es la relación entre precipitaciones y evaporación. Si hay más evaporación, entonces la salinidad es mayor, mientras que si hay más precipitación ocurre lo contrario (Seawater Composition).

En la Figura 17 se ilustra de manera gráfica el contenido del agua de mar, mientras que la Tabla 1 recoge las sales disueltas en agua de mar a 25° y 1bar, donde en la tabla, Z es la carga, M la masa molar, X la fracción molar y W la fracción másica (Periodic Table of the Elements; UNESCO Biblioteca Digital).

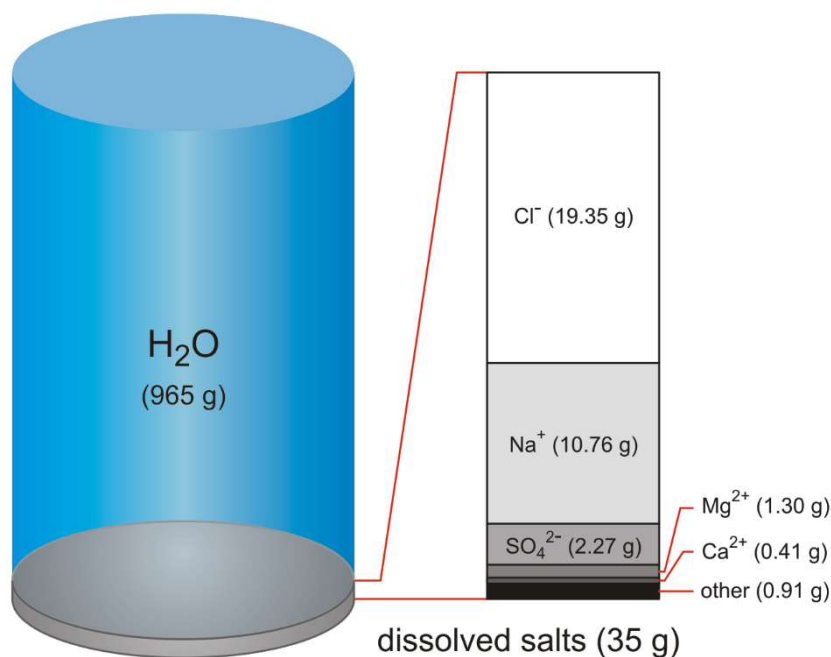


Figura 17: Composición química de un kilo de agua de mar con una salinidad de 35‰ (perodni.com)

Species	Z	M / gmol^{-1}	X / 10^{-3}	X·Z / 10^{-3}	W
Cl^-	-1	35.453(2)	487.4839	-487.4839	0.5503396
Na^+	+1	22.989 769 28(2)	418.8071	418.8071	0.3065958
SO_4^{2-}	-2	96.062 6(50)	25.2152	-50.4304	0.0771319
Mg^{2+}	+2	24.305 0(6)	47.1678	94.3356	0.0365055
Ca^{2+}	+2	40.078(4)	9.1823	18.3646	0.0117186
K^+	+1	39.098 3(1)	9.1159	9.1159	0.0113495
HCO_3^-	-1	61.016 84(96)	1.5340	-1.5340	0.0029805
Br^-	-1	79.904(1)	0.7520	-0.7520	0.0019134
B(OH)_3	0	61.833 0(70)	0.2807	0	0.0005527
CO_3^{2-}	-2	60.008 9(10)	0.2134	-0.4268	0.0004078
Sr^{2+}	+2	87.62(1)	0.0810	0.1620	0.0002260
B(OH)_4^-	-1	78.840 4(70)	0.0900	-0.0900	0.0002259
F^-	-1	18.998 403 2(5)	0.0610	-0.0610	0.0000369
CO_2	0	44.009 5(9)	0.0086	0	0.0000121
OH^-	-1	17.007 33(7)	0.0071	-0.0071	0.0000038
TOTAL			1 000	0	1.0

Tabla 1: Composición de sales del océano en condiciones estándar (perodni.com)

Composición química de la madera y el acero:

- **Acero:** El acero es una aleación de hierro y carbono, y puede incluir otros elementos en pequeñas cantidades, como cromo o níquel, dependiendo del tipo de acero. Estos elementos adicionales, como el cromo, forman una capa protectora de óxido en la superficie del acero cuando se expone al agua de mar.

Esta capa actúa como una barrera que protege el acero subyacente de la corrosión.

- **Madera:** La madera de un árbol vivo está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, y no contiene elementos que formen naturalmente una capa protectora en presencia de agua de mar. Mientras el árbol se encuentre vivo su componente químico mayoritario será el agua. La madera seca tiene una composición de alrededor del 50% Carbono, 44% Oxígeno 6% Hidrógeno y trazas de inorgánicos. La madera es propensa a la absorción de agua, lo que puede conducir a la descomposición, el hinchamiento y la formación de moho y hongos en condiciones húmedas (Figura 18) (Blanco del Río, 2015; Rowell, 2012).

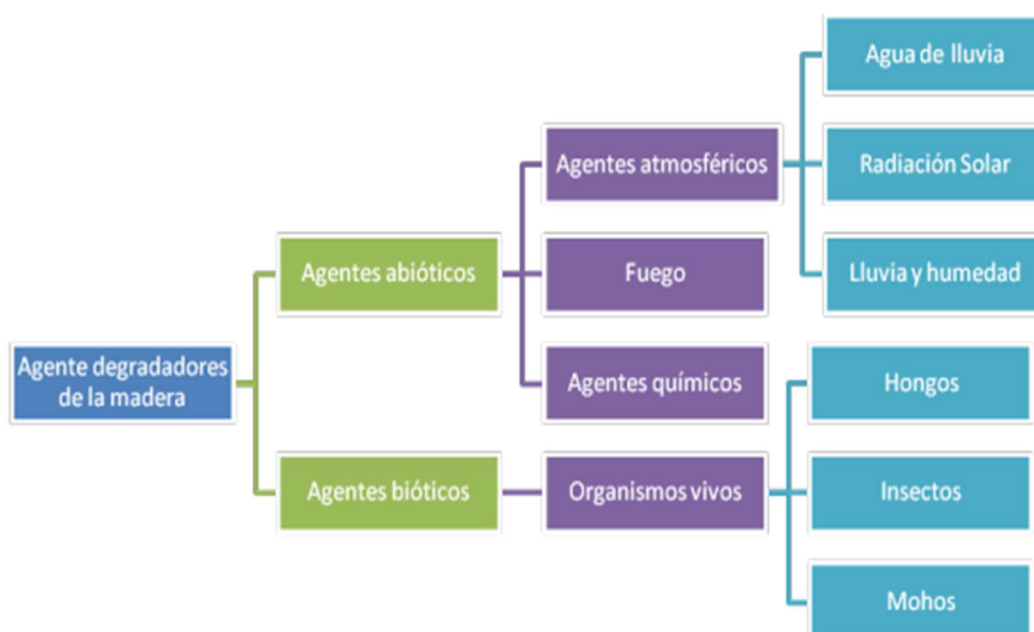


Figura 18. Factores que pueden producir el deterioro de la madera (Blanco del Río, 2015)

Resistencia al Agua de mar:

- **Acero:** El acero es intrínsecamente resistente al agua de mar y a los efectos corrosivos de los ambientes marinos. La capa de óxido que se forma en su superficie actúa como una barrera, poco eficaz contra la corrosión causada por la exposición al agua de mar, por lo que hay que seleccionar meticulosamente las medidas anticorrosión a aplicar (Wei et al, 2018).
- **Madera:** La madera es altamente susceptible a la humedad y a la exposición constante al agua de mar. Cuando la madera se empapa en agua salada, se hincha, lo que puede dañar la integridad de la estructura de un barco con el tiempo. Además, los organismos marinos, como las teredos (moluscos bivalvos que pertenecen a la familia Teredinidae, más comúnmente conocidos como gusanos de mar), pueden perforar y dañar la madera, acelerando aún más su deterioro (Rojas, 2000).

Mantenimiento Requerido:

- **Acero:** Aunque el acero es relativamente resistente a la corrosión, depende íntimamente de la agresividad del ambiente del que esté en contacto. Así, todavía requiere un mantenimiento adecuado para garantizar su vida en servicio. Esto puede incluir la aplicación periódica de recubrimientos protectores, como pintura o revestimientos anticorrosivos, para mantener una barrera entre el acero y el medio externo.
- **Madera:** La madera requiere un mantenimiento aún más intensivo en comparación con el acero. Esto incluye sellado, barnizado y reparaciones regulares para prevenir la descomposición, el ataque de organismos marinos y otros problemas relacionados con la (Schultz et al, 2007; Teaca et al, 2019).

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los puntos previos:

	Acero	Madera
Puntos fuertes	Alta resistencia a la tracción.	Material tradicional
	Baja susceptibilidad a la corrosión tras aplicarle tratamiento	Renovable y sostenible.
	Reciclable y sostenible.	Adaptable a formas complejas.
	Fácil soldadura y unión.	Se puede trabajar con herramientas comunes.
	Resistente al fuego.	Ampliamente disponible en muchas regiones.
Puntos débiles	Requiere mantenimiento contra la corrosión.	Susceptible a degradación por humedad insectos, hongos, sal...
	Alta densidad	Menor resistencia mecánica que el acero.
	Menor adaptabilidad a formas complejas.	Mayor riesgo de deformación y descomposición.
	Puede ser afectado por altas temperaturas.	Mayor mantenimiento para preservar la madera.
	Menos resistente a ciertos productos químicos.	Vulnerable a impactos y abrasiones.

Tabla 2: Comparativa de fortalezas y debilidades entre el acero y la madera (Autor)

En resumen, el acero es más apropiado que la madera en el contexto de la construcción naval debido a su composición química, a la posibilidad de adoptar medias muy controladas frente a la corrosión, y a la capacidad de estar sometido a cargas y esfuerzos mucho mayores (Charles et al., 2016; Vukelic et al., 2022).

2.1.2.2. *Avances en la tecnología del acero en la construcción naval*

La industria naval ha experimentado una revolución tecnológica impulsada por los continuos avances en la tecnología del acero. En el marco de esta investigación, nos sumergiremos en un análisis de la evolución de estos aceros, destacando sus mejoras en resistencia mecánica y su papel en el diseño eficiente de embarcaciones.

A lo largo de las décadas, los aceros utilizados en la construcción naval han evolucionado de manera notable para satisfacer las demandas cada vez mayores de la industria. Desde los primeros días de la navegación hasta la actualidad, ha habido una transición en la que la investigación y la innovación se han creado entre ambos materiales que no solo resisten las tensiones extremas del entorno marino, sino que también permiten la creación de estructuras más ligeras y eficientes. Nuevas aleaciones y tratamientos térmicos han elevado las propiedades mecánicas de estos aceros. La resistencia a la corrosión, la capacidad de soportar cargas dinámicas y las mejoras en la soldabilidad son aspectos clave de estos aceros (Hill & Perez, 2017; Papavinasam, 2014; Uzay et al., 2016).

En apartados siguientes se abordarán con especial atención las técnicas de unión que han surgido con estos avances, así como los procesos de fabricación que han sido mejorados o introducidos para maximizar la eficiencia en la construcción naval. La robotización, en particular, se ha situado como un recurso fundamental en la optimización de los procesos, permitiendo mayor precisión y rapidez en la ejecución de tareas. La identificación temprana de posibles fallos también ha resultado esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras marítimas.

Fue durante la Revolución Industrial, con el desarrollo de la máquina de vapor y el conocimiento sobre el acero, que este material comenzó a ser utilizado como componente estructural. La técnica de remachado surgió para unir las diferentes piezas de acero en ese momento. En el siglo XX, se produjeron importantes cambios en los métodos de construcción de buques con la introducción de la soldadura y la adopción del sistema de construcción modular. Esto implicó un cambio en la estrategia constructiva para optimizar recursos, reducir costos y acortar plazos (Lavery, 2017; UNE-EN 10020:2001).

Los talleres de ribera se encargaban de producir elementos del casco del barco, como varengas, cuadernas, mamparos, esloras, palmejares y chapas del forro, utilizando planchas de acero que eran mecanizadas mediante diversos equipos. La plancha de acero, básicamente hierro refinado con un poco de carbono era el componente principal en la construcción naval y se cortaba, conformaba y trabajaba según el diseño necesario. Al igual que hoy en día el principal problema que presentaban las planchas de acero es la corrosión.

La corrosión electroquímica es un proceso mediante el cual el hierro contenido en el acero se deteriora, perdiendo propiedades como dureza o resistencia mecánica. Para que un proceso de corrosión electroquímica tenga lugar es necesaria una combinación de elementos. El ánodo, será la zona en la que ocurrirá la oxidación, el cátodo, la

presencia de un electrolito (agua de mar) y una unión metálica entre el cátodo y el ánodo para permitir el flujo de electrones (Figura 19).

El acero inoxidable, una aleación de acero con metales como níquel, cromo o titanio, ofrece protección contra la corrosión al formar una capa impermeable de óxido sobre su superficie. A lo largo del tiempo, se ha reducido el contenido de carbono en el acero y se han introducido elementos como manganeso, níquel y cromo, junto con tratamientos de templado y revenido (About Corrosion).

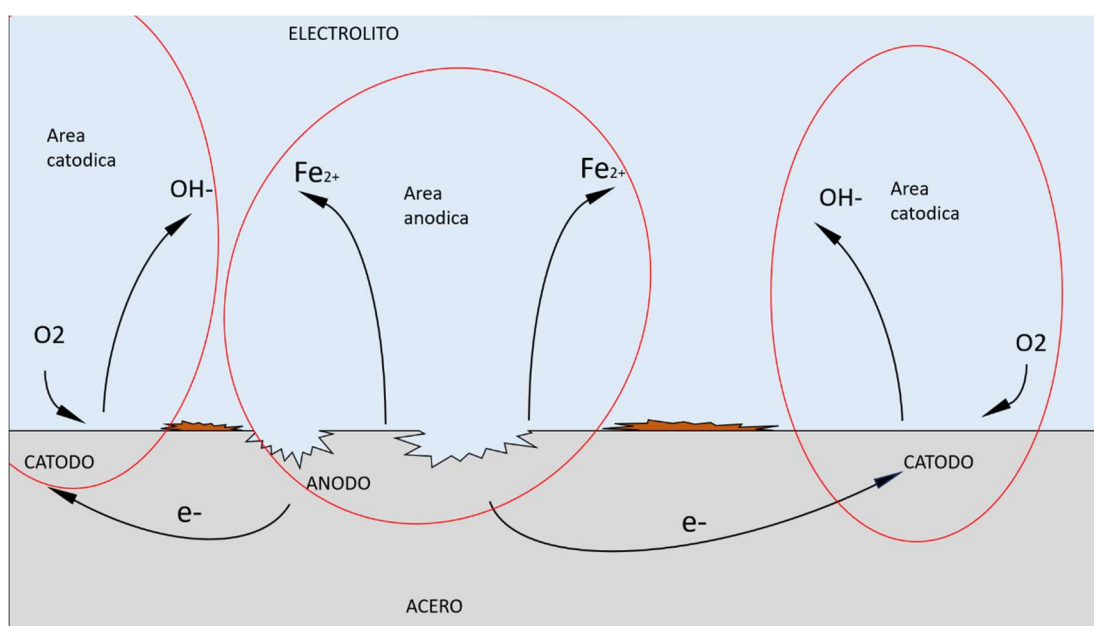


Figura 19: Corrosión por proceso electroquímico (Autor)

En la Figura 19 se puede observar como ocurre este proceso de corrosión. En el cátodo el oxígeno se reduce formando iones de hidróxido que junto con los iones de hierro forman hidróxido de hierro y precipitan. Los iones de hierro se desprenden de la zona anódica causando picaduras en el metal que a su vez sirve de unión entre el cátodo y el ánodo para el flujo de electrones.

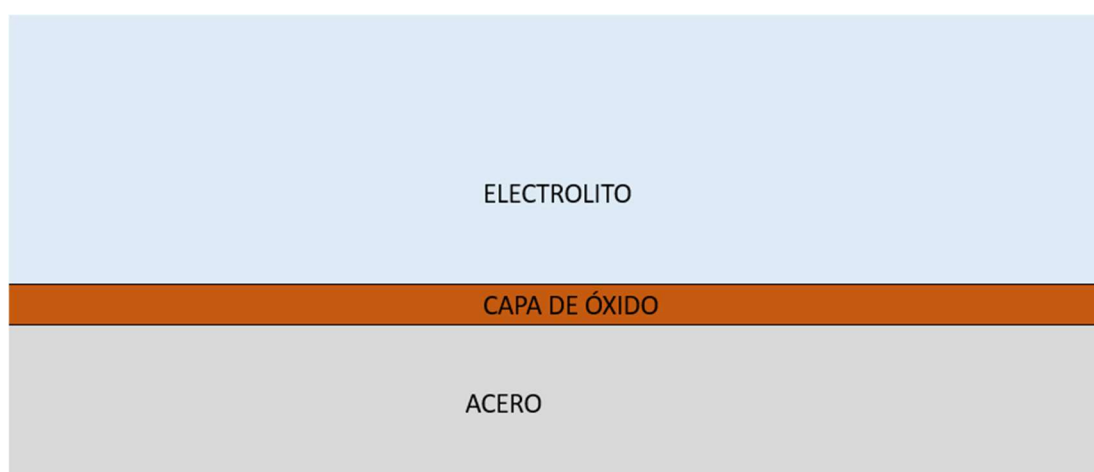


Figura 20: Representación de la protección de un acero inoxidable (Autor)

En el caso de los aceros inoxidable (Figura 20) la formación de una capa de óxido en la superficie de estos impide que tenga lugar todo el proceso ocurrido en la Figura 19.

En los apartados siguientes se abordarán aspectos que han permitido avanzar en el uso del acero para construcción naval, aspectos como la reducción del contenido de carbono, los elementos de aleación o tratamientos térmicos y termoquímicos entre otros.

2.1.2.3. Reducción del contenido de carbono

Método de Bessemer y Thomas: En el siglo XIX, se desarrollaron métodos como el proceso Bessemer y el proceso Thomas, que permitieron reducir el contenido de carbono en el hierro fundido. Estos procesos eliminaban impurezas, incluyendo el carbono, mediante la inyección de aire en el hierro fundido, lo que facilitaba la producción de acero con un contenido de carbono más bajo. En el proceso de Bessemer, el hierro fundido se coloca en un convertidor y se inyecta aire a alta presión a través de toberas. Este aire reacciona con el carbono presente en el hierro fundido, formando dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO) en el proceso de combustión (Introduction, 1998; Science Museum). La reacción química clave está expresada en la Ecuación 1:



El monóxido de carbono también interactúa con el carbono, reduciéndolo a CO₂ como se puede observar en la (Ecuación 2):



Estas reacciones eliminan el carbono en forma de dióxido de carbono, reduciendo así su contenido en el acero

2.1.2.4. Introducción de elementos de aleación

La aleación de aceros no es simplemente una combinación arbitraria de elementos; es una ciencia precisa que busca optimizar las propiedades del acero para satisfacer requisitos específicos. Aquí se profundiza en algunas consideraciones para tener en cuenta y su papel en la mejora de los aceros:

- Las proporciones exactas de elementos en la aleación del acero son cuidadosamente calculadas.
- Estas proporciones pueden variar según el tipo de acero y su aplicación específica en la construcción naval.
- La composición precisa impacta directamente en las características finales del acero, como su resistencia, ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión.
- La microestructura del acero, influenciada por la presencia de estos elementos, se vuelve un factor crítico. Por ejemplo, la adición de manganeso disminuye la temperatura de transformación eutectoide de la austenita.
- La combinación adecuada de estas fases y/o agregados microestructurales es esencial para lograr propiedades mecánicas óptimas.
- Los ingenieros metalúrgicos utilizan (Ejemplo: Thermo-Calc, (Thermo-Calc Software)) de modelado y experiencia empírica para calcular las cantidades óptimas de cada elemento en la aleación.

Manganeso, níquel, cobre y cromo: La adición de manganeso, níquel y cromo, entre otros elementos de aleación, se realiza durante la fundición del acero para mejorar sus propiedades. El manganeso mejora la resistencia y la maquinabilidad, el níquel contribuye a la tenacidad y resistencia a la corrosión, y el cromo aumenta la resistencia a la corrosión y la dureza. La adición de estos elementos de aleación se realiza durante la etapa de fusión del acero. Se introducen en el horno durante la fundición del hierro para formar la aleación deseada. Las proporciones y el momento exacto de adición varían según las especificaciones del acero requerido (Metalshub).

Manganeso (Mn):

- Propósito: Se añade al acero para mejorar su resistencia, dureza y tenacidad. Además, facilita la formación de óxidos y sulfuros, lo que ayuda a desoxidar el acero durante el proceso de fabricación.
- Efectos: Según Aristizábal y otros autores (2009) favorece la formación de carbono equivalente que se combina fácilmente con el hierro y el azufre. Este elemento disminuye la temperatura de transformación eutectoide de la austenita, aumenta el intervalo de la austenita y disminuye la concentración de carbono en la transformación eutectoide y en la transformación eutéctica; un 1 % de manganeso disminuye la concentración de carbono en 0,06 %–0,07 %, pero aumenta la temperatura de transformación eutéctica en 3 °C aproximadamente (Aristizábal et al., 2009).

Níquel (Ni):

- Propósito: Se realiza para aumentar la tenacidad, la resistencia a la corrosión y la resistencia a bajas temperaturas del acero.
- Efectos: Tiene la capacidad de formar una solución sólida con el hierro, lo que mejora la ductilidad y la resistencia al impacto del acero. También contribuye a la resistencia a la corrosión (Far et al., 2019).

Cobre (Cu):

- Propósito: Se utiliza principalmente para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión.
- Efectos: favorece la formación de soluciones sólidas y forma óxidos y sulfuros que actúan como barrera contra la degradación del acero (Far et al., 2019).

Cromo (Cr):

- Propósito: El cromo se utiliza principalmente para mejorar la resistencia a la corrosión y la oxidación del acero.
- Efectos: Forma óxidos protectores en la superficie del acero, proporcionando una barrera contra la corrosión. También aumenta la resistencia a altas temperaturas y mejora la dureza

Existen miles de tipos de aceros incluidos en distintas normativas; a continuación, y a modo de ejemplo, se presentan tres, según norma AISI (*American Iron and Steel Institute*).

- **Aceros al Carbono con manganeso (AISI 1045):** Contiene alrededor de 0,45% de carbono y 0,60-0,90% de manganeso. Se utiliza en componentes estructurales y de maquinaria debido a su resistencia y tenacidad.
- **Aceros Inoxidables Austeníticos (AISI 316):** Contiene aproximadamente 16-18% de cromo, 10-14% de níquel y 2-3% de molibdeno. Conocido por su resistencia a la corrosión y utilizado en aplicaciones marinas y químicas.
- **Aceros de Herramientas al cromo (AISI D2):** Contiene alrededor de 12% de cromo y pequeñas cantidades de vanadio y molibdeno. Utilizado en herramientas de corte debido a su alta resistencia al desgaste y dureza.

La soldabilidad del acero es un aspecto crítico en la construcción naval, y la presencia de elementos puede influir en este aspecto. Añadir manganeso favorece la formación de sulfuros, hecho penalizable en cuanto a propiedades, pero mejora sustancialmente la soldabilidad. El equivalente de carbono (CE; *Carbon Equivalent*) es una ecuación que permite evaluar el efecto que tienen todos los elementos de aleación en la soldabilidad del acero. Existen dos ecuaciones de uso común para expresar el CE; Instituto Internacional de Soldadura (IIW) y *American Welding Society* (AWS).

$$CE_{IIW} = C + Mn / 6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Cu + Ni) / 15 \quad (3)$$

$$CE_{AWS} = C + (Mn + Si / 6) + (Cr + Mo + V) / 5 + (Cu + Ni) / 15 \quad (4)$$

CE AISI 1045 suponiendo 0,43% C y 0,75% Mn → 0,55 este valor se corresponde con una soldabilidad muy pobre según la Figura 21.

Common CE Value Classifications	
Carbon Equivalent (CE)	Weldability
Up to 0.35	Excellent
0.36-0.40	Very Good
0.41-0.45	Good
0.46-0.50	Fair
Over 0.50	Poor

Figura 21: Soldabilidad de los aceros en función del CE (thermofisher.com)

El níquel, al estabilizar la austenita, puede afectar positivamente la resistencia al agrietamiento durante la soldadura.

Dependiendo de la aplicación específica en la construcción naval, la aleación puede ser ajustada. Por ejemplo, en áreas que requieren una alta resistencia a la corrosión, se puede aumentar la proporción de cromo para mejorar la resistencia a la oxidación y la corrosión marina (Du et al., 2018; Matmatch; S.-J. Kim et al., 2016).

2.1.2.5. *Tratamientos térmicos y termoquímicos*

Recocido:

El recocido es un proceso térmico utilizado para mejorar las propiedades mecánicas del acero. Consiste en calentar gradualmente el material a una temperatura crítica, generalmente entre 600 °C y 900 °C, y mantenerlo a esa temperatura durante un tiempo específico antes de un enfriamiento lento controlado. Este proceso elimina tensiones internas, mejora la maquinabilidad y suaviza la microestructura del acero. La maleabilidad resultante facilita el conformado y la manipulación durante la fabricación de componentes navales.

Normalizado:

Similar al recocido, el normalizado implica calentar el acero a una temperatura crítica, que suele oscilar entre 800 °C y 950 °C, pero se diferencia en que se enfría al aire libre. Este método promueve una estructura más uniforme en todo el material y reduce las tensiones internas. El normalizado mejora la resistencia y la tenacidad del acero, proporcionando propiedades mecánicas equilibradas, esenciales en aplicaciones navales donde la integridad estructural es prioritaria.

Templado:

Después de la formación inicial, el acero se enfría rápidamente desde una temperatura elevada mediante un proceso conocido como templado. Este proceso tiene como objetivo aumentar la dureza del acero al favorecer la formación de una estructura cristalina más densa y resistente llamada martensita. El templado implica calentar el acero a una temperatura crítica (generalmente por encima de 800 °C) y luego enfriarlo rápidamente. La formación de martensita ocurre durante este proceso, proporcionando dureza al acero.

Revenido:

La martensita resultante del templado es extremadamente dura pero también frágil. Para mejorar la tenacidad y reducir la fragilidad, el acero se somete a un proceso de revenido. En este proceso, el acero se calienta a una temperatura inferior a la del templado y luego se enfría lentamente (generalmente entre 150 °C y 600 °C). Esto permite que se formen estructuras más equilibradas, como la ferrita y la perlita, que mejoran la tenacidad del acero.

Cementación:

La cementación busca aumentar la dureza superficial del acero. Implica calentar el acero a temperaturas entre 850 °C y 950 °C en presencia de una atmósfera rica en

carbono, como polvo de carbón. Este proceso introduce carbono en la capa superficial, formando una capa endurecida, tras tratamiento térmico. La cementación es beneficiosa para resistir la abrasión causada por partículas en suspensión en el agua y mejorar la durabilidad en aplicaciones marítimas, pues se crean microestructuras diferentes de la capa externa, corteza, a la capa interna, núcleo.

En la Figura 22 se muestra una representación gráfica de los distintos tratamientos térmicos. Hay que destacar en la figura que el revenido solo puede partir de la microestructura previa obtenida por temple.

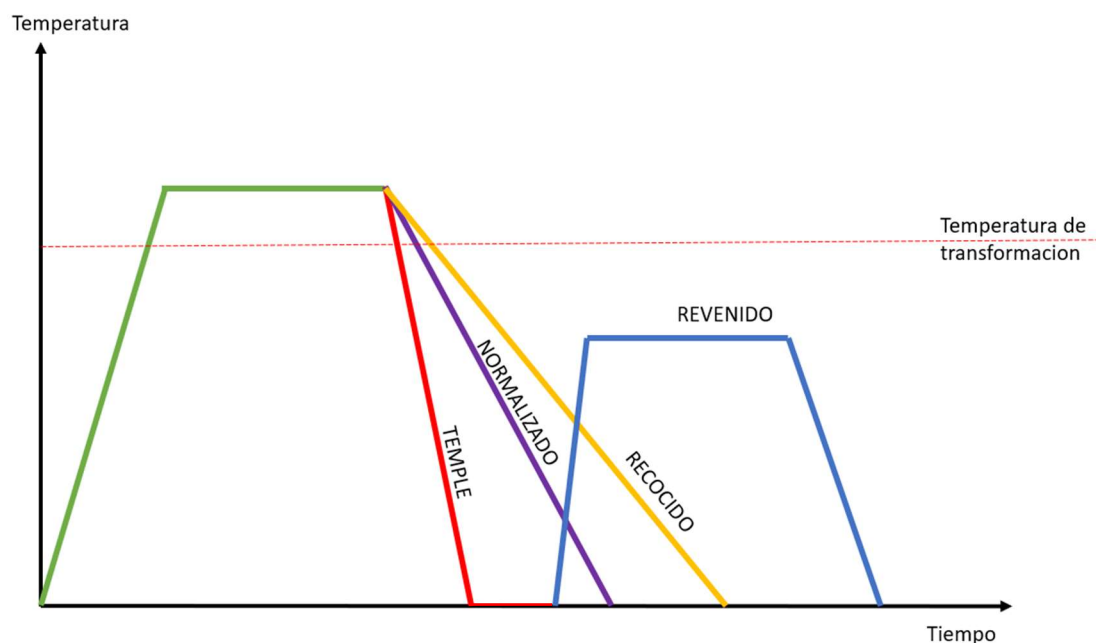


Figura 22: Esquema representativo de los tratamientos térmicos (Autor)

Nitruración:

La nitruración tiene como objetivo incrementar la dureza superficial del acero mediante la introducción de nitrógeno. El acero se expone al nitrógeno gaseoso o ambiente amoniacal, a temperaturas elevadas, generalmente entre 500 °C y 600 °C, formando compuestos duros en la superficie, generalmente nitruros de hierro y elementos de aleación. Este proceso mejora la resistencia al desgaste y la fatiga superficial, haciéndolo más resistente a condiciones marítimas severas como la exposición constante al agua salada (Apraiz Barreiro, 1985; worldsteel.org; Espín et al., 2023).



Figura 23: Material cementado (Autor)

En la Figura 23 se puede observar una representación esquemática de un material cementado, donde en su cara externa (dcha) tiene una microestructura martensítica y al acercarnos al interior (izda) y variar el porcentaje de carbono, la microestructura es de ferrita y perlita.

2.1.2.6. Estructuras cristalinas del acero y sus propiedades

Ferrita:

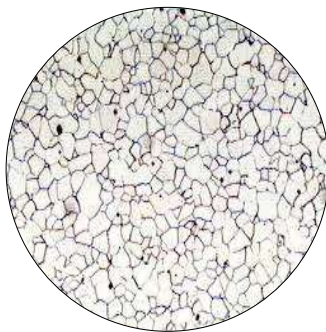


Figura 24: Microestructura de la ferrita
(soldadurayestructuras.com)

La ferrita o hierro α es prácticamente hierro en su totalidad salvo alguna impureza. En los aceros aleados suelen formar una solución sólida con la ferrita el níquel, manganeso, cobre, silicio... (Figura 24)

Cristaliza con el sistema cúbico de cuerpo centrado y aproximadamente tiene una resistencia de 28kg/mm^2 , un 35% de alargamiento y una dureza Brinell de 90. De todos los constituyentes del acero es el más blando y maleable. (Apraiz Barreiro, 1985) Puede aparecer en los aceros bajo las siguientes formas:

- 1) Como elemento proeutectoide (Cristalización Widmanstätten) que acompaña a la perlita, en cuyo caso puede presentarse de tres maneras distintas:
 - I. Como cristales mezclados con los de perlita en aceros con menos de 0,55% de C.

- II. Como una red que delimita los granos de perlita en aceros de 0,55 a 0,85% de C.
 - III. En forma de agujas con la orientación de los planos de la austenita.
- 2) Aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas intercaladas con otras de cementita.
 - 3) En la estructura propia de los aceros para herramientas (globular) se encuentra rodeando los glóbulos de cementita.
 - 4) Puede aparecer en aceros hipoeutectoides templados (al darse situaciones como un tiempo de calentamiento insuficiente o interrupciones en el enfriamiento entre otros) mezclada con martensita u otros elementos de transición

Perlita:



Figura 25: Microestructura de la perlita (Derematerialia)

Se trata de un constituyente eutectoide formado por capas de ferrita y cementita. Tiene una composición química constante. Su resistencia es de unos 80 Kg/mm² y su alargamiento de 15% aprox. Aparece generalmente con el enfriamiento lento de la austenita. (Figura 25) Los reflejos nacarados que obtiene debido a la alternancia entre las láminas de ferrita y cementita son lo que le otorgaron el nombre. La distancia interlaminar en la perlita sirve para clasificarla:

Perlita gruesa, obtenida con un enfriamiento muy lento en el horno, con una separación interlaminar de 400μ y una dureza Brinell de 200.

Perlita normal, que tiene 350μ de separación y 220 de dureza Brinell.

Perlita fina, obtenida al enfriar al aire o dentro de un horno de manera rápida, con una separación de 250μ y 300 de dureza Brinell.

Cada grupo de láminas paralelas constituye un cristal de perlita y a pesar de que en aceros próximos a la constitución eutectoide el contorno de los cristales no está bien definido, se pueden conocer los límites de los cristales, sabiendo que dentro de cada uno todas las láminas serán paralelas. (Apraiz Barreiro, 1985)

Martensita:

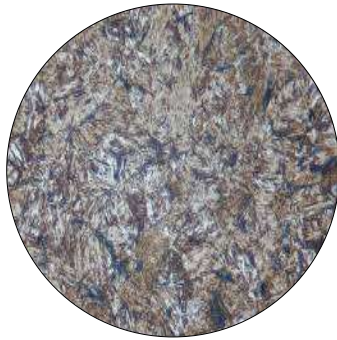


Figura 26: Microestructura de la martensita (derematerialia.com)

Es el constituyente principal de los aceros templados, obtenida por un enfriamiento muy rápido desde una alta temperatura. (Figura 26) Su contenido de carbono varía, desde trazas pequeñas hasta un 1% a veces más si se trata de un acero hipereutectoide. Esto es relevante debido a que su dureza, resistencia y fragilidad aumentan junto al contenido de carbono, llegando a un máximo alrededor del 0,9% de C. tiene una resistencia de 170 a 250 Kg/mm², una dureza de 50 a 68 Rockwell y alargamiento de 2,5 a 0,5%. Forma agujas en zigzag con ángulos de 60°. Cristaliza en el sistema tetragonal, y su estructura elemental está formada por un paralelepípedo que difiere muy poco del cubo de cuerpo centrado. A todos los constituyentes obtenidos tras el revenido de la martensita se les conoce como martensita revenida. Antes se pensaba que al recalentarla a 400° se obtenía troostita y si se seguía hasta los 600° sorbita (Apraiz Barreiro, 1985).

Austenita:

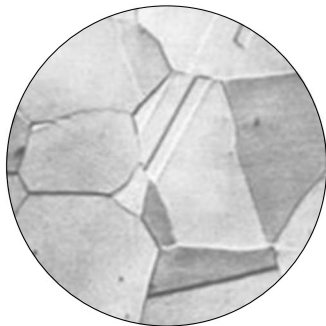


Figura 27: Microestructura de la austenita (surcosistemas.com)

Se trata de una solución sólida de C o carburo de hierro en hierro gamma. (Figura 27) Puede contener carbono en cantidades que varían del 0 hasta el 1,7%, lo que lo convierte en un constituyente de composición variable. Todos los aceros están formados por cristales de austenita cuando se calientan a temperaturas superiores a la crítica. Aunque generalmente es inestable, se puede obtener esta estructura a temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros con alto contenido en carbono o muy poca aleación.

Tiene una resistencia de 88 a 105 Kg/mm² aprox y su dureza es de 300 Brinell, con un alargamiento de 30-60%. Es muy dúctil y tenaz, tiene gran resistencia al desgaste y es el constituyente más denso de los aceros. Aparece frecuentemente en cantidades muy pequeñas y casi siempre mezclada con martensita en aceros muy aleados enfriados rápidamente (Apraiz Barreiro, 1985).

Cementita:

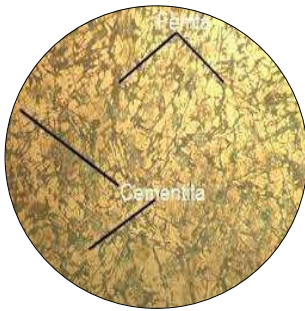


Figura 28: Microestructura de la cementita (researchGate)

Es carburo de hierro CFe_3 contiene un 6,67% de C y un 93,33% de hierro. Es el más duro y frágil de los constituyentes del acero, tiene una dureza superior a los 68 Rockwell. (Figura 28) Es magnética a temperatura ambiente, pero pierde ese magnetismo a 218°C. Puede aparecer de las siguientes formas:

- 1) Cementita proeutectoide en aceros de más de 0,9% C envolviendo los granos de perlita.
- 2) Formando parte de la perlita, en este caso se le llama cementita eutectoide y se posiciona intercalada con láminas de ferrita (paralelas).
- 3) Cementita globular, dispersa por una matriz de ferrita cuando aceros de entre 0,9% y 1,4% C han sufrido un recocido próximos a 721°C
- 4) En aceros hipereutectoides templados, cuando el tiempo de calentamiento no ha sido suficiente aparece rodeada de martensita u otros constituyentes
- 5) Como cementita terciaria en las uniones de granos de bajo contenido en C (<0,25%), en los de contenido en carbono superior a este se confunde con la eutectoide.

Es crucial en la formación de la perlita, y su presencia impacta directamente en las propiedades mecánicas de la estructura resultante (Apraiz Barreiro, 1985).

Bainita:



Figura 29: Microestructura de la bainita (mecanica242)

La bainita se forma a partir de la austenita, se forma cuando la temperatura del baño de enfriamiento se encuentra entre 250 y 600°C aprox. Se diferencia en dos estructuras, Bainita superior, formada a 500-550°C y Bainita inferior, que se forma a una temperatura más baja 250-400°C.

La Bainita superior está formada por una matriz de ferrita que contiene carburos, teniendo estos carburos normalmente una orientación paralela a la bainita. (Figura 29)

La bainita inferior está formada por agujas alargadas de ferrita que contienen placas de carburos, paralelas entre sí y formando un ángulo de 60° respecto a la ferrita (Apraiz Barreiro, 1985).

Estas estructuras cristalinas, o microestructuras del acero ofrecen propiedades particulares aptas para las diversas aplicaciones en la construcción naval. La selección de la estructura adecuada depende de los requisitos específicos de resistencia,

tenacidad y otras propiedades mecánicas para el diseño y construcción eficiente de embarcaciones. Cabe reseñar que las temperaturas mencionadas en cada fase del acero son temperaturas de formación correspondientes a un acero eutectoide, no a un acero de construcción naval.

Estos avances en la metalurgia del acero han sido esenciales para adaptar este material a las demandas cambiantes de la construcción naval y otras industrias, mejorando su rendimiento y permitiendo el diseño de estructuras más eficientes y seguras. La investigación continua en estos campos contribuye a la mejora constante de los materiales utilizados en la construcción naval y otras aplicaciones ingenieriles (*Apraiz Barreiro, 1985*).

En el último siglo, el acero ha sido ampliamente utilizado debido a su versatilidad y propiedades mecánicas ajustables. Propiedades como la ductilidad, dureza, resistencia, maleabilidad y tenacidad son esenciales y se determinan mediante pruebas de ensayos destructivos como tracción, dureza e impacto. A continuación, se presentan estas propiedades y los ensayos mediante los que se pueden obtener.

Ductilidad: Es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin romperse. En la construcción naval, es esencial que el acero sea lo suficientemente dúctil para resistir tensiones y deformaciones durante la navegación. Se evalúa comúnmente mediante la prueba de tracción, donde se aplica una carga gradual al material hasta que se rompe. La elongación y la reducción de área después de la fractura son indicadores de la ductilidad (*Ensayo de Tracción*).

Dureza: La dureza se refiere a la resistencia de un material a la penetración o abrasión. Se mide mediante pruebas de dureza, como la escala Brinell, la escala Vickers o la escala Rockwell, donde se aplica una carga específica en un indentador y se mide la profundidad de penetración (*Ensayos de dureza | Struers.com*).

Resistencia: La resistencia mecánica es crucial para soportar cargas y tensiones. La prueba de tracción también se utiliza para medir la resistencia. El límite elástico y el límite de ruptura son parámetros importantes en este contexto (*Ensayo de Tracción; Testing Machines and Testing Systems for Metals*).

Maleabilidad: La maleabilidad se relaciona con la capacidad de un material para deformarse sin romperse bajo presión. La maleabilidad se evalúa observando la deformación plástica que experimenta el material antes de romperse en la prueba de tracción (*Ensayo de Tracción*).

Tenacidad: La tenacidad combina la resistencia y la ductilidad, siendo la capacidad de un material para absorber energía antes de romperse. La prueba de impacto Charpy es comúnmente utilizada para medir la tenacidad, evaluando la energía absorbida por una muestra al romperse por impacto (*ZwickRoell*).

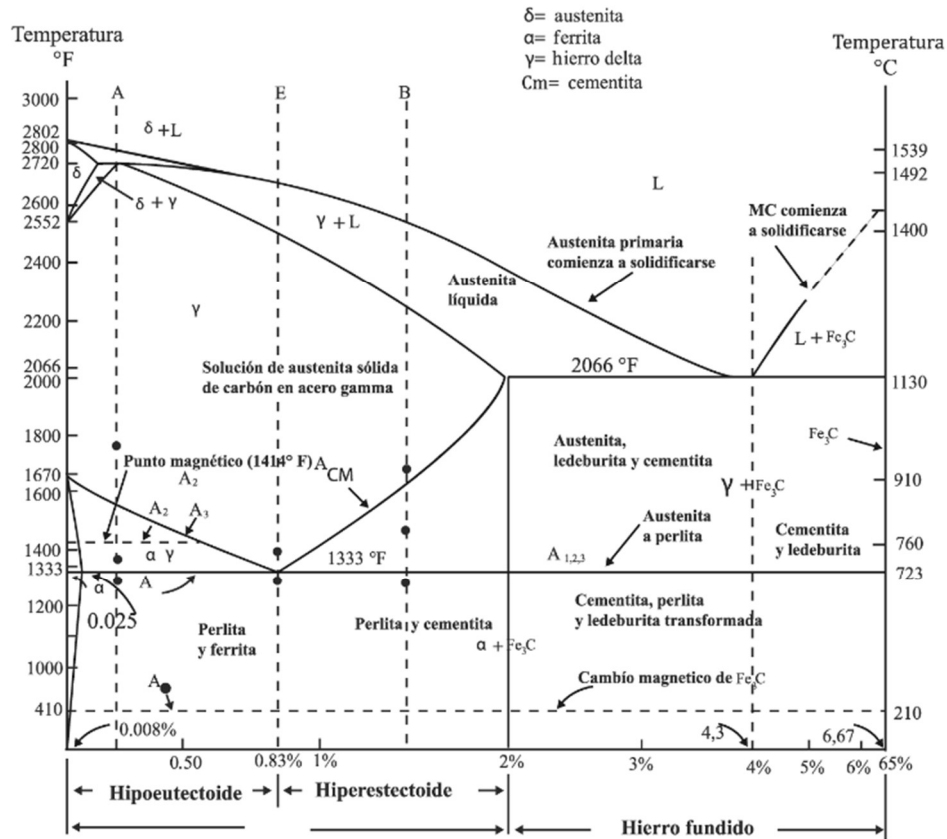


Figura 30: Diagrama parcial hierro-carbono (University of Cambridge)

2.1.2.7. Clasificación de los aceros

La clasificación de los aceros es compleja y puede basarse en la composición química, aplicación o resistencia. Y aún más complejo es establecer las equivalencias entre las distintas denominaciones que se otorga a cada tipo de acero según el organismo que lo haya clasificado. En España, la norma UNE-EN 10020:2001 regula la clasificación de los aceros, pero también hay normas internacionales, como las americanas AISI y ASTM.

En el ámbito internacional, las normas americanas AISI y ASTM (*American Society for Testing and Materials*) desempeñan un papel crucial en la especificación y clasificación de los materiales. Destaca también el uso de la UNS (*Unified numbering*

system), donde cada número UNS se refiere a un metal o aleación específicos (Askeland et al., 1998).

En las próximas páginas se presentan normas y organizaciones como la UNE-EN 10020:2001, AISI y ASTM.

UNE-EN 10020:2001:

Esta norma española establece los conceptos y definiciones para la clasificación de los aceros según su composición química y propiedades mecánicas. Define términos como acero no aleado, acero aleado, acero de baja aleación, entre otros, proporcionando una base común para la identificación y descripción de los aceros.

- **Aceros al carbono (no aleados):** La norma denomina así a aquellos que contienen carbono y elementos residuales como manganeso, fósforo, silicio y azufre, en cantidades consideradas como normales. La norma incluye la tabla representada en la Figura 31 donde se indica la cantidad máxima de cada elemento para ser considerada una cantidad normal.
- **Aceros aleados de baja aleación:** Son aquellos en los que se encuentran presentes nuevos elementos aleantes, que no sobrepasan las cantidades totales determinadas en la tabla. Además, la totalidad de elementos aleantes deberá ser menor al 5% de manera que no alteren la microestructura del acero resultante.
AISI 4130 → aprox 0,28%C, 0,8%Mn, 0,2%Si, 0,85%Cr, 0,15%Mo
- **Aceros aleados de media aleación:** Su porcentaje de Mn varía entre 1,20% y 1,65% según el %C
- **Aceros aleados de alta aleación:** En este tipo de aceros las cantidades de elementos aleantes se encuentran dentro de los valores definidos por la tabla. En este caso hallándose en una proporción tal capaz de alterar completamente la microestructura y obligando a la modificación de los tratamientos térmicos. (elementos aleantes >5%)
AISI D2 → aprox 12%Cr
- **Aceros inoxidables:** Aquellos que contienen como mínimo un 10,5% de cromo y un máximo de 0,12% en carbono.
AISI 316 → Contiene aproximadamente 16-18% de cromo, 10-14% de níquel y 2-3% de molibdeno.

Elemento especificado		Contenido límite % en masa
Al	Aluminio	0,30
B	Boro	0,0008
Bi	Bismuto	0,10
Co	Cobalto	0,30
Cr	Cromo	0,30
Cu	Cobre	0,40
La	Lantánidos (considerados individualmente)	0,10
Mn	Manganeso	1,65 ^{a)}
Mo	Molibdeno	0,08
Nb	Niobio	0,06
Ni	Níquel	0,30
Pb	Plomo	0,40
Se	Selenio	0,10
Si	Silicio	0,60
Te	Telurio	0,10
Ti	Titanio	0,05
V	Vanadio	0,10
W	Wolframio	0,30
Zr	Circonio	0,05
Otros, excepto: Carbono, Fósforo, Azufre, Nitrógeno (cada uno individualmente)		0,10
a) Cuando el manganeso está definido sólo por un máximo, el valor límite es 1,80% y la regla del 70% (véase el apartado 3.1.2) no se aplica.		

Figura 31: Delimitación de las clases de acero (UNE-EN 10020:2001)

La norma incluye otro tipo de clasificaciones, atendiendo a la aplicación a la que se les va a destinar (*The Engineering ToolBox*; *American Iron and Steel Institute*; *UNE-EN 10020:2001*).

AISI:

La AISI es una organización estadounidense que desarrolla y mantiene estándares para la industria del acero en los Estados Unidos. Su sistema de clasificación de aceros, conocido como AISI/SAE, se basa principalmente en la composición química del acero. Por ejemplo: el AISI 304 corresponde a un acero inoxidable austenítico con una composición específica. (AISI, 2023) A continuación, se detallan los porcentajes máximos de elementos aleantes que posee el acero AISI 304: carbono (C)[0,08], manganeso (Mn)[2,00], fósforo (P)[0,04], azufre (S)[0,03], silicio (Si)[0,75], cromo (Cr)[18-20], níquel (Ni)[8-11].

ASTM:

ASTM es una organización internacional que desarrolla y publica normas técnicas para diversos materiales, incluidos los aceros. Sus estándares cubren una amplia gama de

propiedades y aplicaciones. Los aceros ASTM se identifican mediante designaciones numéricas y letras que indican sus propiedades. Por ejemplo: ASTM A36 es una especificación para acero estructural. Su composición química en porcentajes es de carbono(C)[25], manganeso(Mn)[0.08], fósforo(P)[0.04], azufre(S)[0.05], silicio(Si)[0.40], cobre (Cu) [>0.2].

La adopción de normas internacionales como AISI y ASTM es común en la industria global, ya que facilita la comunicación y el comercio entre diferentes países y fabricantes. La elección de la norma a seguir a menudo depende de la región, las aplicaciones específicas y las preferencias del fabricante, siendo la clasificación ASTM la más utilizada dentro del entorno naval.

En el contexto de la construcción naval en España, es posible que se utilicen múltiples normas para garantizar la conformidad con los estándares nacionales e internacionales, asegurando así la calidad y seguridad de las estructuras marítimas construidas con estos materiales (Marco et al).

La identificación de los aceros de construcción naval se realiza mediante letras como A, B, C, D, E, o con pares de letras como AH, DH, EH, seguidos de números que indican su pertenencia a distintos subgrupos.

A: Es un acero dulce normal, aceptable hasta un espesor de 12,7mm

B: Es similar al A, un poco más resistente a la formación de grietas, aceptable hasta un espesor de 25,4mm

C, D, E: Más tenaces que los anteriores y más resistentes a la formación de grietas. La calidad E es la más resistente de las tres y la C la que menos.

Los aceros que poseen alta resistencia a la tracción son clasificados añadiendo la letra H a las siglas anteriores.

Resistencia ordinaria: Carga de rotura comprendida entre 400 y 490 N/mm²

Aceros de alta resistencia:

- Carga de rotura entre 440 y 590 N/mm² y carga de fluencia no inferior a 315 N/mm².
- Carga de rotura comprendida entre 490 y 620 N/mm² y carga de fluencia no inferior a 335 N/mm².

La composición química de los aceros de alta resistencia para la construcción naval puede ser considerada como la de aceros no aleados o de baja aleación. Si contienen Nb, Ti, V, Al, Ta, Zr en pequeñas proporciones y elementos generadores de carburos y

nitruros, siempre que el conjunto total no exceda el 0,15%, se consideran aceros microaleados dividiéndose en dos grupos:

Aceros perlíticos: Se usan sin tratamiento térmico y su carga de fluencia en las condiciones de normalizado o laminado en caliente está comprendida entre 75 y 350 N/mm²

Aceros bonificados o envejecidos: que presentan en estos estados cargas de fluencia comprendidas entre 375 y 1030 N/mm² (*El acero en la industria de la construcción naval*; UnionStahl; Villa Caro, 2016).

2.1.2.8. Comparativa de equivalencias de aceros entre distintas sociedades de clasificación

La Tabla 3: Equivalencias de aceros entre distintas sociedades de clasificación (Caro 2016) recoge distintos tipos de acero naval y las denominaciones que usa cada tipo de sociedad clasificadora para nombrarlos.

	ABS	BV	DNV-GL	RINA	LLOYD'S
NAVAL A	AB/A	BV-A	VL-A	Grade A	LR-A
NAVAL B	AB/B	BV-B	VL-B	Grade B	LR-B
NAVAL D	AB/D	BV-D	VL-D	Grade D	LR-D
NAVAL E	AB/E	BV-E	VL-E	Grade E	LR-E
AH-27	—	—	—	—	LR-AH27S
DH-27	—	—	—	—	LR-DH27S
EH-27	—	—	—	—	LR-EH27S
AH-32	AB/AH32	BV-AH32	VL-A32	AH32	LR-AH32
DH-32	AB/DH32	BV-DH32	VL-D32	DH32	LR-DH32
EH-32	AB/EH32	BV-EH32	VL-E32	EH32	LR-EH32
FH-32	AB/FH32	BV-FH32	VL-F32	—	LR-FH32
AH-36	AB/AH36	BV-AH36	VL-A36	AH36	LR-AH36
DH-36	AB/DH36	BV-DH36	VL-D36	DH36	LR-DH36
EH-36	AB/EH36	BV-EH36	VL-E36	EH36	LR-EH36
FH-36	AB/FH36	BV-FH36	VL-F36	—	LR-FH36
AH-40	AB/AH40	BV-AH40	VL-A40	—	LR-AH40
DH-40	AB/DH40	BV-DH40	VL-D40	—	LR-DH40
EH-40	AB/EH40	BV-EH40	VL-E40	—	LR-EH40
FH-40	AB/FH40	BV-FH40	VL-F40	—	LR-FH40

Tabla 3: Equivalencias de aceros entre distintas sociedades de clasificación (Caro 2016)

2.1.2.9. Análisis químico de los aceros

La Tabla 4 establece las cantidades de elementos aleantes en porcentaje que debe tener un acero para poder ser incluido en cada denominación.

	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ni (%)
NAVAL A	≤ 0,21	≥ 2,5*C _{min}	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	—	≤ 0,30	≤ 0,20	0,40
NAVAL B	≤ 0,21	≥ 0,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,35	—	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,40
NAVAL D	≤ 0,21	≥ 0,60	≤ 0,035	≤ 0,035	0,10 - 0,35	≥ 0,020	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,40
NAVAL E	≤ 0,18	≥ 0,70	≤ 0,035	≤ 0,035	0,10 - 0,35	≥ 0,020	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,40
AH-27	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
DH-27	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
EH-27	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
AH-32	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
DH-32	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
EH-32	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
FH-32	≤ 0,16	0,9 - 1,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
AH-36	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
DH-36	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
EH-36	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
FH-36	≤ 0,16	0,9 - 1,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
AH-40	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
DH-40	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
EH-40	≤ 0,18	0,9 - 1,60	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40
FH-40	≤ 0,16	0,9 - 1,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,50	≥ 0,020	≤ 0,35	≤ 0,20	≤ 0,40

Tabla 4: Composición química de los aceros (Caro 2016)

2.1.3. Ejemplos de innovaciones tecnológicas en la industria del acero aplicadas a la construcción naval.

La industria del acero en la construcción naval ha experimentado significativas innovaciones tecnológicas en las últimas décadas, impulsadas por la mejora de la eficiencia, la resistencia y la sostenibilidad en los buques.

La aplicación de tecnologías de fabricación avanzadas, como los procesos de soldadura avanzados (son técnicas especializadas que van más allá de los métodos convencionales de unión de materiales) y la impresión 3D de componentes metálicos, ha transformado los métodos tradicionales de construcción naval. Estas técnicas permiten una mayor precisión en la fabricación, reducen los tiempos de producción y minimizan los desperdicios, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental. En paralelo, se han desarrollado recubrimientos protectores para el acero naval, mejorando la resistencia a la corrosión y prolongando la vida útil de los buques.

2.1.3.1. Corte y conformado

En el ámbito de la construcción naval, los procesos de corte y formado son elementos cruciales que impactan directamente en la eficiencia y la calidad de las estructuras de acero y materiales compuestos. Estos procedimientos han experimentado notables avances a lo largo del tiempo, contribuyendo significativamente a la evolución de la construcción naval.

En cuanto al corte, uno de los métodos más destacados es la tecnología de corte por láser. Este proceso utiliza haces de luz altamente concentrados para realizar cortes precisos y limpios en placas de acero. La ventaja clave de esta técnica radica en su capacidad para manejar materiales de diversas densidades y espesores, permitiendo una mayor flexibilidad en el diseño y optimización de las estructuras.

Otro enfoque relevante es el corte por chorro de agua, que utiliza un flujo continuo de agua a alta presión mezclado con abrasivos. Esta técnica es especialmente valiosa para materiales compuestos y aceros de alta resistencia, donde la generación mínima de calor evita deformaciones no deseadas. La versatilidad de este método lo convierte en una opción preferida para la industria naval moderna (*TWI; Laser Cutting: Steel and Aluminum*).

En lo que respecta al formado, la utilización de prensas hidráulicas y maquinaria de conformado ha sido fundamental. Estos equipos permiten dar forma a las piezas metálicas con precisión, manteniendo tolerancias ajustadas. La introducción de tecnologías CNC (Control Numérico Computarizado) ha elevado la eficiencia y la consistencia en los procesos de formado, mejorando la calidad y reduciendo los tiempos de producción (Vela Cuadros, 2021).

Es crucial destacar el papel de la robótica en estos procesos. La automatización en las líneas de corte y formado ha llevado a una mayor eficiencia operativa y a una reducción de errores. Los robots pueden realizar tareas repetitivas con una precisión milimétrica, asegurando una calidad constante y reduciendo los riesgos asociados con la manipulación manual en entornos de trabajo exigentes (*Conformado de metales | AMG MetalMecánica*).

2.1.3.2. Automatización y robotización

La automatización y robotización han experimentado avances significativos en las últimas décadas, transformando radicalmente los procesos y contribuyendo a la mejora tanto en eficiencia como en calidad. Estos desarrollos han sido fundamentales para optimizar la producción de embarcaciones, así como para abordar los desafíos asociados con la fabricación de acero y materiales compuestos en este contexto específico.

En la actualidad, diversas tecnologías robóticas se utilizan en la construcción naval para llevar a cabo tareas que van desde la soldadura hasta la instalación de componentes estructurales. La soldadura automatizada, en particular, ha demostrado ser esencial en la mejora de la precisión y consistencia de las uniones, reduciendo al

mismo tiempo el tiempo de producción. Esto es crucial en el ámbito de la construcción naval, donde la resistencia mecánica y la integridad estructural son de vital importancia, cómo se ha comentado previamente (Boekholt, 1996a, 1996b, 1996c).

Un ejemplo lo podemos encontrar en “IHIMU-α” un sistema automatizado para el deformado de chapas (*«IHIMU-α» A Fully Automated Steel Plate Bending System for Shipbuilding*).

La introducción de robots también ha impactado positivamente en la seguridad laboral, ya que tareas peligrosas o repetitivas pueden ser llevadas a cabo por máquinas, reduciendo el riesgo de accidentes y mejorando las condiciones de trabajo. Además, la utilización de robots permite un mayor control sobre los parámetros del proceso de construcción, lo que se traduce en una mayor calidad en los productos finales.

En cuanto a los procesos de fabricación de materiales compuestos, la robotización ha permitido una aplicación más precisa y eficiente de resinas y fibras, contribuyendo a la mejora de las propiedades mecánicas de estos materiales. La capacidad de los robots para trabajar en entornos controlados también ha facilitado la implementación de técnicas avanzadas, como la fabricación de estructuras compuestas más complejas y ligeras (*Naval Architect; Ship Technology*).

Es crucial destacar que la implementación de la automatización y robotización no solo ha afectado los aspectos de producción, sino también la fase de diseño. El uso de tecnologías como la inteligencia artificial y la simulación por computadora ha permitido explorar y evaluar diseños de manera más eficiente, optimizando las estructuras para resistencias específicas y minimizando el desperdicio de materiales (*Navantia 4.0*).

2.1.3.3. Monitorización y tecnologías inteligentes

La aplicación de sistemas de monitorización ha permitido una supervisión en tiempo real de diversas variables cruciales para la integridad estructural y operativa de las embarcaciones.

En primer lugar, cabe destacar la introducción de sensores avanzados que monitorizan constantemente las condiciones estructurales del acero utilizado en la construcción naval. Estos dispositivos proporcionan datos precisos sobre tensiones, deformaciones y otros parámetros mecánicos, permitiendo una evaluación continua de la salud estructural de la embarcación. De este modo, se facilita la detección temprana de posibles fallos o deformaciones no deseadas, lo que contribuye a la prevención de accidentes y alargamiento de la vida útil de la nave (M. Kim et al., 2015).

Además, la implementación de tecnologías inteligentes en los procesos de unión y soldadura ha revolucionado la calidad y eficacia de estas operaciones. Sistemas de soldadura automatizada, respaldados por inteligencia artificial, garantizan una precisión milimétrica en la aplicación de soldaduras, reduciendo la probabilidad de defectos y mejorando la resistencia global de las conexiones. La robotización en la construcción naval ha llevado a una mayor estandarización y consistencia en los procesos de fabricación, optimizando la productividad y minimizando los errores humanos.

En el ámbito de la detección de defectos, la monitorización se ha vuelto esencial. Técnicas avanzadas de inspección, como la inspección ultrasónica y la termografía, son empleadas para identificar posibles imperfecciones en el material, desde microfisuras hasta inclusiones indeseadas. Estas herramientas no solo mejoran la calidad del producto final, sino que también reducen los costos asociados a reparaciones posteriores (Dorafshan et al., 2018; Garrido et al., 2018; Klein et al., 2005).

Como ejemplo podemos nombrar a la empresa “Wavelength-Optoelectronic” fabricantes de productos ópticos incluida la termografía para la inspección en construcción naval (*Wavelength Opto-Electronic*).



Figura 32: Representación de un gemelo digital (DNV-GL)

La convergencia de la monitorización en tiempo real con tecnologías de análisis de big data permite una gestión más eficiente de la información generada. Se pueden identificar patrones y tendencias, facilitando la toma de decisiones informadas en cuanto a mantenimiento preventivo, planificación de operaciones y mejoras en el diseño de futuras embarcaciones (JUNG et al., 2018; Park & Huh, 2022). La empresa “Navantia” se encuentra entre muchas de las que utilizan estas tecnologías (Navantia 4.0).

Uno de los recursos más invaluables dentro de este grupo es el de los gemelos digitales, (Figura 32) son herramientas avanzadas que replican de manera virtual y precisa el comportamiento, la estructura y las funciones de un barco en el mundo real. Estos gemelos digitales son una representación detallada y dinámica que abarca desde el diseño inicial hasta la operación y el mantenimiento continuo de la nave (Iwańkiewicz & Rutkowski, 2023; Mauro & Kana, 2023). En este campo cabe destacar la empresa española “Navantia” (*Navantia 4.0*).

En la fase de diseño, los gemelos digitales permiten a los ingenieros simular y optimizar diferentes configuraciones, materiales y componentes antes de que se construya físicamente el barco. Esto no solo acelera el proceso de diseño, sino que también reduce costos al identificar posibles problemas antes de la construcción real.

Durante la construcción, los gemelos digitales facilitan un seguimiento preciso del progreso, asegurando que la nave se esté construyendo de acuerdo con las especificaciones y estándares establecidos. Además, ofrecen la posibilidad de realizar simulaciones de montaje y pruebas virtuales, mejorando la eficiencia y la calidad del proceso de construcción. Una vez que el barco está en funcionamiento, el gemelo digital continúa siendo invaluable. Permite monitorear el rendimiento en tiempo real, anticipar posibles problemas y optimizar la eficiencia operativa. La información recopilada puede utilizarse para realizar análisis de desempeño, programar mantenimientos preventivos y mejorar la seguridad. En cuanto al acero y los materiales compuestos, los gemelos digitales también ofrecen la capacidad de simular cómo estos materiales se comportarán en diversas condiciones operativas. Esto es esencial para garantizar la durabilidad y la resistencia del barco a lo largo de su vida útil.

Desde la selección y tratamiento de materiales hasta la fabricación y puesta en servicio de las embarcaciones, estas innovaciones contribuyen de manera significativa a la excelencia en la industria, alineándola con los desafíos y expectativas del siglo XXI. Estos avances tecnológicos en la industria del acero aplicados a la construcción naval han llevado a mejoras significativas en la resistencia, durabilidad, eficiencia y seguridad de las embarcaciones. Es importante destacar que la innovación continúa, con investigaciones en nuevos materiales y procesos que prometen seguir transformando la industria (Diaz et al., 2023; Jagusch et al., 2021; Zhong et al., 2023).

A continuación, en el capítulo de los materiales compuestos en la construcción naval, exploraremos cómo esta otra vertiente de la ingeniería marítima promete llevar la eficiencia y la resistencia a niveles aún más altos.

La Figura 33 recoge en un diagrama los avances de los materiales compuestos y su impacto a corto y medio plazo.



Figura 33: Avances e impacto de los materiales compuestos (Autor)

2.1.3.4. *Manufactura aditiva*

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, ha ganado relevancia en diversos campos, incluida la construcción naval. (Calle et al., 2020; Ziółkowski & Dyl, 2020a)

Diseño Personalizado: El diseño personalizado es una faceta crucial de la manufactura aditiva, especialmente en la construcción naval, donde la optimización de las estructuras y componentes es esencial.

La manufactura aditiva permite una libertad de diseño sin precedentes, lo que facilita la implementación de técnicas de optimización topológica de las que se ha hablado previamente. Estas técnicas buscan distribuir material de manera eficiente, eliminando el exceso innecesario y generando estructuras más ligeras y resistentes. Esto junto con la facilidad de adaptación facilita muchas tareas y procesos, ya que: Cada proyecto en la construcción naval puede tener requisitos únicos en términos de resistencia, peso, y funcionalidad, y la manufactura aditiva posibilita la adaptación precisa de cada componente a estos requisitos, evitando el enfoque "talla única" de los métodos de fabricación tradicionales. Esto va de la mano con la creación de estructuras optimizadas en función de las cargas y tensiones específicas a las que estará sometido el componente (requisitos). Esto no solo reduce el peso total de la estructura, sino que también optimiza el uso de materiales, contribuyendo a la eficiencia general del

proyecto. La impresión 3D no está limitada por las restricciones de los procesos tradicionales, lo que permite la creación de diseños orgánicos y geometrías complejas que podrían ser difíciles o imposibles de lograr de otra manera.

Se pueden realizar ajustes y modificaciones con relativa facilidad, lo que acelera el ciclo de desarrollo y permite la mejora continua de los diseños. En esta industria, donde el mantenimiento y la reparación son aspectos críticos, la capacidad de diseñar componentes personalizados para reemplazo rápido es invaluable. La manufactura aditiva permite la producción de piezas específicas de manera eficiente, minimizando el tiempo de inactividad, además, la capacidad de optimizar el uso de materiales contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir el desperdicio y la huella de carbono asociada con la producción y transporte de materiales.

Reducción de Desperdicios: A diferencia de los métodos de fabricación tradicionales, la manufactura aditiva construye objetos capa por capa, reduciendo así los desperdicios de material.

En lugar de los métodos tradicionales de sustracción de material, como el mecanizado, la manufactura aditiva construye objetos capa por capa. Este enfoque significa que solo se utiliza el material necesario para cada capa, reduciendo drásticamente los desperdicios asociados con la producción. La capacidad de imprimir componentes específicos para cada proyecto reduce la necesidad de mantener grandes inventarios de piezas prefabricadas. Además incluye el beneficio de que los polvos o materiales no utilizados pueden ser reciclados y reutilizados en futuras impresiones. Esto reduce aún más la generación de desperdicios y contribuye a prácticas más sostenibles.

En comparación con la fabricación tradicional, que a menudo requiere herramientas y moldes específicos, la manufactura aditiva puede llevarse a cabo con un mínimo de equipo adicional. Así como la capacidad de crear las piezas cuando hacen falta, lo que evita la acumulación de piezas e inventarios. En la fase de desarrollo, la capacidad de imprimir prototipos rápidamente permite ajustes y mejoras continuas antes de la producción a gran escala.

Economías de Escala: A medida que la tecnología avanza, la producción a gran escala de componentes de acero mediante impresión 3D se vuelve más viable, lo que puede llevar a economías de escala y reducción de costos. Las economías de escala se refieren a la reducción de los costos unitarios a medida que la producción aumenta, ya que se vuelve más viable la capacidad de imprimir múltiples componentes simultánea o secuencialmente. En métodos tradicionales de manufactura, la creación de herramientas y moldes específicos para cada componente puede ser costosa, mientras que la impresión 3D elimina esta necesidad, reduciendo los costos iniciales y permitiendo una producción más rentable, especialmente a medida que la cantidad de unidades aumenta.

A diferencia de algunos métodos tradicionales que pueden requerir una cantidad significativa de mano de obra para la fabricación y ensamblaje, la impresión 3D puede

mantener costos laborales relativamente estables. La capacidad de realizar ajustes rápidos en los diseños y componentes con la impresión 3D facilita la mejora continua. Esto puede resultar en una reducción de los costos de mantenimiento a largo plazo, ya que los diseños pueden optimizarse para mayor durabilidad y eficiencia.

Propiedades Materiales: Aunque la manufactura aditiva ha avanzado, aún existen desafíos en la obtención de propiedades mecánicas y de resistencia consistentes en comparación con los métodos tradicionales de fabricación de acero.

La resistencia mecánica del acero es fundamental en la construcción naval. La ductilidad, la capacidad de deformarse sin romperse, y la tenacidad, la resistencia al agrietamiento, son propiedades críticas. La manufactura aditiva puede influir en estas propiedades, y es crucial evaluar cómo afecta la impresión 3D a la capacidad del material para resistir cargas y tensiones. En aplicaciones navales, donde las estructuras están sujetas a condiciones ambientales adversas y cargas repetidas, la durabilidad y la resistencia a la fatiga son también esenciales. Las propiedades del material deben garantizar una vida útil prolongada y un rendimiento confiable a lo largo del tiempo. A esto se suma la necesidad de evaluar la capacidad del material para resistir la corrosión y otros efectos ambientales para garantizar la integridad de las estructuras.

Además de las propiedades finales, también es crucial considerar cómo se comporta el material durante el proceso de impresión. La temperatura de fusión, la viscosidad y otros aspectos relacionados con el proceso afectarán directamente a la calidad de la impresión y las propiedades finales del componente. Asegurarse de que los materiales impresos en 3D cumplan con estas normativas y certificaciones va a ser un aspecto fundamental para la seguridad y la conformidad con los requisitos de la industria.

Tamaño de Componentes: La limitación en el tamaño de los objetos impresos 3D puede ser un desafío. La capacidad para imprimir componentes de gran tamaño puede depender de las limitaciones físicas de la impresora 3D utilizada. Ciertas tecnologías y modelos de impresoras tienen restricciones en términos de dimensiones máximas de impresión. Diferentes tecnologías de impresión 3D tienen capacidades variables en términos de tamaño de impresión. Algunas tecnologías, como la deposición de material fundido o la fabricación por sinterización láser selectiva son más adecuadas para componentes más grandes. En algunos casos, si un componente es demasiado grande para ser impreso en una sola pieza, se puede dividir en segmentos que luego se ensamblan. La investigación y el desarrollo continuo en tecnologías de impresión 3D pueden llevar a innovaciones que superen las limitaciones actuales en el tamaño de los componentes. Esto incluye avances en la velocidad de impresión y la capacidad para imprimir estructuras más grandes y complejas.

2.2. Introducción a los materiales compuestos en la construcción naval

La historia de los materiales compuestos abarca un amplio período de tiempo. Los materiales compuestos, en términos generales, son combinaciones de dos o más materiales con propiedades distintas que, cuando se combinan, crean un nuevo material con características mejoradas.

Aunque no se usaba el término "materiales compuestos" en la antigüedad, los seres humanos ya utilizaban combinaciones de materiales para mejorar las propiedades. Por ejemplo, los egipcios usaban paja para reforzar el barro en la construcción de ladrillos.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de materiales livianos y resistentes llevó al desarrollo de compuestos avanzados. La fibra de vidrio fue uno de los primeros materiales compuestos modernos utilizados en aplicaciones aeroespaciales. Se produjo una explosión en la investigación y aplicación de materiales compuestos, especialmente en la industria aeroespacial y militar. Se desarrollaron resinas epoxi y poliéster reforzadas con fibra de vidrio.

Tras la segunda Guerra Mundial, se realizaron investigaciones y pruebas para evaluar la viabilidad de utilizar materiales compuestos en la construcción de embarcaciones. La fibra de vidrio se convirtió en uno de los primeros materiales compuestos en ser adoptados en aplicaciones navales debido a su peso ligero y resistencia a la corrosión.

Hacia finales del siglo XX se introdujeron nuevos tipos de fibras, como la fibra de carbono y la aramida, Kevlar. Estos materiales ofrecían propiedades mecánicas superiores y eran utilizados en la fabricación de componentes estructurales avanzados. Además de la introducción de estas nuevas fibras, se intensificó la investigación en el uso de estas en combinación con matrices epoxy o resinas termoplásticas. Estos materiales ofrecían una excelente resistencia mecánica y una notable reducción de peso en comparación con los materiales tradicionales.

A partir de 1990 los materiales compuestos se volvieron más comunes en aplicaciones cotidianas, desde la industria del automóvil hasta la construcción naval. Se exploraron nuevas combinaciones de matrices y refuerzos. Se creó una tendencia hacia la construcción de barcos de alta velocidad y yates utilizando materiales compuestos debido a la combinación de resistencia y peso ligero (*Naval Composites*).

Hoy en día, la investigación continúa, con un enfoque creciente en materiales compuestos inteligentes y sostenibles junto con la mejora de la durabilidad, la resistencia a la corrosión y la eficiencia en el diseño. La nanotecnología también ha abierto nuevas posibilidades para mejorar las propiedades de estos materiales.

En el contexto de la construcción naval, los materiales compuestos han encontrado aplicaciones en la fabricación de cascos ligeros y duraderos. La combinación de fibras de alto rendimiento con matrices resistentes ha permitido la construcción de embarcaciones más eficientes y capaces de resistir condiciones ambientales adversas (Norizan et al., 2017).

2.2.1. Componentes aspectos importantes y fabricación de materiales compuestos.

Los materiales compuestos consisten en la combinación de dos o más materiales diferentes para crear un nuevo material que aprovecha las características individuales de cada componente (Figura 34). La idea principal es que las propiedades de los materiales individuales se complementen entre sí, produciendo un material que sea más fuerte, ligero o tenga otras propiedades mejoradas en comparación con los materiales originales (Friedrich & Almajid, 2012).

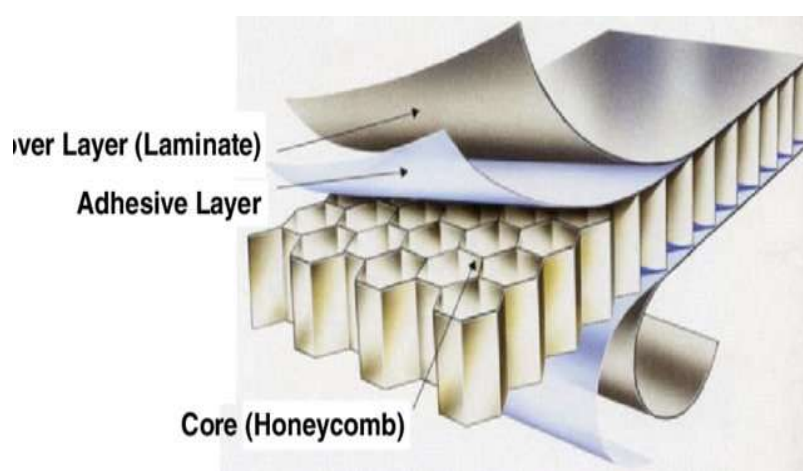


Figura 34: Material compuesto con estructura tipo sándwich (researchgate.net)

2.2.1.1. Componentes

Matriz

La matriz es el componente continuo y que envuelve a los refuerzos. Puede ser un polímero, una resina termoestable (como epoxi o poliéster) o una resina termoplástica. Desempeña un papel fundamental al unir y sostener los refuerzos, proporcionando cohesión y transferencia de carga en toda la estructura. Afecta significativamente a las propiedades finales del material. La elección de la matriz depende de una serie de factores, incluyendo las características mecánicas deseadas, la aplicación específica y las condiciones ambientales en las que se utilizará el material compuesto.

Tipos de matrices:

- **Polímeros termoestables:** Estos polímeros son comúnmente utilizados como matrices en materiales compuestos. Resinas epoxi, poliéster y fenólicas. Estos

polímeros se endurecen irreversiblemente durante el proceso de curado y exhiben una excelente resistencia química y térmica. (Figura 35).

- **Polímeros termoplásticos:** Aunque menos comunes en comparación con los termoestables, los polímeros termoplásticos como el polipropileno y el polietileno también se utilizan como matrices en ciertos materiales compuestos. Estos polímeros se pueden fundir y reformar repetidamente.
- **Metales y cerámicas:** En algunos casos, especialmente en aplicaciones de alta temperatura, se pueden utilizar matrices metálicas o cerámicas. Estos materiales proporcionan resistencia a altas temperaturas y pueden mejorar la estabilidad térmica del material compuesto.



Figura 35: Polímero termoestable, resina de poliéster (navalcomposites.com)

Funciones de la matriz:

- **Transferencia de carga:** La matriz debe ser capaz de transferir eficientemente las cargas aplicadas a lo largo de la estructura. Una adhesión adecuada entre la matriz y los refuerzos es esencial para lograr esta transferencia de carga.
- **Protección del refuerzo:** La matriz protege los refuerzos de daños mecánicos y ambientales. También previene la difusión de la humedad y evita la corrosión del refuerzo.
- **Estabilidad dimensional:** La matriz contribuye a la estabilidad dimensional del material compuesto, ayudando a mantener la forma y las dimensiones de la estructura.
- **Adhesión:** La matriz debe tener buenas propiedades de adhesión tanto al refuerzo como a otras capas de matriz en estructuras laminadas. Esto asegura la integridad estructural del material compuesto.

Selección de la matriz:

La elección de la matriz depende de los requisitos específicos de la aplicación. Las resinas epoxi son conocidas por su resistencia mecánica y adhesión, mientras que las resinas de poliéster pueden ser más económicas y adecuadas para aplicaciones menos exigentes. Para aplicaciones de alta temperatura, se pueden preferir matrices termoplásticas o cerámicas (*Tipos de materiales compuestos*).

La matriz también presenta desafíos, como la posibilidad de agrietamiento o desgaste con el tiempo. La selección y el diseño cuidadosos son esenciales para superar estos

desafíos y garantizar un rendimiento a largo plazo. Tras haber abordado la matriz, se van a estudiar los refuerzos.

Refuerzo.

Los refuerzos en los materiales compuestos son componentes que proporcionan resistencia y mejoran las propiedades mecánicas del material. Pueden tomar diversas formas, pero comúnmente se utilizan en forma de fibras o partículas. Fibras comunes incluyen fibra de vidrio, fibra de carbono o aramida (kevlar), entre otras. La orientación y disposición de las fibras afectan las propiedades finales del material compuesto.

Tipos de refuerzos:

- **Fibras de vidrio:** Las fibras de vidrio son ligeras y resistentes, además de ser económicas. Se utilizan comúnmente en aplicaciones donde se requiere resistencia a la corrosión y una relación resistencia/peso moderada. (Figura 36).
- **Fibras de carbono:** Son conocidas por su excepcional resistencia específica, lo que significa que son muy fuertes en relación con su peso. Se utilizan en aplicaciones donde se busca una alta resistencia y una reducción significativa de peso, como en la construcción de veleros de competición. (Figura 36).
- **Aramidas (kevlar):** Son conocidas por su resistencia a la tracción y su capacidad para absorber energía. Se utilizan en aplicaciones que requieren alta resistencia y resistencia al impacto, como chalecos antibalas y componentes estructurales en la industria aeroespacial. (Figura 36).
- **Fibras de boro y carburo de silicio:** Se utilizan en aplicaciones de alta temperatura y en entornos corrosivos. Estas fibras son más caras, pero ofrecen propiedades excepcionales en condiciones extremas.



Figura 36: De izda. a dcha. fibras de vidrio, carbono y kevlar (navalcomposites.com)

La orientación de las fibras en la matriz es crítica y afecta directamente las propiedades finales del material compuesto. Las fibras pueden estar dispuestas unidireccionalmente, bidireccionalmente o en patrones más complejos, según los requisitos de carga y las propiedades deseadas. La disposición de las fibras también puede influir en la anisotropía (algo anisótropo presenta diferentes cualidades según la dirección en que se examine) del material compuesto, lo que significa que sus

propiedades pueden variar. La Figura 37 representa diferentes orientaciones que puede tener la fibra, unidireccional, bidireccional, al azar o en un patrón complejo.

Las fibras pueden presentarse en forma de tejidos, láminas o haces, y la geometría de estos refuerzos influye en la resistencia y la flexibilidad del material compuesto. Los tejidos pueden ser de diferentes tipos, como tejido de sarga, tela de fibra de carbono..., cada uno con propiedades específicas.

La elección del tipo de refuerzo depende de los requisitos específicos de la aplicación. Se consideran factores como la resistencia necesaria, la rigidez, la resistencia al impacto y la temperatura de servicio. Las fibras de carbono son ideales cuando se busca una alta resistencia y rigidez, mientras que las fibras de vidrio pueden ser más adecuadas para aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es un factor importante.

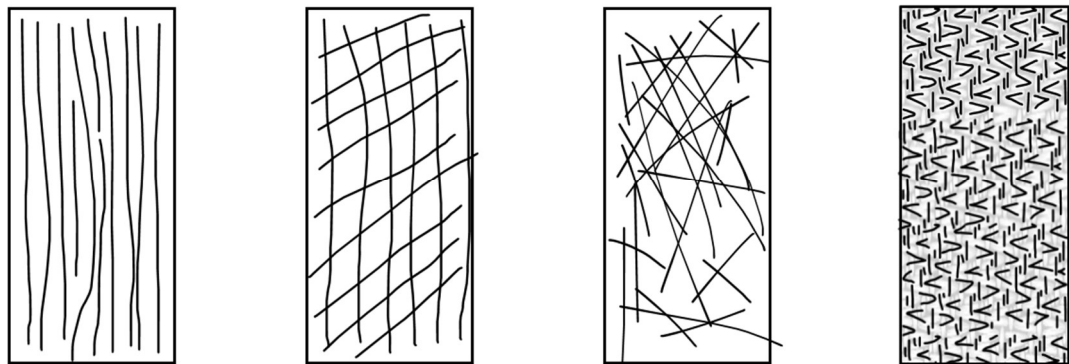


Figura 37: Distintas orientaciones de las fibras (Autor)

Los refuerzos en los materiales compuestos proporcionan las propiedades mecánicas específicas requeridas para una amplia gama de aplicaciones. La combinación de una matriz adecuada con refuerzos específicos permite crear materiales compuestos que cumplen con requisitos de rendimiento muy variados. A continuación, se procederá a comentar la interfase (*Naval Composites*).

Interfase Matriz-Refuerzo

La interfase entre la matriz y el refuerzo es crítica para garantizar una transferencia eficiente de carga y una adhesión adecuada. Tratamientos superficiales y agentes de acoplamiento se utilizan para mejorar la adhesión entre la matriz y el refuerzo. La interfase matriz-refuerzo en materiales compuestos es una región crítica que involucra la conexión entre la matriz y los refuerzos. La calidad de esta interfase tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas y la durabilidad del material compuesto.

A continuación, se ilustra una esquematización de la interfase entre la matriz y el refuerzo (Figura 38).

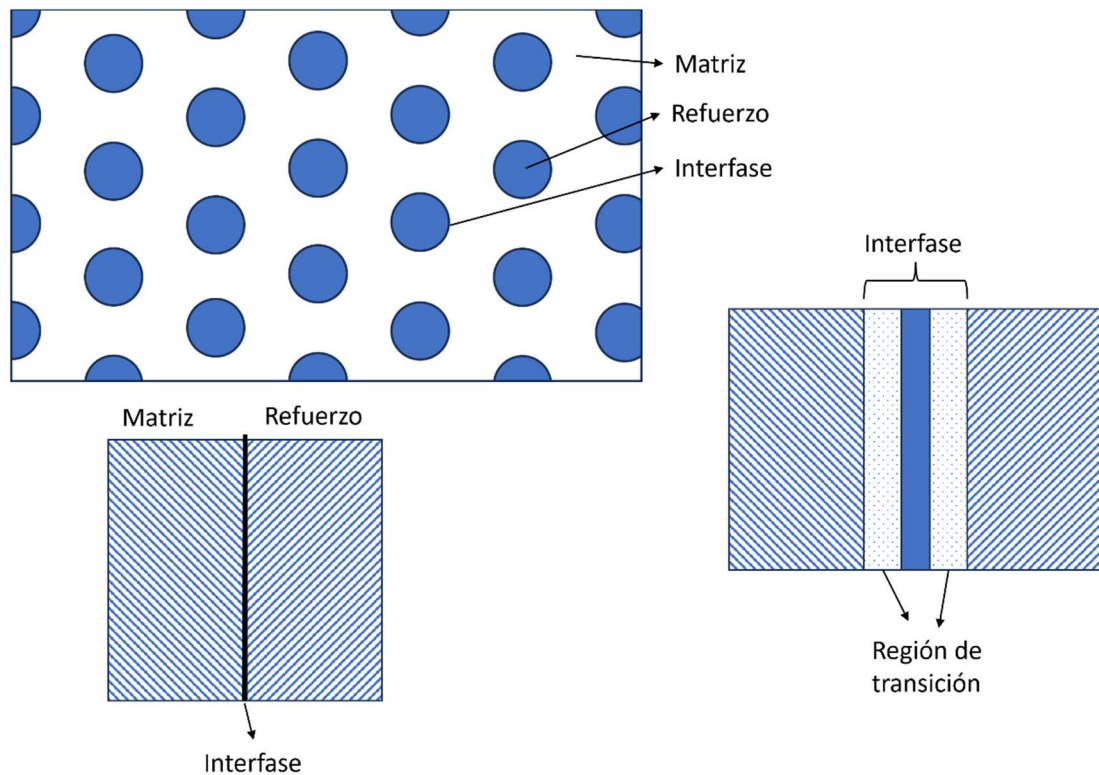


Figura 38: Representación esquemática de la interfase (Autor)

2.2.1.2. Aspectos importantes

Adhesión:

En el ámbito de los materiales compuestos, la conexión (es decir, la conexión que debe realizar la interfase) sólida entre la matriz y los refuerzos es fundamental para lograr una transferencia eficiente de carga. Para fortalecer esta adhesión, se recurre a agentes de acoplamiento o adhesión, que se aplican durante el proceso de fabricación. Estos agentes desempeñan un papel crucial al facilitar una unión química entre la matriz y los refuerzos, asegurando que las cargas aplicadas se distribuyan de manera óptima a través del material compuesto.

Es interesante destacar que los métodos 'multiescala', especialmente aquellos que incorporan nanotubos de carbono y nanopartículas, han demostrado ser especialmente prometedores en comparación con enfoques anteriores, abriendo perspectivas emocionantes para mejoras significativas en aplicaciones prácticas como la construcción naval (Sharma et al., 2014).

En este contexto, la limitación actual de información sobre el impacto de las modificaciones de fibras de carbono en las propiedades interfaciales subraya la necesidad de investigaciones más detalladas. La aplicación de técnicas avanzadas de caracterización, como el mapeo mecánico, eléctrico y térmico basado en microscopía

de fuerza atómica, se presenta como un camino valioso para comprender mejor la naturaleza de las interfaces a escala nanométrica.

Además, la exploración de nuevos métodos de modificación para fibras de carbono sin comprometer su resistencia se perfila como un desafío importante que, si se aborda con éxito, podría abrir nuevas posibilidades en la mejora continua de estos materiales compuestos.

Tratamientos de superficie:

Los refuerzos, especialmente las fibras, a menudo se someten a tratamientos de superficie para mejorar su capacidad de unión con la matriz. Estos tratamientos pueden incluir la aplicación de productos químicos o tratamientos térmicos que modifican la superficie de las fibras y promueven una mejor adhesión.

Delaminación:

La delaminación es un problema potencial en los materiales compuestos donde las capas individuales pueden separarse, comprometiendo la integridad estructural. Una interfaz matriz-refuerzo débil o defectuosa puede contribuir a la delaminación.

Transición de propiedades:

La interfase también es responsable de la transición gradual de propiedades entre la matriz y los refuerzos. Esto es importante para garantizar que no haya discontinuidades bruscas en las propiedades mecánicas, evitando puntos de concentración de esfuerzos. La calidad influirá directamente en las propiedades mecánicas del material compuesto. Una interfase bien diseñada y fuerte puede mejorar la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto etc. Una interfase robusta contribuye a la durabilidad del material compuesto al resistir la propagación de grietas y a la fatiga al soportar cargas cíclicas repetidas.

Problemas potenciales:

Factores como la contaminación durante la fabricación, cambios en la temperatura y la exposición a ambientes agresivos pueden afectar negativamente la interfaz matriz-refuerzo. Esto puede llevar a la degradación del rendimiento a lo largo del tiempo. En el siguiente apartado se comentan las proporciones entre materiales para formar los compuestos y como afecta la orientación de las fibras a los mismos

Proporciones y orientación

Una alta proporción de refuerzo puede aumentar la resistencia, pero también puede hacer que el material sea más frágil. Las proporciones y orientación de los refuerzos en un material compuesto son factores cruciales que afectan directamente sus propiedades mecánicas y su comportamiento en servicio (*ingemecánica*).

Proporciones de refuerzo a matriz:

La cantidad relativa de refuerzo y matriz en un material compuesto influye en sus propiedades finales. En general, una mayor proporción de refuerzo puede aumentar la resistencia y rigidez del material, pero también puede hacerlo más frágil. La elección de la proporción se realiza considerando las características deseadas del material compuesto, como la resistencia específica, la tenacidad y la flexibilidad.

Orientación de los refuerzos:

La orientación de los refuerzos, es decir, la dirección en la que están alineados tiene un impacto significativo en las propiedades anisotrópicas del material compuesto.

- **Orientación unidireccional:** Si las fibras están orientadas principalmente en una dirección, el material tendrá propiedades mecánicas más fuertes en esa dirección específica. Esto es común en aplicaciones donde las cargas son predominantemente unidireccionales.
- **Orientación bidireccional o multidireccional:** La disposición de las fibras en múltiples direcciones proporciona propiedades mecánicas más equilibradas en varias direcciones. Esto es beneficioso en situaciones donde las cargas pueden variar en dirección.
- **Tejidos y patrones de refuerzo:** En algunos casos, se utilizan tejidos o patrones específicos para orientar las fibras en formas particulares. Esto se hace para optimizar las propiedades mecánicas en áreas específicas del material compuesto.
 - Tejido de sarga o tafetán: Estos patrones de tejido pueden proporcionar una combinación de resistencia en múltiples direcciones y son comunes en aplicaciones de construcción.
 - Refuerzo de malla: Utilizado para proporcionar resistencia en ambas direcciones, como en aplicaciones estructurales.

2.2.1.3. Fabricación

Los materiales compuestos se fabrican mediante procesos como la laminación, la inyección, la pultrusión y otros métodos específicos. Durante la fabricación, las capas de refuerzo se combinan con la matriz y se curan para formar la estructura final del material compuesto (Brouwer et al., 2003; Dikshit et al., 2017; Riedel, 2012)

Laminación:

En este proceso, se colocan capas de refuerzo impregnadas con la matriz de manera secuencial y se aplica presión para consolidarlas. Puede ser unidireccional o bidireccional. Las capas se pueden aplicar manualmente y se utiliza rodillos para eliminar burbujas y garantizar la adhesión. O se puede utilizar la laminación asistida por vacío, donde se utiliza un molde cerrado al vacío para eliminar el exceso de resina y mejorar la calidad del producto. (Figura 39)



Figura 39: Laminación manual (navalcomposites.com)

Inyección de resina:

En este proceso la resina y el refuerzo se mezclan y se inyectan en un molde cerrado. Es común en la fabricación de piezas más grandes y complejas, como cascos de veleros.

- RTM (Resin Transfer Molding): La resina se inyecta en el molde que contiene la fibra de refuerzo. (Figura 40)
- SRIM (Structural Reaction Injection Molding): Se utilizan dos componentes de resina que reaccionan entre sí para formar un material compuesto.

Pultrusión:

Los refuerzos, generalmente en forma de fibras continuas, se impregnan con resina y luego se tiran a través de una matriz en una forma continua. La pieza resultante tiene una sección transversal constante. Se utiliza en barras, perfiles estructurales, y piezas con secciones transversales constantes.



Figura 40: Ejemplo de RTM (navalcomposites.com)

Fabricación aditiva:

La fabricación aditiva, como la impresión 3D, se utiliza cada vez más para producir estructuras compuestas de capas sucesivas de refuerzo y matriz. Permite una mayor libertad de diseño y la creación de formas complejas.

A continuación, se proporciona una visión detallada sobre la fabricación aditiva (AM) en el sector naval, destacando tanto sus ventajas como los desafíos asociados.

La fabricación aditiva permite una considerable reducción en el tiempo de fabricación en comparación con las técnicas tradicionales. Este avance contribuye a la eficiencia y agilidad en la producción de componentes navales, abriéndose nuevas oportunidades de diseño, ya que la AM posibilita la creación de formas y estructuras que serían difíciles o imposibles de lograr con métodos convencionales (Ziółkowski & Dyl, 2020b).

A pesar de las ventajas mencionadas, la fabricación aditiva conlleva mayores costes de fabricación y cualificación. Este aspecto puede ser un desafío importante a la hora de considerar su implementación en la construcción naval.

Uno de los aspectos destacados es el potencial de la AM en la producción de piezas de repuesto. La flexibilidad de la tecnología permite una respuesta rápida a las necesidades de reemplazo, lo que puede ser crítico en el sector naval.

José Allona representante de DNV-GL – Maritime (2020) predice un aumento significativo en la adopción de la fabricación aditiva para el año 2022. Esta predicción respalda la creciente aceptación de la tecnología en la industria. Proyecta un mercado de fabricación aditiva de 50.000 millones de dólares para 2030. Esto sugiere que la AM no solo se está consolidando como una práctica común, sino que también está generando un mercado considerable a nivel global.

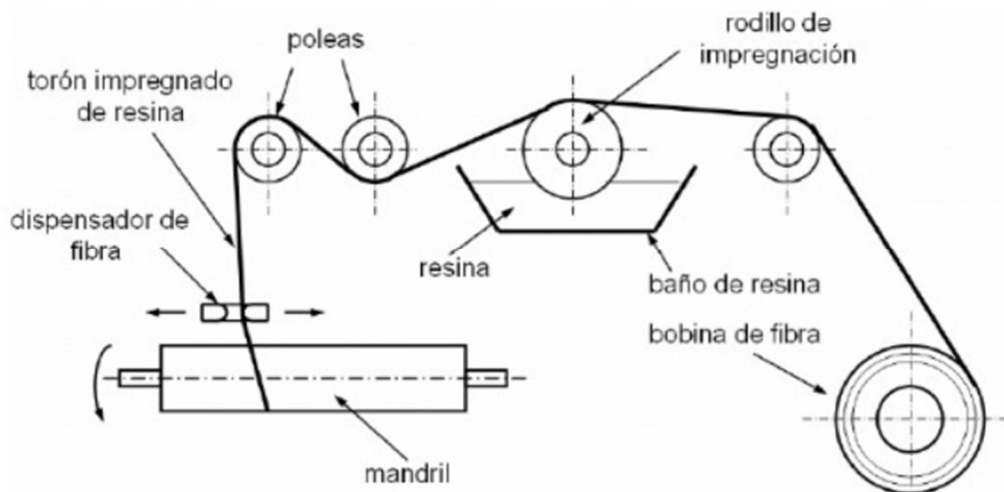


Figura 41: Esquema del E.F. (modelodemetalesypolimeros.wordpress.com)

En resumen, la fabricación aditiva está provocando en el sector naval una transformación, de grandes beneficios prácticos y potencial impacto económico a largo plazo (Conferencia Online CME: YouTube; Clúster Marítimo Español).

Enrollado filamentario (EF):

Las fibras impregnadas se enrollan alrededor de un mandril o molde. Es eficaz para producir componentes cilíndricos como tuberías y tanques. (Figura 41)

Infusión al vacío:

La resina se infunde en las fibras mediante un sistema de vacío. Este proceso es eficaz para piezas más grandes y complejas. Otorga un control preciso del contenido de resina y menos desperdicio de material. (Figura 42).

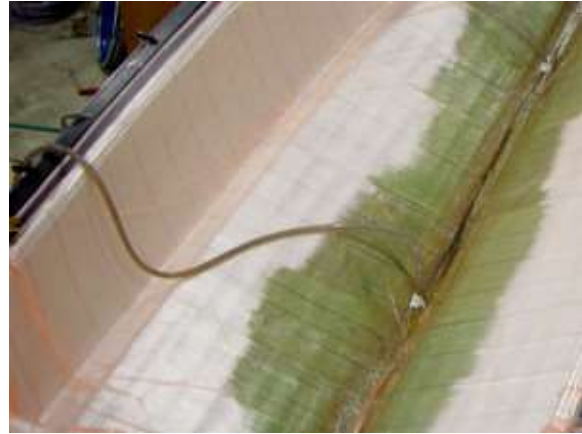


Figura 42: Infusión al vacío de un casco de velero (navalcomposites)

La elección del proceso de fabricación depende de factores como el tipo de aplicación, las propiedades deseadas del material y la complejidad de la forma. Cada método tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la selección se realiza en función de los requisitos específicos del producto final.

Factores que llevaron al uso de materiales compuestos

La transición hacia el uso generalizado de materiales compuestos en diversas industrias ha sido un proceso gradual, impulsado por avances tecnológicos, necesidades específicas de aplicaciones y la búsqueda continua de materiales más ligeros, resistentes y duraderos (*CompositesWorld*; *ingemecánica*; *Naval Composites*).

Desarrollo de nuevos materiales:

A lo largo del siglo XX, se produjo un rápido desarrollo en la ciencia de los materiales y la ingeniería. Esto incluyó el descubrimiento y desarrollo de nuevos materiales, como las resinas termoestables y las fibras de refuerzo, que son componentes clave de los materiales compuestos. (Kuranchie et al., 2021; Roy & Karak, 2012)

Aplicación en la industria aeroespacial:

La industria aeroespacial fue una de las primeras en adoptar materiales compuestos debido a la necesidad de reducir el peso de las aeronaves sin sacrificar la resistencia y

la durabilidad. En la década de 1950, se utilizaron compuestos de vidrio y resina en aeronaves experimentales (*Solvay*).

Avances en la fabricación:

El desarrollo de nuevos procesos de fabricación, como la laminación y la pultrusión, permitió la producción eficiente de componentes compuestos. Estos métodos mejoraron la calidad y la coherencia de los productos finales, haciendo que los materiales compuestos fueran más viables a escala industrial.

Aplicación en la industria automotriz:

A medida que la industria automotriz buscaba mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones, los materiales compuestos encontraron aplicación en la fabricación de componentes automotrices. En las últimas décadas, los automóviles han incorporado cada vez más piezas compuestas para reducir el peso y mejorar la eficiencia (Mahendra & Radhakrishna, 2007; Muhammad et al., 2021).

Investigación y desarrollo continuo:

La investigación continua en el campo de los materiales compuestos ha llevado a la introducción de nuevos tipos de fibras y matrices, así como a la mejora de las propiedades de los materiales existentes. Esto ha ampliado las aplicaciones potenciales en diversas industrias.

Uso en la construcción:

Los materiales compuestos han encontrado aplicación en la construcción civil, especialmente en la construcción naval, puentes y estructuras que requieren resistencia a la corrosión. La capacidad de los compuestos para resistir ambientes agresivos ha sido un factor clave en su adopción (Pendhari et al., 2008).

Aplicación en deportes y ocio:

Los materiales compuestos se han vuelto comunes en la fabricación de artículos deportivos y de ocio, como palos de golf, raquetas de tenis y bicicletas. La combinación de resistencia y ligereza ha sido fundamental en estas aplicaciones (Prince, 2002).

Avances en fabricación aditiva:

El desarrollo de tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, ha abierto nuevas posibilidades para la creación de estructuras compuestas más complejas y personalizadas (Jun Ou Minzhong Huang & Wu, 2023).

En definitiva, la transición hacia los materiales compuestos ha sido el resultado de una evolución continua en la comprensión de los materiales, la mejora de los procesos de fabricación y la adaptación a las demandas cambiantes de diversas industrias. A medida que la investigación y el desarrollo continúan, es probable que los materiales compuestos jueguen un papel aún más destacado en el diseño y la fabricación de productos en el futuro.

2.2.2. Ventajas clave de los materiales compuestos en la construcción naval y su aplicabilidad inicial.

Las principales ventajas de los materiales compuestos incluyen su alta resistencia específica (resistencia/peso), resistencia a la corrosión, flexibilidad de diseño y capacidad para resistir condiciones ambientales adversas. Los materiales compuestos ofrecen diversas ventajas que los han convertido en elecciones populares en una amplia gama de aplicaciones. A continuación, se presentan algunas de las ventajas clave de los materiales compuestos:

- **Resistencia y rigidez:** Los materiales compuestos, especialmente aquellos reforzados con fibras como la fibra de carbono, ofrecen una resistencia y rigidez excepcionales en relación con su peso. Esto permite la construcción de estructuras ligeras y fuertes.
- **Bajo peso específico:** La relación resistencia-peso superior de los materiales compuestos los hace ideales para aplicaciones donde la reducción de peso es crítica, como en la construcción aeroespacial y automotriz.
- **Durabilidad y resistencia a la corrosión:** Los materiales compuestos son resistentes a la corrosión y a la degradación química. Esto es especialmente beneficioso en entornos marinos y otras condiciones agresivas.
- **Diseño flexible:** La flexibilidad en el diseño es una ventaja clave de los materiales compuestos. Pueden adaptarse fácilmente a formas complejas, lo que permite una mayor libertad de diseño y optimización de la eficiencia estructural.
- **Propiedades anisotrópicas controladas:** La orientación de los refuerzos en los materiales compuestos permite la creación de estructuras con propiedades anisotrópicas controladas. Esto significa que pueden ser diseñados para ser más fuertes o rígidos en ciertas direcciones según las necesidades de la aplicación.

- **Buena relación resistencia-fatiga:** Los materiales compuestos, especialmente aquellos con fibras de alta resistencia, a menudo exhiben una buena resistencia a la fatiga. Esto los hace útiles en aplicaciones donde se esperan cargas cíclicas.
- **Aislamiento térmico y eléctrico:** Los materiales compuestos pueden ofrecer propiedades aislantes térmicas y eléctricas, lo que los hace útiles en una variedad de aplicaciones, desde componentes electrónicos hasta aislamiento en construcción.
- **Menor mantenimiento:** Debido a su resistencia a la corrosión y durabilidad, los materiales compuestos a menudo requieren menos mantenimiento en comparación con materiales tradicionales como el acero.
- **Eficiencia energética:** La reducción de peso que ofrecen los materiales compuestos puede contribuir a la eficiencia energética, especialmente en aplicaciones de transporte como automóviles y aviones.
- **Menor costo a largo plazo:** Aunque los materiales compuestos pueden tener un costo inicial más alto, su durabilidad y resistencia pueden resultar en menores costos a lo largo del ciclo de vida de una estructura o componente.

En la Figura 43 se puede observar un diagrama de Ashby representando el módulo de Young y la resistencia a la tracción de distintos materiales, espumas, cerámicas y composites entre otros.

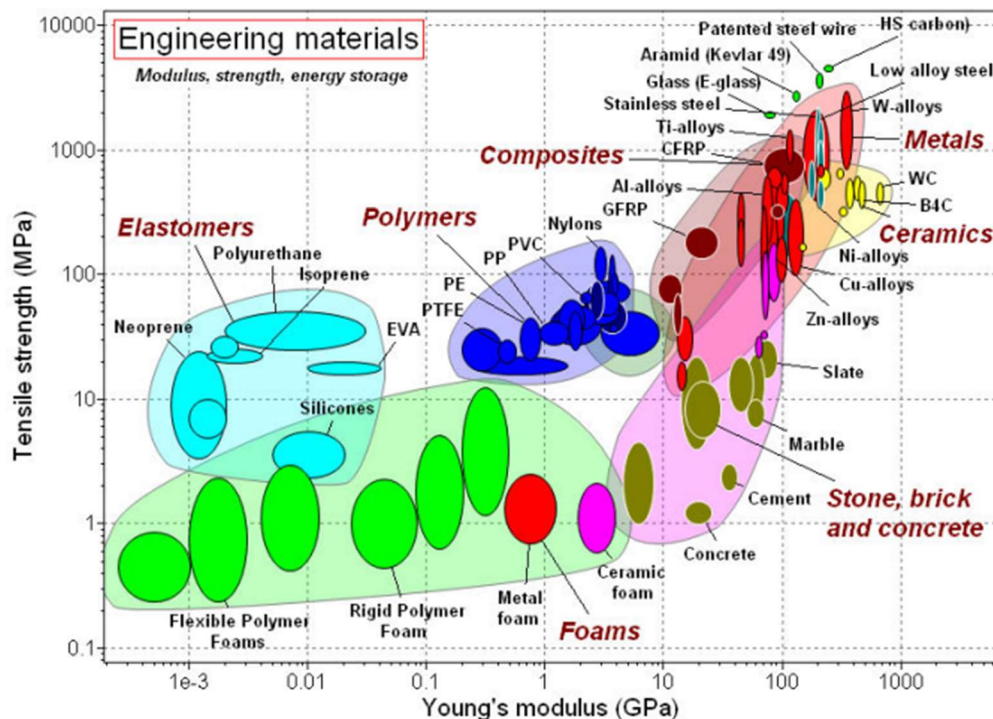


Figura 43: Diagrama de Ashby con diversos materiales (Ashby,2008)

Estas ventajas han llevado a la adopción generalizada de materiales compuestos en diversas industrias, desde la aeroespacial y automotriz hasta la construcción y la fabricación de productos de consumo. La continua investigación y desarrollo en este campo están llevando a la creación de materiales compuestos aún más avanzados con propiedades mejoradas.

2.3. Estado actual de la construcción naval con materiales compuestos

En el panorama actual de la construcción naval, la aplicación de materiales compuestos ha emergido como una innovación trascendental, transformando la manera en que se diseñan y construyen embarcaciones. La incorporación de compuestos, como la fibra de carbono y la fibra de vidrio, ha redefinido los estándares de resistencia, ligereza y durabilidad en la industria marítima.

Esta revolución en la construcción naval con materiales compuestos se refleja claramente en la vanguardia tecnológica de embarcaciones emblemáticas, siendo los AC75 de la Copa América un ejemplo paradigmático. Estos yates de élite han abrazado la fibra de carbono en sus cascos, mástiles y velas, no solo para reducir el peso estructural, sino también para mejorar la eficiencia y la maniobrabilidad, marcando así una nueva era en la competición náutica (*37th America's Cup*).

El sector de yates de lujo también ha experimentado una transformación impulsada por materiales compuestos. Empresas como Lürssen y Benetti, han incorporado estos avanzados materiales para lograr un equilibrio entre elegancia y rendimiento en la construcción de superyates (*Benetti Yachts*; *Lürssen Yachts*).

Sin embargo, la influencia de los materiales compuestos no se limita a las embarcaciones recreativas, sino que se extiende a la construcción de barcos comerciales y de servicio. Ejemplos como el *Aero* (Figura 49) ilustran la aplicación de compuestos para mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de combustible en el transporte marítimo. Empresas pioneras, entre las que destaca Naval Group, han llevado la adopción de materiales compuestos a un nivel superior, aplicándolos en la construcción de submarinos y embarcaciones militares de alta tecnología. Además, firmas de diseño como VPLP Design han integrado materiales compuestos en buques para lograr mejores eficiencias. Entre sus proyectos destaca el buque *Canopée*, un Ro-Ro sobre el que han montado cuatro velas. (Figura 44) (*An International Group*).

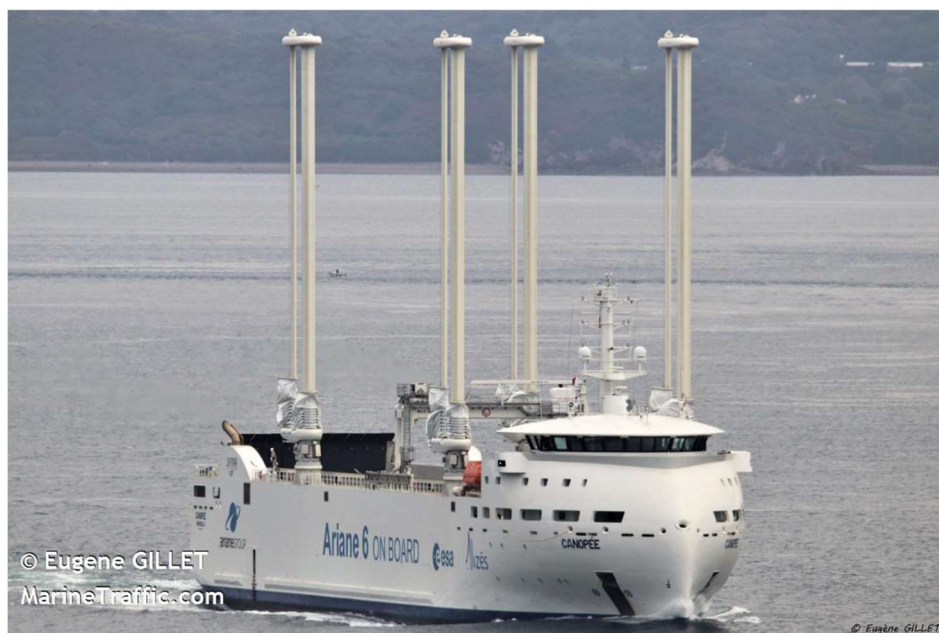


Figura 44: Buque Canopée (Marinetraffic.com)

Este fenómeno no solo se limita a aplicaciones existentes, sino que también se refleja en proyectos de investigación y desarrollo.

En esta introducción, hemos delineado un panorama diversificado de la construcción naval actual, donde los materiales compuestos lideran la marcha hacia una nueva era de diseño, rendimiento y sostenibilidad en la industria marítima. Y a continuación iremos desglosando este panorama en distintos sectores (*VPLP Design*).

2.3.1. Embarcaciones de Recreo y Deportivas

Los materiales compuestos desempeñan un papel fundamental en la construcción de embarcaciones recreativas, y la Copa América, en particular, ha sido un campo de prueba significativo para innovaciones en este ámbito. A continuación, se describen algunas de las aplicaciones y desarrollos relevantes en relación con los materiales compuestos y las embarcaciones recreativas, con un enfoque especial en los AC75 de la Copa América.

Los AC75 son una clase de yates utilizados en la Copa América (una competición internacional de vela). Estas embarcaciones han sido diseñadas con un énfasis significativo en el uso de materiales compuestos para lograr un equilibrio óptimo entre peso, resistencia y rendimiento. Los cascos de los AC75 están contruidos principalmente con fibra de carbono, que es un componente clave debido a su combinación de resistencia y ligereza. Para aumentar la rigidez y reducir el peso, se suelen incorporar núcleos de espuma o paneles sándwich en la estructura del casco.

Estos núcleos proporcionan una estructura ligera pero resistente, contribuyendo a la eficiencia del diseño. Las resinas utilizadas en la construcción de los cascos son resinas epoxi u otras resinas de alta resistencia. Estas resinas se utilizan para impregnar la fibra de carbono y crear una matriz que sostenga la estructura compuesta. En algunos casos, se puede incorporar Kevlar en áreas específicas del casco que requieran una mayor resistencia a impactos. Dependiendo del diseño y los requisitos de rendimiento, se pueden incorporar otros refuerzos textiles específicos, como aramidas, en áreas críticas del casco para proporcionar propiedades específicas de resistencia y durabilidad. La combinación de estos materiales compuestos permite crear cascos que son extremadamente ligeros, pero al mismo tiempo, tienen una resistencia estructural excepcional. El uso estratégico de estos materiales también permite una mayor personalización del diseño para satisfacer las demandas específicas de rendimiento de las embarcaciones de competición (*37th America's Cup; Airbus*).

El diseño del casco es altamente aerodinámico y se ha optimizado para minimizar la resistencia en el agua. Las formas del casco están diseñadas para cortar el agua de manera eficiente y reducir la resistencia en comparación con los diseños tradicionales. La característica más distintiva de los AC75 es su capacidad para foilear. Los foils son estructuras retráctiles que se extienden desde el casco y permiten que la embarcación se eleve fuera del agua. Este diseño reduce significativamente la resistencia y aumenta la velocidad, esencial para optimizar el rendimiento en la competición.

Las técnicas de unión en la construcción de los AC75 son críticas. Se utilizan elementos de unión de los que se hablará más adelante para garantizar una integridad estructural óptima, especialmente en áreas sometidas a tensiones extremas durante la navegación.



Figura 45: AC75 "American Magic" (Airbus.com)

Además de la estructura principal del barco, los materiales compuestos se aplican en velas y superficies de navegación. Se busca mejorar la eficiencia aerodinámica y la capacidad de maniobra mediante el uso de materiales ligeros y resistentes. El mástil de los AC75 está construido con fibra de carbono para garantizar resistencia y ligereza. Este componente es crucial para soportar las velas y proporcionar estabilidad estructural. Las velas están hechas de materiales como Mylar y Kevlar. Estos materiales son ligeros y muy resistentes. El Mylar es un poliéster transparente y resistente que se utiliza comúnmente en las velas. Es ligero y tiene propiedades de baja elongación, lo que significa que mantiene su forma en condiciones de carga (McMahon et al., 1957).

La tecnología del gemelo digital se utiliza para simular y analizar el rendimiento de la embarcación en diversas condiciones antes de la competición. Esto permite a los equipos optimizar el diseño y las estrategias de navegación (*Emirates Team New Zealand; Luna Rossa Prada Pirelli Team*).

La participación en competiciones como la Copa América impulsa la investigación continua en materiales compuestos y diseño de embarcaciones. Los equipos buscan constantemente formas de mejorar la relación peso-resistencia y explorar nuevos materiales y tecnologías. Lo que también contribuye al desarrollo de tecnologías que eventualmente se filtran en la construcción de embarcaciones más convencionales.

2.3.2. Yates de Lujo y Superyates

El uso de materiales compuestos en yates de lujo se ha convertido en una práctica común, respaldada por la capacidad de estos materiales para mejorar el rendimiento, ofrecer diseños personalizados y proporcionar una experiencia de navegación exclusiva. Empresas líderes en la industria han adoptado estos materiales para construir embarcaciones que satisfacen los estándares más exigentes de la clientela de lujo. Exigencias relacionadas en su mayoría con la flexibilidad en el diseño, la personalización, y la capacidad de lograr formas y estructuras innovadoras.

Los materiales compuestos permiten formas y contornos más innovadores y aerodinámicos que pueden no ser posibles con materiales tradicionales. Esto facilita la creación de yates con líneas distintivas y atractivas. La versatilidad de los compuestos reduce las restricciones en el diseño, permitiendo a los arquitectos navales explorar soluciones más creativas y personalizadas para satisfacer las preferencias estéticas del cliente. Los materiales compuestos pueden adaptarse para incorporar una amplia variedad de acabados, desde texturas mate hasta brillantes. Esto permite a los propietarios personalizar cada detalle de la apariencia de su embarcación. Los compuestos pueden integrarse con otros materiales, como madera o mármol, para lograr un diseño interior que refleje el estilo personal del propietario.

La ligereza de los materiales compuestos permite una mayor eficiencia en el uso del espacio interior. Se pueden diseñar interiores más amplios y lujosos sin comprometer la estabilidad o el rendimiento del yate.

Los materiales compuestos permiten la creación de estructuras internas personalizadas, como escaleras, muebles y particiones. Por supuesto también permiten reducir consumos y peso del barco, pero dado que este apartado se centra en los yates y el lujo, ese beneficio lo vamos a considerar adicional.

Los materiales compuestos en la construcción de yates de lujo proporcionan a los clientes la oportunidad de personalizar casi todos los aspectos de su embarcación, desde el diseño exterior hasta los detalles más íntimos del interior. Esto no solo responde a preferencias estéticas individuales, sino que también garantiza una embarcación única y exclusiva que refleja el estilo de vida y los gustos del propietario.

Varias empresas de yates de lujo se destacan por ofrecer un nivel excepcional de personalización, permitiendo a los clientes adaptar casi todos los aspectos de su embarcación según sus gustos y preferencias. Lürssen es una empresa alemana con una reputación excepcional en la construcción de megayates personalizados. Trabajan estrechamente con los propietarios para adaptar cada detalle del diseño, desde la disposición de las cabinas hasta los detalles decorativos.

Feadship, (*Feadship*) con astilleros en los Países Bajos, es reconocida por la construcción de yates personalizados de alta calidad. Ofrecen un enfoque único llamado "*Feadship for Future*", que permite a los propietarios participar activamente en el proceso de diseño y personalización.

Oceanco, (*Oceanco*) con sede en los Países Bajos, es conocida por construir megayates de lujo totalmente personalizados. Colaboran estrechamente con diseñadores y propietarios para crear yates únicos que reflejen los gustos individuales.

Benetti (*Benetti Yachts*) es una empresa italiana que se especializa en la construcción de yates a medida. Ofrecen un enfoque colaborativo, permitiendo a los propietarios personalizar tanto el diseño interior como el exterior.

Estas empresas son sólo algunas de las muchas que se esfuerzan por ofrecer la máxima personalización en la construcción de yates de lujo. Cada una tiene su enfoque único y trabaja en estrecha colaboración con los propietarios y diseñadores para crear yates exclusivos que reflejen los gustos y el estilo de vida de sus clientes. Siendo esto posible gracias a la implementación en cada vez mayor medida de los materiales compuestos.



Figura 46: Extracto de la página web de Feadship (Feadship.nl)



Figura 47: Extracto de la página web de Oceanco (oceancoyacht.com)

En las Figura 46 y Figura 47 podemos observar extractos de las páginas web de Feadship y Oceanco, donde ofrecen la máxima personalización posible a sus clientes. Ambas cuentan con un gran historial de barcos construidos a lo largo de los años, entre ellos podemos destacar el “VIVA” (2021) de Feadship(Feadship | VIVA) con 94m de eslora y el “Black Pearl” (2018) de Oceanco(Black Pearl - Oceanco) con 106,7m de eslora.

Tras haber revisado múltiples ejemplos sobre el uso que se está dando a los composites es necesario entender cómo se unen, tanto los composites como el acero, ya que, sin estos elementos de unión, la construcción de barcos y estructuras como las previamente mencionadas no sería posible.

2.3.3. Embarcaciones Comerciales

Empresas innovadoras en la industria naval, como “Candela” (*The Future of Boats | Candela*) y “Brødrene Aa” (*Brodrene Aa*) están a la vanguardia del diseño de embarcaciones comerciales centradas en composites y comprometidas con la sostenibilidad, optando por la construcción de barcos comerciales en su totalidad con materiales compuestos.

La adopción de materiales compuestos por estas empresas no solo responde a la búsqueda de una mayor eficiencia operativa y rendimiento de las embarcaciones, sino que también está estrechamente vinculada a las normativas medioambientales cada vez más estrictas. En un mundo donde la sostenibilidad se ha vuelto un imperativo, los materiales compuestos ofrecen una alternativa atractiva al permitir la reducción de la huella de carbono de las flotas marítimas. Y es que, para estas empresas, la construcción de embarcaciones totalmente creadas a partir de materiales compuestos va de la mano del uso de tecnologías energéticas más sostenibles, como motores eléctricos y baterías. La efectividad y rentabilidad de éstos se basa, en gran medida, en que las embarcaciones sean lo más ligeras posibles.

En este contexto, el análisis se centrará en cómo estas empresas pioneras están integrando materiales compuestos en la construcción de barcos comerciales, considerando tanto los aspectos técnicos como los relacionados con las normativas medioambientales. Al comprender los logros y avances en este campo, podremos apreciar la magnitud de la transformación que los materiales compuestos están introduciendo en la construcción de barcos comerciales, alineándose con los objetivos de sostenibilidad del sector (Dominic & Nandakumar, 2012).

En sintonía con esta temática cabe destacar el programa de investigación de la ETS de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid que tiene el propósito de desarrollar un material híbrido fibra-metal para su empleo en construcción naval y en aplicaciones de ingeniería oceánica, denominado MaLECoN: Material Laminado Estructural para Construcción Naval. (Herreros Sierra et al., 2008; Suárez Bermejo & Herreros Sierra, 2008; Suárez et al., 2004).

En términos técnicos, se han enfrentado y superado diversos desafíos para optimizar el rendimiento y la seguridad de las embarcaciones.

En primer lugar, la selección cuidadosa de materiales compuestos específicos ha sido esencial. Estas empresas han invertido tiempo y recursos en la investigación y desarrollo de combinaciones de fibras y matrices que no solo cumplen con los requisitos de resistencia y durabilidad, sino que también minimizan el impacto ambiental durante su ciclo de vida. La adaptabilidad de los materiales compuestos permite ajustar la composición para cumplir con normativas específicas y mejorar la eficiencia general de las naves.

En la Figura 48 se puede observar la estructura de una quilla de la empresa Candela, fabricada en su totalidad con fibra de carbono, debido a que la empresa utiliza baterías en sus naves y éstas pesan mucho, han optado por la construcción a base de materiales

compuestos, reduciendo el peso de la estructura significativamente, lo que, a pesar del peso añadido de las baterías, permite a estos barcos seguir navegando con foils.

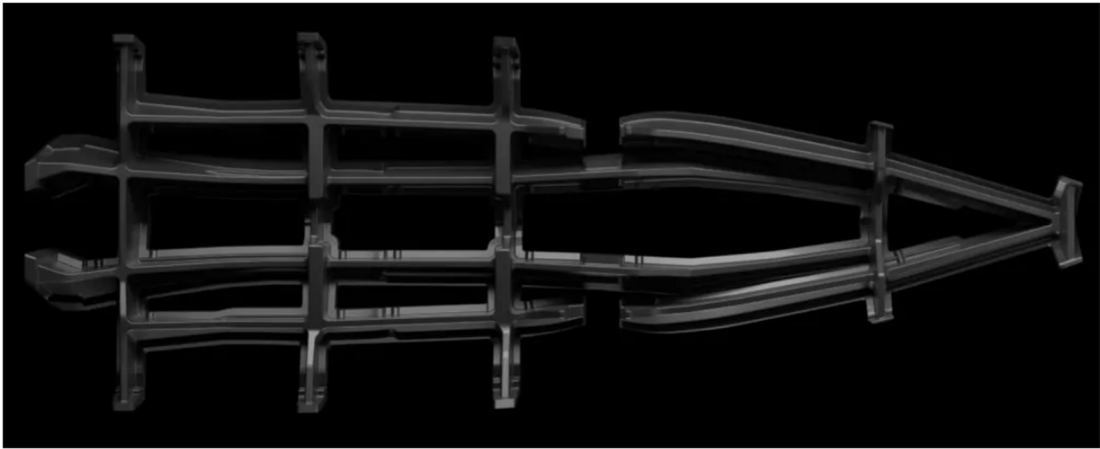


Figura 48: Quilla fabricada 100% en carbono (candela.com)

En cuanto a las normativas medioambientales, las empresas han priorizado la reducción de emisiones y la sostenibilidad general. La ligereza de los barcos contruidos con materiales compuestos contribuye directamente a la eficiencia del combustible y, por ende, a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la resistencia a la corrosión inherente de muchos materiales compuestos prolonga la vida útil de las embarcaciones, disminuyendo la necesidad de frecuentes trabajos de mantenimiento, lo cual impacta positivamente en la sostenibilidad económica y medioambiental.

A modo de ejemplo se presentan las siguientes empresas, con una filosofía centrada en la innovación y la sostenibilidad:

Candela

Candela es una empresa sueca que se especializa en la fabricación de embarcaciones eléctricas. La compañía se destaca por su enfoque en la tecnología de hidroala o foil, que utiliza alas sumergidas para elevar el casco del barco fuera del agua, reduciendo la resistencia y permitiendo una mayor eficiencia en términos de consumo de energía.

El diseño de las embarcaciones Candela se centra en la sostenibilidad y la eficiencia energética al aprovechar la propulsión eléctrica y la aerodinámica avanzada proporcionada por el foil. Estos barcos eléctricos son conocidos por su capacidad para navegar a altas velocidades con un consumo mínimo de energía, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones, incluida la navegación en entornos urbanos y turísticos. La transición hacia barcos eléctricos, como los fabricados por Candela, refleja un compromiso con la sostenibilidad y la reducción de emisiones.

Los foils utilizados por candela utilizan el mismo principio que los explicados en los AC75 de la Copa América página 72, con la sutil diferencia de que en Candela utilizan

alas sumergidas para elevar el casco del barco fuera del agua, lo que reduce significativamente la resistencia y mejora la eficiencia. Es esencial destacar que esta característica influye en la selección de materiales para garantizar la resistencia y durabilidad necesarias, ya que el diseño impone tensiones únicas en la estructura. Las fibras de carbono utilizadas en la construcción de los Barcos proporcionan una resistencia excepcional sin agregar peso significativo, siendo fundamentales para la eficiencia de las embarcaciones eléctricas.

Candela no solo se destaca por su enfoque en la eficiencia, sino también por su compromiso con la sostenibilidad. Esto podría influir en la elección de materiales que minimizan el impacto ambiental, como la preferencia por materiales reciclables o de bajo impacto en la fabricación en aquellos aspectos de la embarcación que no resultan críticos para la integridad estructural (*The Future of Boats* | Candela).

Tanto la empresa Candela como Brodrene Aa están alineadas con varios de los objetivos de la agenda 2030 (*Desarrollo Sostenible*) objetivos como el 7, 9, 12, 13 y 14, Energía asequible y no contaminante, Industria innovación e infraestructura, Producción y consumo responsables, acción por el clima y Vida submarina.

Brødrene Aa

Es una empresa noruega especializada en la construcción de embarcaciones utilizando materiales compuestos avanzados. Su enfoque principal está en la fabricación de embarcaciones de alta velocidad, como ferries y barcos de pasajeros, utilizando tecnologías innovadoras. Brødrene Aa ha sido reconocida por su experiencia en la aplicación de materiales compuestos, especialmente fibra de carbono, en la construcción naval.

La empresa ha estado a la vanguardia de la tecnología de materiales compuestos en la industria naval, contribuyendo al desarrollo de embarcaciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Su experiencia se refleja en la participación en proyectos significativos de construcción naval en todo el mundo. Proyectos como la construcción de catamaranes para “Attica Group” principal proveedor de servicios de ferry para pasajeros y carga en el Mar Mediterráneo Oriental (*Homepage*).

Aero 1 Highspeed (Figura 49) es la primera embarcación del recientemente introducido concepto AERO de Brødrene Aa, que presenta un diseño aerodinámico y eficiente en energía, acompañado de una construcción ligera de fibra de carbono, característica distintiva de la marca. La construcción extremadamente ligera de fibra de carbono contribuye a una reducción del consumo de combustible y las emisiones.

Al recibir el nuevo AERO 1 Highspeed, el Sr. Spiros Paschalis, CEO de Attica (2022), dijo:

"En estos tiempos desafiantes, el Grupo Attica sigue enfocado en proporcionar servicios de transporte marítimo de primera clase a nuestros pasajeros, con

embarcaciones nuevas, innovadoras y más respetuosas con el medio ambiente, en beneficio de nuestras islas y sus habitantes, y para el turismo y la economía griega".

Aero 1 Highspeed, con sus 36 metros de eslora y 9.7 metros de manga con carga completa, podrá mantener una velocidad máxima de 32 nudos (*Brodrene Aa*).

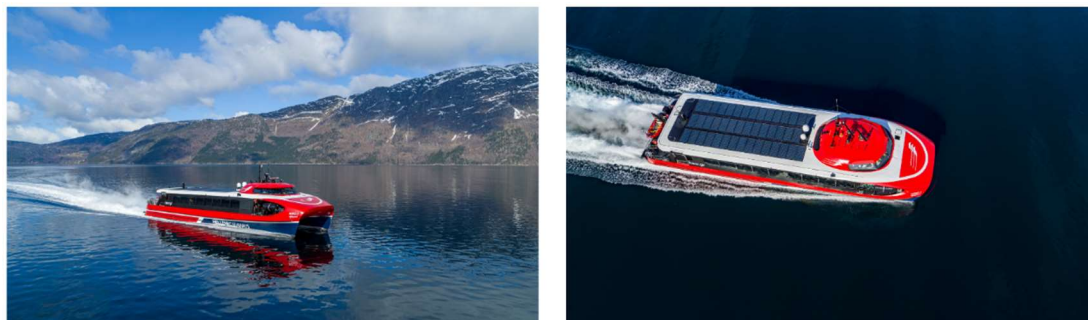


Figura 49: Imágenes del Aero 1 Highspeed (Braa.no)

Tras conocer un par de ejemplos de empresas dedicadas a la construcción, es conveniente investigar también a las empresas dedicadas a suministrar a los astilleros de todos sus materiales, empresas como Gurit.

Gurit es una empresa líder en el campo de la fabricación y distribución de materiales compuestos, desempeñando un papel crucial en la industria de la construcción naval y otros sectores que requieren soluciones avanzadas de materiales. Se fundó en Suiza en 1835 como una empresa especializada en productos químicos. Sin embargo, su enfoque en materiales compuestos se intensificó a lo largo de las décadas y ha evolucionado para convertirse en un referente global en el desarrollo y fabricación de materiales compuestos. Constantemente busca mejorar sus materiales y procesos para satisfacer las demandas cambiantes de la industria y cumplir con los estándares más exigentes de rendimiento y calidad. Tiene una presencia global con instalaciones de fabricación y distribución ubicadas en todo el mundo. Algunas de sus ubicaciones estratégicas incluyen Suiza, Alemania, China, Canadá, Reino Unido y Estados Unidos. La empresa ofrece una amplia gama de productos que incluyen preregs, núcleos estructurales, adhesivos y compuestos especiales. Estos materiales (Tabla 5) se utilizan en la fabricación de componentes estructurales y revestimientos para diversas aplicaciones, incluida la construcción naval (*Advanced Composite Materials and Solutions*).

En el dinámico panorama de la industria offshore, la continua búsqueda de soluciones tecnológicas innovadoras ha llevado al destacado papel desempeñado por los materiales compuestos. Estos avanzados materiales se han convertido en una opción preferida en el diseño y la construcción de estructuras submarinas, risers, umbilicales y otros componentes clave utilizados en operaciones en aguas profundas.

PRODUCTS SUITABLE FOR	CORE MATERIALS	PREPREGS	EPOXY RESINS AND ADHESIVES
Hull Deck Structure Non-structural Tooling Cosmetic	Gurit Kerdyn™ Green Kerdyn Green FR Corecell M Corecell I PVC	ST90 SE130FR	PRIME 37 AMPREG 30 AMPREG 31 Ampreg 3X Hardeners Spabond 400 Spabond 400FR Spabond 540 T-Prime 130 T-Prime 160

Tabla 5: Listado de productos y aplicaciones de la empresa Gurit para la construcción naval (gurit.com)

2.3.4. Aplicaciones Offshore

Más allá de los beneficios inherentes como la reducción de peso y la resistencia a la corrosión, los compuestos están revolucionando la forma en que la industria aborda desafíos específicos, al tiempo que aportan una eficiencia mejorada y una mayor durabilidad en los entornos submarinos más desafiantes. En este contexto, exploraremos las diversas aplicaciones y avances significativos de los materiales compuestos en el ámbito offshore, destacando cómo estos materiales están dando forma a la evolución continua de la exploración y producción en aguas profundas.

A continuación, se presentan algunas de las áreas en las que se han aplicado y planean aplicar compuestos en la industria offshore:

Umbilicales:

Aker Solutions ha trabajado en el desarrollo de umbilicales compuestos, específicamente el "*carbon rod dynamic umbilical*". Estos umbilicales, certificados por DNV, se utilizan en entornos de aguas profundas para la conexión remota de plataformas de producción a pozos dispersos en el lecho marino (*Aker Solutions | Aker Solutions*).

Sistemas de monitoreo "*Smart*" con compuestos:

Empresas como Insensys Ltd. han desarrollado sistemas de monitoreo que incorporan compuestos, como el "*shape sensing mat*" que utiliza fibra óptica para monitorear la flexión y vida útil de risers de acero en entornos offshore (*Insensys*).

Risers compuestos:

Shell Global, por ejemplo, está trabajando en un proyecto de riser (es un conducto que proporciona una extensión temporal de un pozo de petróleo submarino hacia una instalación de perforación en la superficie) con revestimiento de acero (Figura 50) (Amaechi, 2022; *Shell Global*).

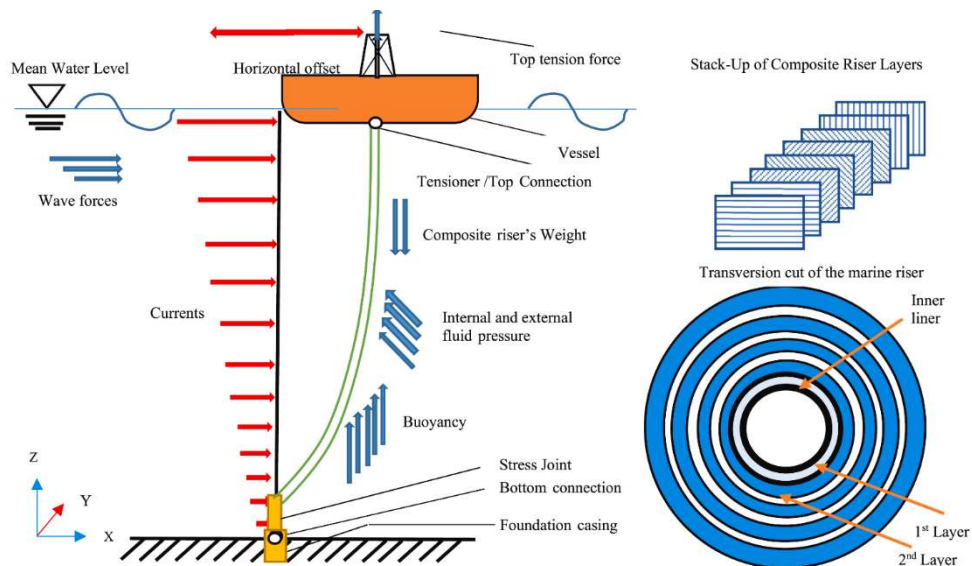


Figura 50: Un esquema que muestra las cargas, la disposición de capas y el corte transversal de las capas de un riser de composite (Ocean Engineering)

Estas aplicaciones ilustran la diversidad de áreas en las que los compuestos están desempeñando un papel crucial en la industria offshore, ofreciendo soluciones que abordan desafíos específicos, como la corrosión, la resistencia a la presión y la monitorización estructural.

2.4. Uniones

En el ámbito de la construcción naval, las uniones de materiales son un aspecto crucial para garantizar la integridad y la eficiencia de las estructuras. Las opciones de unión dependen en gran medida de los materiales específicos que se estén utilizando.

2.4.1. Uniones mecánicas (Remachado)

El remachado es un proceso de unión de materiales, comúnmente utilizado en la construcción naval, fue muy popular durante el auge de la construcción naval de acero en los siglos XIX y principios del XX. Consiste en unir las piezas mediante remaches

que se colocan a través de agujeros perforados en las partes a unir y luego se deforman para formar la unión.

En la actualidad, se utilizan principalmente en reparaciones o en estructuras que requieren una estética específica. Antes de comenzar el proceso de remachado, las piezas que se van a unir se preparan. Esto puede incluir la perforación de agujeros en las partes que se conectarán. Los remaches suelen ser pequeños cilindros de metal con una cabeza en un extremo. Pueden estar hechos de materiales como hierro, acero o aluminio, dependiendo de los requisitos de la aplicación. Tradicionalmente, los remaches se calientan en un horno o con una llama antes de la instalación. Esto facilita su deformación durante el proceso de remachado. El remachador (o remachadora) coloca el remache caliente en el agujero perforado de las piezas que se unirán. La cabeza del remache suele colocarse en el lado opuesto al del remachador. (Benford, 2009)(Figura 51).

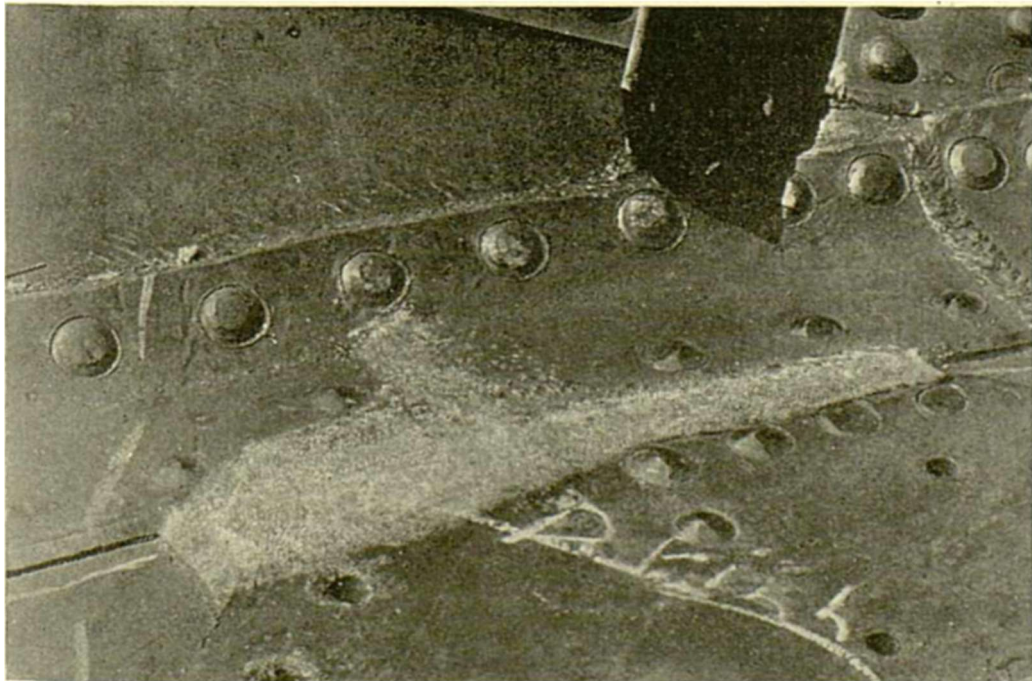


Figura 51: Combinación de remachado y soldadura para la unión de planchas metálicas (Marine Engineering & Shipping Age)

El extremo del remache que sobresale se coloca en una herramienta llamada yunque, mientras que el extremo que está dentro del agujero se martilla para formar una cabeza en el otro lado de las piezas unidas. Esto se llama "remachado en caliente". A medida que el remache se enfría, se contrae y se aprieta aún más la conexión. Esto contribuye a una unión fuerte y duradera.

Es importante destacar que, aunque el remachado fue una técnica crucial en el pasado, la construcción naval moderna ha adoptado en gran medida la soldadura en lugar del remachado. La soldadura ofrece ventajas en términos de eficiencia, velocidad de construcción y resistencia estructural. Sin embargo, el remachado sigue siendo utilizado en ciertos contextos y para fines específicos en la construcción y restauración naval.

Es importante destacar que, si bien el remachado ha perdido terreno en la construcción naval, sigue siendo apreciado en ciertos proyectos por razones estéticas, históricas o específicas de diseño. Además, las técnicas modernas a menudo involucran la combinación de varios métodos de unión, utilizando soldaduras en conjunto con remaches en ciertas áreas para obtener las mejores características de ambos métodos.

El remachado, como método de unión de materiales, tiene sus propias ventajas e inconvenientes que se presentan a continuación (Tabla 6).

VENTAJAS		INCONVENIENTES	
Resistencia mecánica	Protuberancias en ambos lados del material, conexión robusta.	Complejidad y tiempo	Calentamiento y martillado ralentiza la construcción
Resistencia a la fatiga	Importante en cargas cíclicas.	Debilitamiento estructural	Los agujeros pueden debilitar las piezas
Menor sensibilidad a la corrosión	Menos calor que en la soldadura	Limitaciones en formas y espesores	No es tan versátil como la soldadura
Estética y diseño	Restauración de estructuras antiguas.	Costos laborales	Mano de obra especializada
Inspección y reparación	Fáciles de inspeccionar visualmente	Corrosión potencial	Puntos potenciales de corrosión

Tabla 6: Ventajas e inconvenientes del remachado (Autor)

2.4.2. Uniones de acero (Soldadura)

La soldadura es una técnica ampliamente utilizada en la construcción naval para unir piezas de acero. El proceso de soldadura puede variar, pero comúnmente se emplea la soldadura por arco sumergido o la soldadura por arco eléctrico. Se debe tener en cuenta la calidad de la soldadura para evitar defectos, ya que la integridad estructural depende de la resistencia de estas uniones. La transición de la construcción naval del remachado a la soldadura marcó un cambio significativo en la industria. En la Tabla 7 se puede ver una comparativa entre ambos métodos de unión.

La Figura 52 es una representación esquemática de una unión mediante soldadura, donde se pueden apreciar las diferencias entre el metal base, la zona de soldadura, que abarca las ZAT (Zonas Afectadas Térmicamente) y el material de aporte. Centrando la atención en la zona de soldadura, se pueden apreciar los bordes iniciales antes de realizar la unión y la línea de fusión que delimita el metal de soldadura. El metal de soldadura es la zona que han formado el metal base y el metal de aporte al fundirse. Las ZAT son las zonas adyacentes a la soldadura que se han calentado y se ven afectadas por el calor, pero sin llegar a fundirse. No obstante, ese calor provoca cambios metalúrgicos en la zona y en las características mecánicas. Lo ideal es que la ZAT sea lo más pequeña posible. Por último, el metal base es el que no ha sufrido ninguna transformación.

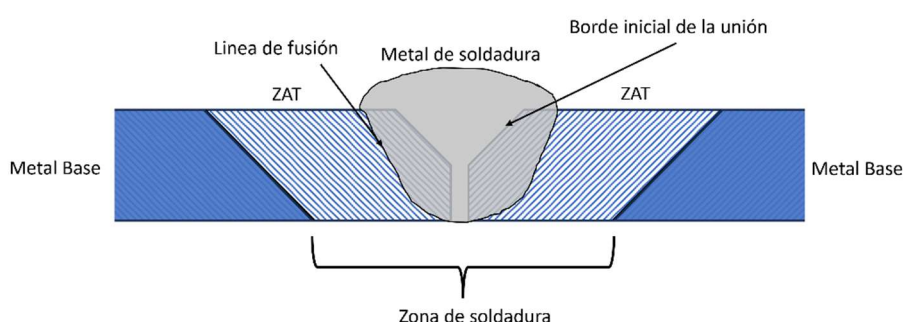


Figura 52: Esquema de una soldadura (Autor)

	Remachado	Soldadura
Resistencia y durabilidad	-Unión mecánica sólida -Agujeros debilitan estructura -Calidad afecta resistencia de uniones	-Conexión continua y homogénea -Mayor resistencia estructural -Buena calidad crucial para asegurar durabilidad
Uso actual	-Reparaciones y restauraciones	-Técnica de unión predominante
Tiempo	-Laborioso y manual	-Eficiente y rápida

Tabla 7: Contraste entre el remachado y la soldadura (Autor)

Antes de la adopción generalizada de las técnicas de soldadura modernas, como la soldadura eléctrica y la soldadura de arco, se utilizaron métodos más primitivos y manuales para unir metales. Algunas de las técnicas de soldadura más antiguas incluyen:

Soldadura por forja:

La soldadura por forja es un antiguo método de unión de metales que implica calentar las piezas de metal a unir y luego forjarlas juntas mediante la aplicación de presión o golpes (Figura 53). Aunque este método ha sido utilizado a lo largo de la historia, es importante destacar que no se considera una forma de soldadura en el sentido moderno, ya que no implica la fusión de los metales a través de calor extremo. En la Tabla 8 se presentan una serie de ventajas e inconvenientes de este tipo de soldadura. (Garcia et al)

Las piezas de metal que se van a unir se preparan y se calientan a una temperatura



Figura 53: Soldadura por forja (electrónica básica)

adecuada. El objetivo es calentarlas lo suficiente para que sean maleables, pero no al punto de fundirlas. Esto se hace generalmente en un horno, una fragua o mediante el uso de antorchas de gas. Una vez que las piezas alcanzan la temperatura deseada, se retiran del calor y se colocan en una prensa o yunque. Se aplica presión o se golpea con martillos para forjar las piezas juntas. El objetivo es deformar el metal lo suficiente para que las superficies se unan. Después del forjado, las piezas se dejan enfriar de manera controlada, para evitar tensiones excesivas y garantizar una unión sólida.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Conserva las propiedades del material	Limitada en formas y diseño
No necesita material de aporte	Necesaria habilidad y mano de obra especializada

Tabla 8: Pros y contras de la soldadura por forja (Autor)

La soldadura por forja ha sido históricamente importante en la fabricación de herramientas, armas y estructuras metálicas. Aún tiene un valor histórico y artesanal en la fabricación de objetos de metal.

Soldadura por oxigás:

La soldadura con gas (oxiacetilénica) (Figura 54), se volvió común a principios del siglo XX. Es un proceso de unión de metales que utiliza una llama generada por la combustión de oxígeno y acetileno. Este método es especialmente útil para soldar metales como el acero, el cobre y el aluminio (Tabla 9).



Figura 54: Soldador utilizando oxigás (Fractory)

Se enciende la llama de acetileno utilizando un encendedor, y luego se agrega oxígeno para obtener una llama caliente. Una llama neutral es la más equilibrada, pero según la aplicación, se pueden utilizar llamas carburizantes (con más acetileno) u oxidantes (con más oxígeno). La soldadura oxiacetilénica no funde los metales, pero los calienta lo suficiente para que se vuelvan maleables. En algunos casos, se puede agregar material de aporte en forma de una varilla metálica para rellenar la unión y fortalecerla. Después de la aplicación del calor, se permite que las piezas se enfríen de manera controlada para evitar tensiones excesivas.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Equipo relativamente ligero y portátil	Limitada en espesores
Versátil, puede soldar acero cobre y aluminio	Calidad depende de la habilidad del soldador

Tabla 9: Pros y contras de la soldadura por oxigás (Autor)

En la actualidad, ha sido en gran medida reemplazada por métodos más avanzados, como la soldadura eléctrica, que ofrece una mayor eficiencia y versatilidad. En la se presentan las ventajas e inconvenientes de este tipo de soldadura.

Soldadura por resistencia:

La soldadura por resistencia utiliza corriente eléctrica para calentar y fundir las piezas que se van a unir. Esto se logra mediante el paso de una corriente eléctrica a través de las piezas, generando calor por la resistencia eléctrica en el área de unión. La Tabla 10 recoge las ventajas y las aplicaciones comunes de este método. (Figura 55).

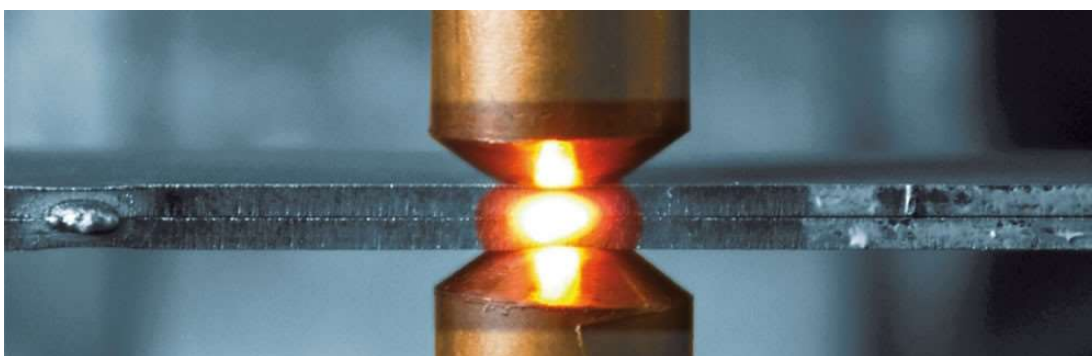


Figura 55: Soldadura por resistencia (bearcat)

La máquina de soldadura por resistencia consta de electrodos, un sistema de suministro de corriente y un sistema de control. Los electrodos son componentes de la máquina que entran en contacto con las piezas a soldar. Existen electrodos superiores e inferiores, y ambos están conectados al suministro de corriente. Se suministra electricidad a través de los electrodos para generar calor en la zona de unión. Las piezas que se van a unir se colocan entre los electrodos de la máquina. Es preciso asegurarse de que las superficies estén limpias y en contacto. Los electrodos se presionan fuertemente contra las piezas a soldar. La presión asegura un buen contacto eléctrico y mejora la calidad de la soldadura. Se aplica corriente eléctrica a través de los electrodos, creando resistencia eléctrica en la zona de unión. El calor generado por la resistencia eléctrica funde localmente las piezas de metal en la zona de unión. Las piezas se fusionan cuando alcanzan su punto de fusión. Después de alcanzar la temperatura necesaria para la fusión, se detiene el suministro de corriente y se permite que la zona de unión se enfríe y solidifique. Se retiran los electrodos, y las piezas unidas están listas para ser manipuladas o pasar a la siguiente fase del proceso.

VENTAJAS		APLICACIONES COMUNES	
Eficiente	Para la producción en masa	Automóviles	Carrocería
Buena calidad	Soldadura limpia y uniforme	Electrónica	Fabricación de dispositivos
Costos competitivos	Rentable con grandes volúmenes	Electrodomésticos	Unión de piezas
No requiere material de aporte		Alambres y cables	Unión de extremos

Tabla 10: Ventajas y aplicaciones comunes de la soldadura por resistencia (Autor)

Soldadura con arco de carbono:

La soldadura con arco de carbono es un antiguo método de soldadura que utiliza un electrodo de carbono para generar un arco eléctrico entre el electrodo y las piezas que se van a unir. La Tabla 11 ilustra las ventajas y desafíos a los que se enfrenta esta soldadura.



Figura 56: Electrodo de carbono (directindustry)

El electrodo de carbono es el componente central de la soldadura con arco de carbono, puede tener diversas formas y tamaños (Figura 56). Se necesita una fuente de corriente eléctrica para crear el arco entre el electrodo y las piezas que se van a unir. El electrodo de carbono se monta en un porta electrodos y se posiciona cerca de las piezas que se van a soldar. Se establece el contacto entre el electrodo de carbono y las piezas a soldar, y luego se retira ligeramente para crear un espacio donde se forma el arco eléctrico. La corriente eléctrica salta a través de este espacio, creando el arco. Con el calor generado por el arco, los extremos de las piezas se funden y se mezclan, creando una unión cuando se enfrían y solidifican. El operador controla la dirección y la intensidad del arco, así como la velocidad de avance para lograr una soldadura uniforme. (*Soldadura con arco de carbón*).

VENTAJAS	DESAFÍOS
Simple comparado con otras técnicas	Limitado en variedad de materiales
Costos iniciales bajos	Calidad limitada

Tabla 11: Ventajas y desafíos que presenta la soldadura con arco de carbono (Autor)

Estos métodos antiguos de soldadura requerían habilidades manuales significativas y, en muchos casos, eran laboriosos y lentos. La calidad de las uniones a menudo dependía de la habilidad del soldador.

A medida que avanzaba el siglo XX, se produjo un rápido desarrollo en tecnologías de soldadura, que mejoraron la eficiencia, la seguridad y la calidad de las uniones. Estos avances llevaron a una transición significativa en la construcción y la fabricación, con un aumento en la adopción de técnicas de soldadura más modernas.

Hoy en día, existen varios procesos de soldadura avanzados que se utilizan en diversas industrias debido a su eficiencia, precisión y capacidad para trabajar con una amplia variedad de materiales. (TURAN et al., 2011). Dentro de la construcción naval, las más utilizadas son la soldadura por arco sumergido (SMAW) y la soldadura por arco de gas (GMAW).

Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW):

La soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, *Shielded Metal Arc Welding*) es un proceso de soldadura que utiliza un electrodo revestido para generar un arco eléctrico y fundir los metales en la zona de unión. En la Tabla 13 se recogen las ventajas y desafíos presentes en este tipo de soldadura.

El electrodo es una varilla metálica que está recubierta con una capa de materiales que proporciona el material de aporte, estabiliza el arco y protege la soldadura de la atmósfera circundante. Se necesita una fuente de corriente eléctrica para establecer y mantener el arco entre el electrodo y las piezas que se van a unir. El porta electrodos sujeta y conecta el electrodo a la fuente de corriente. Puede ser manipulado manualmente por el soldador o ser parte de una máquina automatizada.(Figura 57).

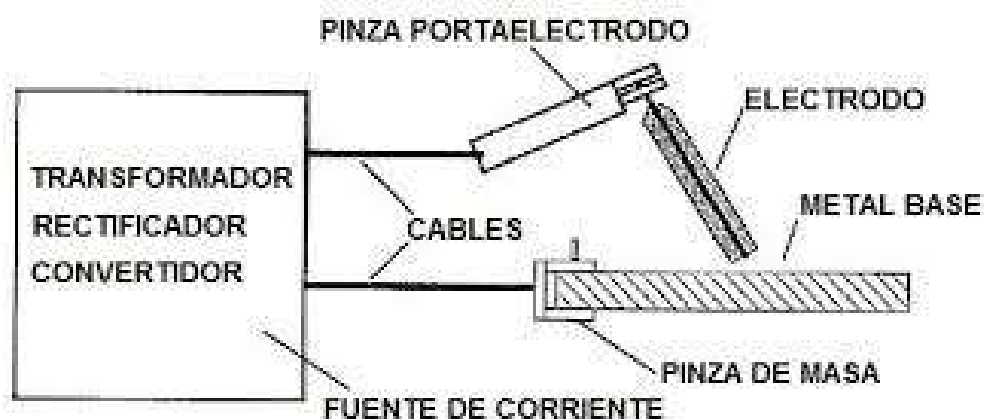


Figura 57: Esquema de funcionamiento de soldadura por electrodo (ingemecánica)

Las piezas que se van a unir se limpian y alinean correctamente. Se eliminan óxidos, pintura y otros contaminantes que puedan afectar la calidad de la soldadura. El soldador selecciona un electrodo que sea apropiado para el tipo de metal base y las condiciones de soldadura requeridas. En la Tabla 12 se muestran los electrodos más comunes y sus características, así como sus aplicaciones. Se golpea el extremo del electrodo contra las piezas que se van a unir, creando un cortocircuito y al retirar rápidamente el electrodo, se genera un arco eléctrico entre el electrodo y las piezas, el arco eléctrico genera suficiente calor para fundir los extremos de las piezas y el revestimiento del electrodo. La parte fundida del electrodo y el material de aporte se depositan en la zona de unión mientras que el revestimiento del electrodo crea un gas protector y una escoria que cubre la soldadura, protegiéndola de la atmósfera y mejorando la calidad de esta.

Tipo	Ácido	Básico	Rutilio
Composición	Óxidos de hierro y manganeso	Carbono cálcico y otros carbonatos	Rutilio (óxidos de titanio)
Características de la escoria	Fluida, porosa y abundante	Poca y densa, se separa fácilmente,	Muy densa y viscosa
Ventajas	Penetración elevada, así como vel. de fusión. Intensidades altas	Muy resistente a la fisuración en frío y caliente	Fácil cebado y manejo del arco. Cordón de soldadura regular y buen aspecto
Desventajas	Solo para metales de contenidos bajos en: azufre, fósforo y carbono.	Difícil manejo, arco muy corto, intensidades bajas.	No tienen efecto limpiador de las posibles impurezas en el cordón
Aplicaciones	Para aceros con bajo contenido en carbono	Para grandes responsabilidades, muy tenaz y válido para grandes espesores y estructuras rígidas	Es el más utilizado, Soldaduras de poca responsabilidad y placas finas.
Posición	Principalmente plana	Todas	Todas muy buenos para posición vertical y bajo techo
Tipo de corriente	CC y CA	CC (Inversa) y raras veces CA	CC y CA

Tabla 12: Características de los electrodos más comunes (Gavilán, 2020)

El soldador controla la velocidad de avance y la dirección del electrodo para asegurar una soldadura uniforme. Después de completar la soldadura en una sección, se permite que la zona de unión se enfríe. Después de que la soldadura se haya enfriado lo

suficiente, se retira la escoria (formada por el recubrimiento del electrodo) de la superficie de la soldadura (Singh, 2011).

VENTAJAS	DESAFÍOS
Portable y versátil	Menos eficiente que otras técnicas
Costos iniciales bajos	Requiere habilidad

Tabla 13: Ventajas y desafíos que presenta la SMAW (Autor)

Es ampliamente utilizado en la industria, especialmente en aplicaciones de construcción, reparación y mantenimiento. Aunque ha sido en parte desplazado por métodos más automatizados y avanzados, sigue siendo una opción importante en muchas situaciones.

Soldadura MIG/MAG (GMAW):

La Soldadura MIG/MAG, que en inglés se conoce como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), es un proceso de soldadura que utiliza un arco eléctrico entre un electrodo de alambre continuo y las piezas que se van a unir. MIG (*Metal Inert Gas*) utiliza gases inertes como argón (Figura 58), mientras que MAG (*Metal Active Gas*) utiliza gases activos como dióxido de carbono.

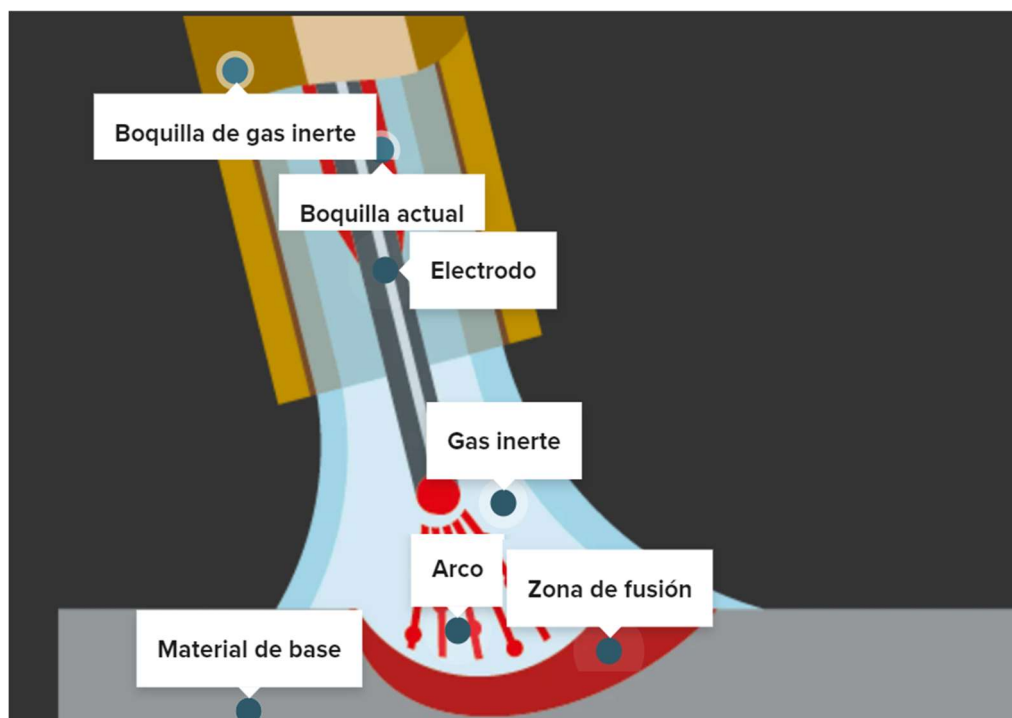


Figura 58: Representación del funcionamiento de la soldadura MIG (lorch.eu)

La soldadura funciona suministrando una fuente de corriente que entrega la energía eléctrica necesaria para mantener el arco entre el electrodo y las piezas que se van a unir, utiliza un alambre de electrodo continuo como material de aporte. Puede estar

hecho de diversos materiales, como acero dulce, acero inoxidable o aluminio. La tobera y la boquilla guían y dirigen el flujo del gas de protección hacia la zona de soldadura, protegiendo el arco y el cordón de soldadura, mientras que la antorcha es la sostiene y guía el electrodo de alambre hacia las piezas que se están soldando.

El alambre de electrodo se alimenta continuamente desde un carrete a medida que se funde y se utiliza ya que el arco eléctrico funde tanto el alambre de electrodo como las piezas que se están soldando, creando un charco de metal fundido. El gas de protección ya sea inerte o activo, se dirige hacia la zona de soldadura para proteger el arco y el cordón de soldadura de la atmósfera circundante. En la Tabla 14 se recogen las ventajas y desafíos presentes en este tipo de soldadura (Singh, 2016).

VENTAJAS	DESAFÍOS
Se deposita material de aporte muy rápidamente	Sensible a contaminación atmosférica
Amplia variedad de usos, acero, inoxidable, aluminio	Requiere habilidad

Tabla 14: Ventajas y desafíos que presenta la GMAW (Autor)

Soldadura TIG (GTAW):

La Soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*), también conocida como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), es un proceso de soldadura que utiliza un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte para proteger el arco y la zona de soldadura. Este método es conocido por su precisión y capacidad para soldar una amplia variedad de metales, incluyendo aluminio y acero inoxidable.

El electrodo puede tener diferentes composiciones, como Wolframio puro o aleaciones de este. Al igual que en el resto de las soldaduras, la fuente de corriente suministra la energía eléctrica para mantener el arco entre el electrodo y las piezas que se están soldando. En este caso se utiliza un gas inerte, como argón o helio, para proteger el arco y la zona de soldadura. La tobera cerámica rodea el electrodo y ayuda a dirigir y enfocar el flujo de gas de protección hacia la zona de soldadura (Figura 59). En algunos casos, se puede utilizar un material de aporte adicional para reforzar la soldadura o agregar material a la unión. La Tabla 15 ilustra las ventajas y desafíos a los que se enfrenta esta soldadura (Singh, 2016).

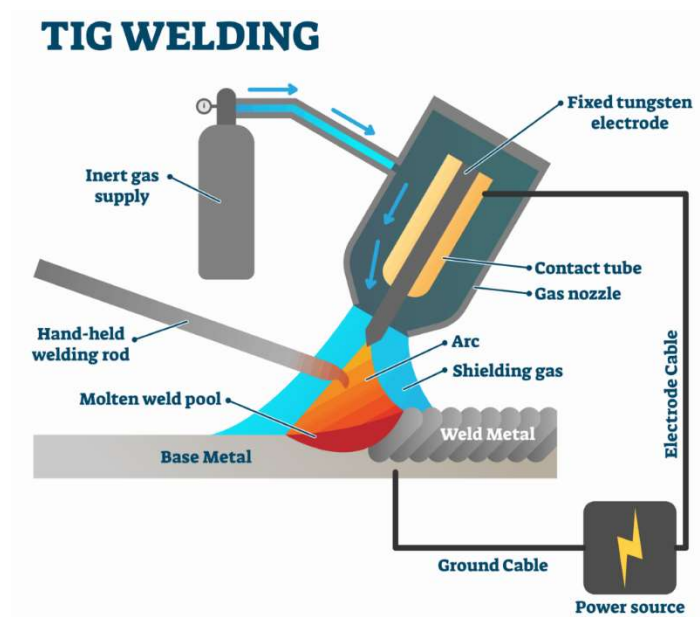


Figura 59: Esquema de soldadura TIG (Technox Machine)

VENTAJAS	DESAFÍOS
Alta calidad del cordón de soldadura	Más compleja que otras técnicas
Amplia variedad de usos, acero, inoxidable, aluminio	Velocidad de depósito menor
Control muy preciso de temperatura y calor	

Tabla 15: Ventajas y desafíos que presenta la GTAW (Autor)

La soldadura TIG es ampliamente utilizada en aplicaciones que requieren alta calidad y precisión, como la fabricación de equipos aeroespaciales, la industria nuclear, la fabricación de componentes electrónicos y la soldadura de tuberías de alta pureza.

Soldadura por arco sumergido (SAW)

La soldadura por arco sumergido (SAW, *Submerged Arc Welding*) es un proceso de soldadura en el que un arco eléctrico se forma entre un electrodo continuo y el material base. La característica distintiva de este proceso es que el arco y la zona de soldadura están "sumergidos" bajo una capa de polvo o granulado fundente. Este método es eficiente, produce soldaduras de alta calidad y es comúnmente utilizado en aplicaciones industriales.

En este tipo de soldadura el electrodo, también se suministra de manera constante a través de un conjunto de alimentación a la vez que un lecho de polvo fundente cubre

la zona de soldadura. Este material fundente ayuda a proteger el arco y la piscina de fusión del aire y proporciona propiedades adicionales a la soldadura. Se utiliza una fuente de corriente eléctrica para crear y mantener el arco entre el electrodo y el material base. (Figura 60).



Figura 60: Soldadura SAW (thefabricator.com)

La capa de fundente ayuda a prevenir la formación de humos y protege el arco de la atmósfera circundante. La capa de fundente contribuye a la limpieza de la soldadura. La fusión del material base y del electrodo crea una piscina de fusión que se solidifica a medida que se mueve hacia adelante con la alimentación continua del electrodo haciendo que el fundente forme una escoria que protege la soldadura mientras se enfría y ayuda en la solidificación. Después de la soldadura, la escoria resultante se retira. Puede eliminarse mecánicamente o mediante procesos de desbaste.

La Soldadura por arco sumergido es particularmente valiosa en aplicaciones que requieren eficiencia y producción en masa, como en la fabricación de estructuras metálicas y en la construcción naval (Tabla 16) (Singh, 2016).

VENTAJAS		APLICACIONES COMUNES	
Eficiencia	Adecuado para soldar grandes longitudes en una pasada	Estructuras metálicas	Vigas, columnas, planchas...
Buena calidad	Soldaduras buenas y con propiedades consistentes	Construcción Naval	Secciones, planchas, vigas, varengas...
Productividad	Muy buena para producción en masa y estructuras de acero	Recipientes a presión y tuberías	Tanques, recipientes, tuberías de gran longitud

Tabla 16: Ventajas y aplicaciones comunes de la soldadura SAW (Autor)

Soldadura por haz de electrones (EBW):

La soldadura por haz de electrones (EBW, *Electron Beam Welding*) es un proceso de soldadura que utiliza un haz de electrones de alta energía para fundir y unir materiales metálicos. Este método es conocido por su capacidad para producir soldaduras de alta calidad y por su aplicación en entornos de alta tecnología, como la industria aeroespacial y la fabricación de componentes electrónicos.

La Soldadura por Haz de Electrones es utilizada en situaciones donde la precisión y la calidad de la soldadura son críticas. Aunque puede ser más costosa y compleja que otros métodos, ofrece beneficios significativos en términos de control y calidad en aplicaciones de alta tecnología y entornos especializados.

Soldadura por fricción (FW):

La soldadura por fricción (FW, *Friction Welding*) es un proceso de soldadura en el cual las piezas que se van a unir son sometidas a fricción para generar calor, y luego se unen cuando están en estado plástico o semilíquido debido al calor generado. Este método de soldadura se utiliza comúnmente para unir materiales metálicos, especialmente aquellos que pueden ser difíciles de soldar mediante otros métodos. Es eficaz para materiales termoplásticos y algunas aleaciones metálicas.

Soldadura por fricción y agitación (FSW):

La soldadura por fricción y agitación (FSW, *Friction Stir Welding*) es un proceso de soldadura sólida en el que el calor necesario para la fusión de los materiales se genera mediante la fricción entre una herramienta de soldadura rotativa y las piezas que se están uniendo. A diferencia de otros métodos de soldadura, no implica la fusión completa de los materiales, sino que crea una unión a través de la agitación plástica del material.

Soldadura por láser (LBW):

La soldadura por láser (LBW, *Laser Beam Welding*) utiliza un rayo láser para fundir y unir metales. Es utilizado en aplicaciones que requieren alta precisión y se encuentra comúnmente en la fabricación de dispositivos electrónicos y la industria médica.

Soldadura por ultrasonido:

La soldadura por ultrasonido es un proceso de unión de materiales que utiliza vibraciones ultrasónicas de alta frecuencia para generar calor y fundir las áreas de contacto entre las piezas que se están soldando. Este método es especialmente efectivo para unir materiales termoplásticos, aunque también se utiliza en ocasiones para soldar materiales metálicos y otros tipos de materiales.

Soldadura por plasma (PAW):

La soldadura por plasma utiliza un arco eléctrico y un gas ionizado (plasma) para fundir los metales.

La soldadura por plasma (PAW, *Plasma Arc Welding*) es un proceso de soldadura que utiliza un arco de plasma para fundir y unir materiales metálicos. El arco de plasma se forma entre un electrodo no consumible y la pieza de trabajo, y se utiliza un gas inerte para proteger el arco y la zona de soldadura de la atmósfera circundante. Es utilizado en aplicaciones que requieren alta precisión y control, como la fabricación de dispositivos médicos.

Los adhesivos estructurales están ganando popularidad en la construcción naval, especialmente cuando se trabaja con materiales compuestos. Estos adhesivos pueden proporcionar una unión eficaz y uniforme sin necesidad de perforar los materiales. Es crucial seleccionar adhesivos que sean resistentes al agua de mar y a las condiciones marinas.

2.4.3. Unión de materiales compuestos (Adhesivos)

Los adhesivos estructurales son sustancias que se utilizan para unir materiales en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia mecánica y durabilidad. Estos adhesivos están diseñados para proporcionar una unión fuerte y duradera, a menudo comparable o incluso superior a otras formas de unión, como la soldadura o el remachado. La Tabla 17 expone las ventajas que presenta el uso de adhesivos como elementos de unión (*EPOLAM 2017; Henkel Adhesives; Unión de vidrio; Uniones Adhesivas*).

Para más detalle acerca de los adhesivos y las uniones se recomienda consultar el trabajo de Juan C Suárez Bermejo, investigador de la Universidad Politécnica de Madrid (*Juan C Suárez-Bermejo*).

Principios básicos de los adhesivos estructurales:

- **Adhesión:** La adhesión es la capacidad del adhesivo para unirse a las superficies de los materiales. Los adhesivos estructurales están formulados para adherirse eficazmente a una variedad de materiales, incluyendo metales, plásticos, compuestos y otros.
- **Cohesión:** La cohesión se refiere a la capacidad del adhesivo para mantenerse unido a sí mismo. Los adhesivos estructurales deben tener una alta cohesión para resistir las fuerzas de corte, tracción, flexión....
- **Curado:** La mayoría de los adhesivos estructurales requieren un proceso de curado para alcanzar su resistencia completa. El curado puede implicar la reacción química del adhesivo, la evaporación de solventes o la polimerización. Durante este proceso, el adhesivo se endurece y forma una unión sólida con las superficies de unión.



Figura 61: Adhesivo estructural de cianoacrilato y acrílico marca Loctite (Henkel-adhesives.com)

Tipos comunes de adhesivos estructurales:

- **Epoxis:** Los adhesivos epoxi son conocidos por su alta resistencia y durabilidad. Se componen de una resina y un endurecedor que reaccionan químicamente durante el curado.
- **Acrílicos:** Los adhesivos acrílicos ofrecen buenas propiedades de adherencia y resistencia a la intemperie. Son versátiles y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la unión de plásticos hasta la unión de metales. Ejemplo (Figura 61).
- **Cianoacrilatos:** También conocidos como súper pegamentos, los cianoacrilatos curan rápidamente y son adecuados para uniones rápidas y en aplicaciones donde la precisión y la velocidad son esenciales. Ejemplo (Figura 61).
- **Poliuretanos:** Los adhesivos de poliuretano son flexibles y tienen una buena resistencia a la humedad. Son adecuados para materiales flexibles y ofrecen cierta capacidad de absorción de impactos.

VENTAJAS DE LOS ADHESIVOS	
Distribuyen las cargas uniformemente por toda la unión	Pueden unir materiales diferentes
No requieren de agujerear las superficies como el remachado	Amortiguan vibraciones, mejorando la resistencia a fatiga

Tabla 17: Ventajas que presentan los adhesivos (Autor)

Los adhesivos estructurales y las matrices de los composites son dos tipos de materiales distintos con propósitos y funciones diferentes en la fabricación de materiales compuestos, es importante la diferenciación ya que a veces pueden llevar a confusión.

Los adhesivos estructurales son sustancias utilizadas para unir materiales de manera permanente. Estos adhesivos se aplican entre las superficies de los sustratos que se desean unir y se curan para formar una unión fuerte y duradera. Se utilizan comúnmente para ensamblar componentes estructurales, proporcionando una conexión continua y distribuyendo las cargas a lo largo de la interfaz de unión, ofreciendo ventajas como la eliminación de puntos donde se concentran tensiones.

Las matrices de los materiales compuestos son materiales poliméricos que actúan como el "pegamento" que mantiene las fibras del refuerzo (como fibras de vidrio, carbono o kevlar) en su lugar. Estas matrices, comúnmente conocidas como resinas, se combinan con los refuerzos para formar materiales compuestos estructurales.

Aunque ambos tipos de materiales se utilizan en aplicaciones estructurales, los adhesivos se centran en la unión de sustratos, mientras que las matrices de materiales compuestos forman parte integral de los materiales compuestos al mantener y distribuir las fibras de refuerzo.

Las resinas epoxi son un ejemplo de un material que puede desempeñar roles tanto como adhesivo estructural como matriz en materiales compuestos. La versatilidad de las resinas epoxi se debe a sus propiedades adhesivas excepcionales y su capacidad para formar matrices fuertes en materiales compuestos. La Tabla 18 recoge los aspectos diferenciadores para cada uso.

RESINAS EPOXY	
ADHESIVOS	MATRICES
Excelente adhesión	Unión de fibras
Alta resistencia mecánica	Combinado con las fibras crean un material con propiedades mejoradas
Llenado y sellado de espacios irregulares	
DIFERENCIA DE USOS	
Se aplica directamente	Se combina con otro material

Tabla 18: Resinas epoxi, diferenciación entre su uso como adhesivo o matriz (Autor)

Existen varios tipos de adhesivos estructurales utilizados en diversas aplicaciones, y la elección del adhesivo depende de factores como el tipo de materiales a unir, las condiciones de servicio, el entorno y los requisitos específicos de la aplicación (Figura 62). En la Tabla 19, se mencionan algunos de los adhesivos estructurales más utilizados:

Tipo de Adhesivo	Propiedades	Aplicaciones
Adhesivos epoxy	Excelente resistencia mecánica, alta adhesión a varios materiales, buena resistencia química, alta durabilidad y resistencia a la temperatura.	Industria aeroespacial, construcción y reparación, fabricación de componentes electrónicos, unión de metales, plásticos y compuestos.
Adhesivos acrílicos	Buena resistencia a la intemperie, resistencia a los rayos UV, excelente adhesión a plásticos y metales, variedades de curado rápido disponibles.	Montaje de paneles, unión de plásticos, industria automotriz, construcción de vehículos recreativos.
Adhesivos de poliuretano	Flexibilidad, buena resistencia a la humedad, resistencia a impactos y vibraciones, buena adhesión a diversos sustratos.	Construcción de carrocerías de vehículos, fabricación de muebles, unión de materiales diversos.
Adhesivos de cianoacrilato	Curado rápido, alta adhesión a diversos sustratos, buena resistencia a la tracción, amplia variedad de viscosidades disponibles.	Unión de plásticos y caucho, reparaciones rápidas, fabricación de productos electrónicos, uso médico en ciertas aplicaciones.
Adhesivos de metacrilato	Buena resistencia a la intemperie, alta resistencia estructural, amplio rango de temperatura de servicio, buena adhesión a metales y plásticos.	Montaje de paneles y componentes, unión de materiales plásticos, construcción de vehículos comerciales.
Adhesivos de poliéster y viniléster	Buena resistencia química, resistencia al impacto, amplio rango de temperatura de servicio, adecuados para aplicaciones marinas.	Construcción naval, fabricación de piezas compuestas, reparación de estructuras.

Tabla 19: Tipos de adhesivos, características principales y su ámbito de aplicación (Autor)

La elección del adhesivo estructural adecuado requiere un análisis cuidadoso de la compatibilidad de materiales, las condiciones de servicio y los requisitos específicos para asegurar una unión efectiva y duradera. En muchos casos, los ingenieros y diseñadores eligen adhesivos estructurales en función de las propiedades específicas requeridas para la aplicación prevista (Andrés Roiz, 2014).



Figura 62: Ensamblaje de la cubierta y del casco con adhesivo estructural (boatindustry.es)

2.4.4. Unión entre materiales compuestos y acero

La unión entre acero y materiales compuestos presenta desafíos particulares debido a las diferencias inherentes en las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales. Sin embargo, hay métodos y técnicas que se utilizan para lograr uniones efectivas.

Antes de realizar la unión, las superficies de acero y compuesto deben prepararse adecuadamente. Esto implica limpiar las superficies para eliminar contaminantes y aplicar tratamientos que mejoren la adhesión. Se utilizan adhesivos estructurales diseñados para unir acero y materiales compuestos. Los adhesivos epoxi son comúnmente utilizados debido a su capacidad para adherirse a una variedad de materiales. Se pueden aplicar revestimientos o tratamientos a las superficies para mejorar la adhesión. Por ejemplo, el acero puede ser tratado para aumentar la capacidad de adherencia del adhesivo, creando surcos o rugosidades en la superficie del acero para mejorar la retención del adhesivo. Además de los adhesivos, pueden emplearse elementos de unión mecánica, como remaches o pernos, para reforzar la

unión entre acero y materiales compuestos. Esto se utiliza a menudo en aplicaciones estructurales. Durante el proceso de ensamblaje, se debe tener un control cuidadoso de la alineación y la presión para asegurar una unión uniforme y evitar la formación de burbujas de aire. (Ribeiro et al., 2016; Zhou et al., 2019).

Después de realizar la unión, se deben realizar evaluaciones y pruebas para garantizar la calidad y la integridad de la unión. Esto puede incluir pruebas no destructivas y evaluación visual.

La preparación adecuada de las superficies es esencial para lograr uniones fuertes y duraderas entre materiales como el acero y los compuestos. En la Figura 63 se describen los pasos típicos para preparar las superficies antes de realizar la unión:

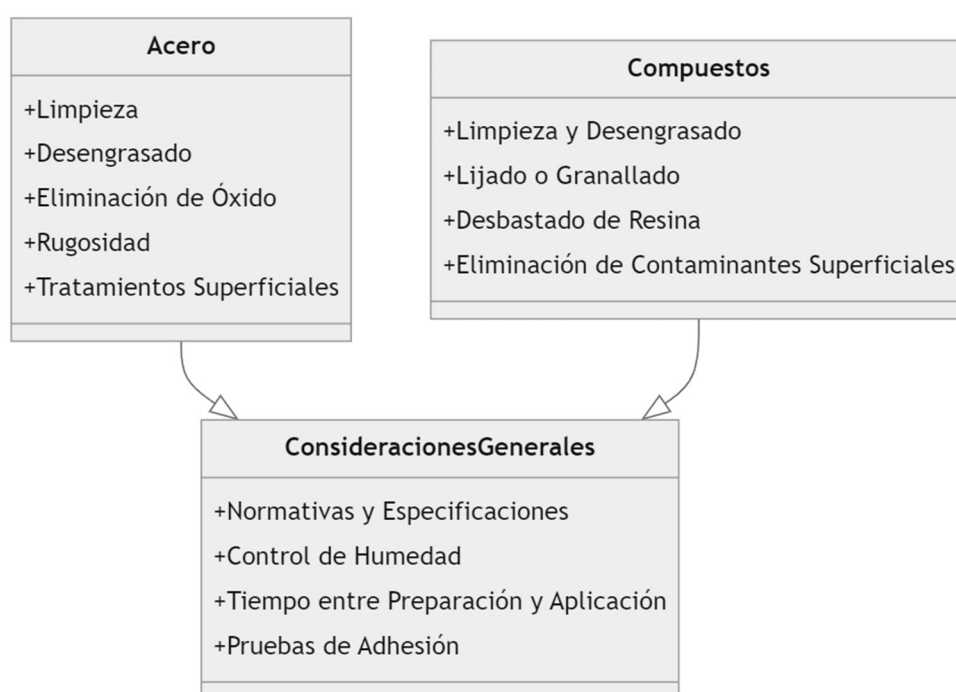


Figura 63: Esquema de preparación de acero y composites para su unión y aspectos para tener en cuenta (Autor)

La preparación adecuada de las superficies es una fase crítica en el proceso de unión, ya que afecta directamente la eficacia y durabilidad de la unión final. Cada tipo de material ya sea acero o compuesto, puede requerir consideraciones específicas según las propiedades y la composición del material.

En el proceso de fabricación y ensamblado, se llevan a cabo diversas pruebas para asegurar la calidad y conformidad del producto. Estas pruebas (Tabla 20) pueden variar según la naturaleza del producto y los materiales utilizados.

TIPO DE PRUEBA	DESCRIPCIÓN	HERRAMIENTAS UTILIZADAS
Pruebas dimensionales	Verificación de dimensiones críticas del producto para asegurar cumplimiento con especificaciones	Calibradores, micrómetros, máquinas de medición por CMM
Pruebas de ajuste y tolerancia	Evaluación de tolerancias dimensionales y ajuste correcto entre componentes	Calibradores, medidores de espesor, herramientas de ajuste
Pruebas de torque y fijación	Verificación del torque en tornillos y sujetadores para integridad estructural y funcional	Llaves de torque, herramientas de medición de torque
Pruebas de resistencia mecánica	Evaluación de resistencia mecánica bajo carga para garantizar rendimiento esperado	Máquinas de ensayo de tracción, compresión o flexión
Pruebas de impacto	Evaluación de resistencia a impactos, especialmente relevante en aplicaciones críticas	Máquinas de impacto
Pruebas de vibración	Evaluación del comportamiento bajo vibraciones para simular condiciones del mundo real	Sistemas de prueba de vibración
Pruebas de fatiga	Evaluación del rendimiento bajo ciclos repetidos para simular condiciones de uso a largo plazo	Máquinas de ensayo de fatiga
Pruebas de hermeticidad	Verificación de estanqueidad para prevenir fugas o intrusiones no deseadas	Equipos de prueba de hermeticidad, pruebas de sellado
Pruebas de funcionamiento	Verificación de funcionamiento bajo diversas condiciones de operación	Pruebas funcionales específicas del producto
Ensayos no destructivos	Inspecciones sin dañar para detectar defectos internos, grietas o irregularidades	Ultrasonido, radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes

Tabla 20: Pruebas para comprobar una unión (Autor)

La selección de pruebas depende del tipo de producto, su uso previsto y los estándares de calidad de la industria. En muchos casos, se realiza una combinación de estas pruebas para garantizar la calidad y la conformidad del producto.

Esta es la situación actual en cuanto a la construcción con acero y materiales compuestos, una vez expuesta, nos da pie al siguiente apartado, donde se expondrán tendencias futuras y se plantearan escenarios que pueden llegar.

2.5. Tendencias Futuras y planteamientos realistas en el ámbito de la construcción naval

El cambio hacia la construcción naval sostenible no sólo ha transformado los aspectos técnicos de la industria, sino que también ha generado un impacto más amplio en la percepción y la dirección futura del sector. La adopción de materiales compuestos por las empresas ha contribuido significativamente a la alineación con los objetivos de sostenibilidad del sector naval, marcando un hito en la transición hacia prácticas más respetuosas con el medio ambiente y eficientes en el uso de recursos. Este enfoque no solo satisface las demandas actuales de la industria, sino que también sienta las bases para el futuro de la construcción naval a nivel global.

La investigación constante en la construcción naval se centra en desarrollar materiales aún más avanzados, como aleaciones de acero de alta resistencia y materiales compuestos mejorados. La integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial para optimizar el diseño, también está en aumento.

2.5.1. Tendencias futuras en la construcción naval: expansión del uso de materiales compuestos en barcos más grandes.

En la proyección hacia el futuro de la construcción naval, las aplicaciones de materiales compuestos en barcos emergen como un horizonte prometedor, impulsado por la necesidad de abordar desafíos específicos y aprovechar las oportunidades que estas innovadoras soluciones pueden ofrecer. La expansión de estos materiales en embarcaciones de gran envergadura se vislumbra como una respuesta estratégica para optimizar el rendimiento y la eficiencia operativa en la navegación de larga distancia.

En este contexto, los materiales compuestos ofrecen un potencial revolucionario al proporcionar una combinación única de resistencia estructural, ligereza y resistencia a la corrosión. Barcos que incorporan estas características pueden beneficiarse significativamente en términos de reducción de peso, lo que no solo contribuye a una mayor eficiencia en el consumo de combustible, sino que también facilita un diseño más versátil y personalizado. Además, la capacidad de adaptarse a formas más complejas y a geometrías específicas de la embarcación permite una mayor

flexibilidad en el diseño, lo que podría traducirse en un mejor rendimiento hidrodinámico y, por ende, una navegación más eficiente.

En un panorama más amplio, la integración de materiales compuestos en barcos de gran escala no solo se limita a la optimización del rendimiento. También abre la puerta a la implementación de tecnologías innovadoras, como sensores integrados para el monitoreo estructural, sistemas de energía renovable y técnicas avanzadas de fabricación, consolidando así una visión futurista de la construcción naval que va más allá de la mera sustitución de materiales tradicionales. Este enfoque proactivo hacia el futuro de los materiales compuestos en la construcción de barcos grandes anticipa una era de embarcaciones más eficientes, sostenibles y adaptadas a los desafíos únicos que presenta la navegación de larga distancia en este siglo.

2.5.1.1. Tendencias futuras

Mejora de propiedades específicas y nanoestructura

Se espera que la investigación en nanotecnología y procesos de fabricación avanzados mejore las propiedades de la fibra de carbono, haciéndola más resistente y ligera. La nanotecnología ofrece la posibilidad de manipular las propiedades de la fibra de carbono a una escala molecular. De esta forma la introducción de nanomateriales reforzará aún más la estructura de la fibra, mejorando su resistencia y rigidez (Sharma et al., 2014). La mejora en los procesos de fabricación, como la deposición química de vapor y la pirólisis, (Pierson & Lieberman, 1975; Rong et al., 2013) permitir una disposición más precisa de las fibras de carbono, contribuyendo a un material más homogéneo y resistente. La combinación estratégica de la fibra de carbono con otros materiales, como nanopartículas cerámicas o polímeros específicos, podría generar compuestos híbridos con propiedades mejoradas en términos de resistencia, peso y durabilidad (González Julián, 2012; Javier Hernández Rueda et al; Maiorano Lauría, 2022).

Con un creciente enfoque en la sostenibilidad, se anticipa la investigación y desarrollo de materiales compuestos biodegradables para componentes no críticos como paneles interiores, revestimientos o accesorios no estructurales, minimizando riesgos y maximizando beneficios ambientales. Una investigación centrada en el desarrollo de materiales compuestos que utilizan recursos renovables, como bioplásticos y fibras naturales. Esto reduce la dependencia de materias primas no renovables. Se busca la creación de compuestos que puedan descomponerse de manera controlada, especialmente en entornos marinos, donde la biodegradabilidad puede ser esencial. Esto ayudaría a reducir la acumulación de desechos plásticos en los océanos (*Experience ACCIONA*; US Department of Commerce).

Se busca no sólo la biodegradabilidad sino también la sostenibilidad en todo el ciclo de vida del material, desde la producción hasta la disposición final, promoviendo prácticas ecológicas en la industria.

Estas prácticas no solo responden a las demandas de eficiencia y rendimiento, sino que también posicionan a los constructores navales como líderes en prácticas sostenibles y socialmente responsables. Las empresas que adopten prácticas sostenibles y lideren iniciativas de reciclaje en la construcción naval no solo cumplirán con las expectativas ambientales, sino que también podrían diferenciarse positivamente en el mercado.

Este desarrollo continuo está orientado hacia la mejora de propiedades específicas y la promoción de la sostenibilidad en la construcción naval, alineándose con las tendencias actuales hacia una industria más ecológica y eficiente.

Materiales inteligentes y con capacidad de autoreparación

La incorporación de sensores en materiales compuestos permitiría un monitoreo en tiempo real de la integridad estructural, facilitando el mantenimiento predictivo y mejorando la seguridad. La incorporación de sensores en materiales compuestos permitirá un monitoreo constante de la integridad estructural de la embarcación. Estos sensores pueden detectar cambios en la tensión, la temperatura y otros factores clave en tiempo real (Yu et al., 2021). La capacidad de monitoreo en tiempo real facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo. Los datos recopilados por los sensores pueden ser analizados para prever posibles problemas antes de que se vuelvan críticos, reduciendo el tiempo de inactividad y los costos asociados, permitiendo a los operadores tomar decisiones informadas basadas en el estado actual de la embarcación.

Investigaciones en materiales compuestos con capacidad de autoreparación podrían cambiar la forma en que se abordan los daños menores en el entorno marino, reduciendo costos de mantenimiento. La investigación en materiales compuestos con capacidades de autoreparación se centra en la incorporación de microcápsulas o nanotubos que pueden liberar agentes reparadores en respuesta a daños (Yongjing Wang & Ji, 2015). Esto cierra automáticamente grietas o fisuras. La detección temprana y la reparación automática de pequeños daños pueden evitar problemas mayores.

La capacidad de autoreparación tiene el potencial de cambiar drásticamente la forma en que se abordan los daños menores en el entorno marino. Al reducir la necesidad de intervenciones manuales para reparaciones, se disminuyen los costos de mantenimiento y se mejora la eficiencia operativa. La autoreparación no solo reduce los costos, sino que también contribuye a la prolongación de la vida útil de los materiales compuestos. Este aspecto es especialmente valioso en aplicaciones marinas donde la corrosión y el desgaste son desafíos constantes.

La capacidad de los materiales compuestos para monitorear su propio estado y realizar reparaciones automáticas mejora la fiabilidad general de las estructuras navales. Esto es esencial para garantizar la seguridad y la funcionalidad de las embarcaciones. La capacidad de autoreparación también contribuye a la reducción de residuos, ya que se pueden evitar reemplazos frecuentes de materiales dañados. Esto se alinea con la creciente conciencia ambiental en la industria.

En resumen, la integración inteligente de materiales en la construcción naval, mediante sensores integrados y tecnología de autoreparación, no solo mejoraría la eficiencia operativa y la seguridad, sino que también representa un paso importante hacia la sostenibilidad y la reducción de costos a largo plazo. Estos avances son fundamentales para la evolución de la construcción naval hacia prácticas más innovadoras y eficientes.

Simulaciones avanzadas e inteligencia artificial

Herramientas de diseño basadas en inteligencia artificial podrían revolucionar la forma en que se conciben las estructuras, permitiendo diseños más eficientes y ligeramente personalizados para cumplir con requisitos específicos de cada embarcación. El uso de modelos computacionales más sofisticados implica la aplicación de algoritmos y software avanzados que pueden simular con mayor precisión el comportamiento de estructuras híbridas compuesto-acero bajo diversas condiciones de carga y entornos marinos.

La topología generativa utiliza algoritmos de inteligencia artificial para explorar automáticamente múltiples diseños posibles en función de los criterios especificados (*El diseño generativo en IA redefine el proceso de ingeniería*). Esto puede revolucionar la forma en que se conciben las estructuras, permitiendo la creación de formas altamente eficientes y personalizadas. Las herramientas de topología generativa serían capaces de adaptarse a requisitos específicos de cada embarcación. Esto significa que el diseño de la estructura puede ser optimizado para cumplir con las necesidades únicas de carga, resistencia y rendimiento de cada tipo de barco. La capacidad de personalización que ofrece la topología generativa es crucial en la construcción naval, donde cada tipo de barco tiene requisitos únicos. Esto permite diseños más adaptados a funciones específicas, como cargueros, buques de investigación o yates.

La capacidad de realizar simulaciones detalladas y optimizadas de forma continua a lo largo del proceso de diseño facilita la mejora iterativa, permitiendo ajustes en tiempo real y la identificación de soluciones más eficientes. Al permitir la creación de estructuras que utilizan solo el material necesario para cumplir con los requisitos de rendimiento, la topología generativa contribuye a la reducción del desperdicio de material, lo que es fundamental en términos de sostenibilidad. Esto contribuye directamente a la eficiencia en el consumo de combustible, ya que se logran diseños más ligeros y aerodinámicos e hidrodinámicos. (Ivaldi et al., 2022; Liu et al., 2020)

La simulación avanzada no sólo optimiza para la eficiencia, sino también la seguridad. La capacidad de prever y modelar el comportamiento estructural bajo diversas condiciones contribuye a la mejora de la seguridad operativa de las embarcaciones.

El uso de simulaciones avanzadas y herramientas de topología generativa representa un avance significativo en el diseño y la optimización de estructuras en la construcción naval. Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia y el rendimiento, sino que también permiten una mayor adaptabilidad a las necesidades específicas de cada embarcación, impulsando la innovación y la sostenibilidad en la industria.

Sostenibilidad y reciclaje

A medida que la tecnología avanza, se espera que se establezcan normativas específicas para la aplicación de materiales compuestos en la construcción naval, garantizando la seguridad y confiabilidad de las embarcaciones.

Se anticipa la implementación de certificaciones más rigurosas para la calidad y resistencia de las estructuras compuestas, respaldando la confianza en estos materiales. (Figura 64).

La adopción de materiales compuestos reciclables es esencial para reducir el impacto ambiental de la construcción naval. Se espera que los fabricantes se comprometan a utilizar compuestos que puedan ser desmontados y reciclados al final de la vida útil de la embarcación.

La sostenibilidad también abarca los procesos de producción. La construcción naval buscará métodos de fabricación con una huella de carbono reducida, utilizando fuentes de energía renovable. El compromiso ambiental se reflejará en la búsqueda de certificaciones y estándares ambientales reconocidos. La industria buscará demostrar su responsabilidad ambiental a través de la adopción de prácticas y materiales sostenibles.

Una de las metas del desarrollo sostenible, dentro del objetivo 12, concretamente la 12.6 dice así: “Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes” parece ser que poco a poco va calando y cada vez hay más empresas que cumple con esta y otras metas, sin ir más lejos en este trabajo ya se han mencionado dos empresas pioneras en la construcción naval, que tienen muy presente esto en los valores de su empresa.(*Desarrollo Sostenible*)

Con el aumento de la conciencia ambiental, se desarrollarán tecnologías para facilitar el desmantelamiento y reciclaje de barcos al final de su vida útil, minimizando residuos y maximizando la reutilización de materiales. A medida que la flota de barcos envejece, se espera el desarrollo de tecnologías avanzadas para facilitar el desmantelamiento y reciclaje de barcos. Esto implica métodos que maximizan la recuperación de materiales valiosos y minimizan la generación de residuos.

La incorporación de sistemas de identificación de materiales facilitará el proceso de reciclaje al permitir la separación eficiente de componentes reciclables y no reciclables. Esto puede incluir el uso de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) o códigos de barras que proporcionen información sobre la composición de los materiales.

Además del reciclaje de materiales, se espera que la reutilización de componentes sea una práctica común. Piezas estructurales o sistemas que estén en buen estado podrían



Figura 64: Circunferencia formada por los colores de cada uno de los objetivos de desarrollo sostenible (un.org)

ser reutilizados en la construcción de nuevas embarcaciones, reduciendo la necesidad de fabricación de componentes completamente nuevos. La adopción de materiales compuestos reciclables y métodos de producción sostenibles impactará la cadena de suministro, impulsando la demanda de proveedores que cumplan con criterios ambientales.

El enfoque en la sostenibilidad y el reciclaje fomentará una mayor conciencia del ciclo de vida de las embarcaciones en la industria. Los constructores navales considerarán no solo la eficiencia operativa, sino también el impacto ambiental a lo largo de toda la vida útil de la embarcación.

El compromiso con la sostenibilidad y el reciclaje en la construcción naval representa una dirección fundamental para la industria. La adopción de prácticas y materiales sostenibles no solo cumple con las demandas ambientales actuales, sino que también prepara a la industria para un futuro en el que la responsabilidad ambiental será un factor crítico en la toma de decisiones y en la competitividad del mercado.

En resumen, las tendencias futuras en la construcción naval apuntan hacia el desarrollo de materiales más avanzados, la integración de tecnologías inteligentes en el diseño y la producción, un enfoque más pronunciado en la sostenibilidad y el establecimiento de estándares más rigurosos para garantizar la seguridad y fiabilidad de las embarcaciones. Estos avances tienen el potencial de transformar la industria y llevarla hacia un futuro más eficiente y respetuoso con el medio ambiente. En la Tabla 21 se encuentra toda esta información condensada con los aspectos más relevantes.

ASPECTO	DESARROLLO	APLICACIÓN	IMPACTO
Mejora de propiedades y nanoestructura	Nanotecnología y procesos avanzados	Fibra de carbono, compuestos híbridos	Mayor resistencia, ligereza y sostenibilidad
Materiales inteligentes y autoreparación	Sensores y nanotubos	Monitoreo estructural, reparación automática	Mantenimiento predictivo, reducción de costos y desperdicio
Simulaciones avanzadas e inteligencia artificial	IA y topología generativa	Diseño eficiente y personalizado	Eficiencia, adaptabilidad y seguridad mejoradas
Sostenibilidad y Reciclaje	Normativas, certificaciones, materiales reciclables	Procesos de producción y reciclaje	Reducción de impacto ambiental, responsabilidad social

Tabla 21: Tabla resumen de las tendencias futuras en la construcción naval (Autor)

2.5.1.2. *Expansión del uso de materiales compuestos en barcos más grandes*

La expansión del uso de materiales compuestos en la construcción naval, especialmente en barcos más grandes, es una tendencia con implicaciones significativas. (Lowde et al., 2022)

Aunque los materiales compuestos ofrecen ventajas, las regulaciones de la Organización Marítima Internacional (IMO)(*International Maritime Organization*, s. f.) tradicionalmente han requerido que los barcos comerciales se construyan en acero debido a las normas de Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS)(*Convenio SOLAS*). La normativa SOLAS exigía que los barcos comerciales fueran construidos en acero hasta que la MSC/Circ.1002 permitió diseños alternativos en 2002. A pesar de que desde este año se han permitido diseños alternativos, el proceso para demostrar que un diseño y construcción alternativos (por ejemplo, de materiales compuestos) son equivalentes al acero es largo, costoso y aún puede resultar en una decisión negativa por lo que hoy en día la gran mayoría de armadores se siguen decantando por construir con acero.

En 2017, la IMO emitió nuevas pautas (MSC.1/Circ.) para el uso de composites en barcos comerciales. Dos consorcios europeos, FIBRESHIP (*FibreShip*) y RAMSSES (*Ramsses Project*), respaldados por la red europea E-LASS, lideran proyectos de demostración para superar las barreras en la construcción ligera de barcos con composites. Estos proyectos incluyen demostraciones de rendimiento estructural y contra incendios, así como el desarrollo de nuevas rutas para la certificación y métodos de producción.(*CompositesWorld*)

La reducción de peso es crítica para embarcaciones de gran tamaño, ya que impacta directamente en la eficiencia del combustible y la capacidad de carga. Los materiales compuestos ofrecen una alternativa más liviana en comparación con los metales tradicionales. La reducción de peso y la capacidad de diseñar formas más aerodinámicas gracias a los materiales compuestos contribuirán a una mayor eficiencia de combustible en barcos más grandes. La flexibilidad en la forma y el diseño que ofrecen los compuestos permitirá la creación de cascos más eficientes desde el punto de vista hidrodinámico. La resistencia a la corrosión de los materiales compuestos es una ventaja clave en ambientes marinos. Para barcos más grandes que enfrentan largos períodos en el agua, esta propiedad se vuelve aún más crucial para la vida útil y el mantenimiento.

La durabilidad de los compuestos puede resultar en menores costos de mantenimiento a lo largo del tiempo, especialmente en comparación con materiales tradicionales que pueden requerir tratamientos anticorrosivos frecuentes.

La adopción de tecnologías de fabricación avanzadas, como la impresión 3D de compuestos, podría simplificar la construcción de secciones más grandes y complejas de barcos compuestos, facilitando la construcción de embarcaciones de mayor envergadura. A medida que la producción de compuestos a gran escala se vuelva más común, es probable que los costos de fabricación disminuyan, haciendo que los barcos

compuestos sean más asequibles y competitivos en el mercado. La investigación continua en nuevos materiales compuestos, como nanocompuestos y compuestos reforzados con fibras avanzadas, podría llevar a materiales con propiedades mejoradas, como mayor resistencia y rigidez.

A pesar de las numerosas ventajas que ofrecen los materiales compuestos en la construcción naval, hay varios desafíos que deben superarse para lograr una implementación exitosa y generalizada en barcos más grandes:

Los materiales compuestos a menudo tienen costos iniciales más altos en comparación con los materiales tradicionales, como el acero. Superar este desafío requerirá avances en procesos de fabricación eficientes, economías de escala y la disponibilidad de materiales compuestos a precios más competitivos. La construcción naval está sujeta a normativas estrictas para garantizar la seguridad de las embarcaciones. Establecer normativas y certificaciones específicas para barcos construidos con materiales compuestos es esencial. La estandarización y la aceptación reguladora son fundamentales para la confianza del sector y de los usuarios finales.

Se necesitan modelos de simulación y análisis estructural sofisticados para garantizar que las embarcaciones cumplan con los estándares de seguridad y rendimiento. Aunque los materiales compuestos de matriz polimérica son resistentes a la corrosión, otros desafíos, como la delaminación o el agrietamiento, se deben abordar en profundidad para garantizar la durabilidad a largo plazo. Además, los métodos de reparación y mantenimiento de barcos compuestos deben ser eficientes y rentables. Escalar la producción de componentes compuestos a tamaños de barcos más grandes puede presentar desafíos logísticos y de capacidad. Las instalaciones de producción deben adaptarse para manejar secciones más grandes y complejas de manera eficiente.

La implementación exitosa de materiales compuestos en la construcción naval requiere que los profesionales de la industria estén familiarizados con los métodos de diseño, fabricación y mantenimiento específicos de estos materiales. Programas de educación y capacitación son esenciales para preparar a la fuerza laboral para los desafíos asociados con los compuestos.

Mejorar la resistencia a impactos y fatiga de los materiales compuestos es esencial, especialmente en entornos marinos donde las embarcaciones están sujetas a condiciones adversas y posibles colisiones.

Superar estos desafíos requerirá una colaboración continua entre la industria, instituciones académicas y organismos reguladores (*International Maritime Organization; Unión Europea*). La inversión en investigación y desarrollo, junto con la aplicación de mejores prácticas en ingeniería y diseño, jugará un papel crucial en la superación de estos obstáculos y en el avance exitoso de los materiales compuestos en la construcción naval de barcos más grandes. En la Tabla 22 se encuentra toda esta información condensada con los aspectos más relevantes.

ASPECTO	DESARROLLO	APLICACIÓN	IMPACTO
Integración de tecnologías digitales	Sensores, IoT, IA	Monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo	Eficiencia operativa y seguridad mejoradas
Gemelos digitales y simulaciones virtuales	Gemelos digitales, simulaciones avanzadas	Diseño y optimización continua	Adaptabilidad, reducción de costos y desperdicio
Automatización y robótica	Automatización de procesos, robots	Fabricación y mantenimiento eficientes	Aumento de la productividad y reducción de costos
Ciberseguridad en sistemas navales conectados	Seguridad digital, protección de datos	Protección contra amenazas cibernéticas	Garantía de la integridad y seguridad de las operaciones
Desafíos en la implementación de tecnologías digitales	Costos iniciales, normativas, educación	Superación de obstáculos económicos y regulatorios	Avance exitoso y confianza del sector

Tabla 22: Tabla resumen sobre la aplicación de materiales compuestos en barcos de gran envergadura (Autor)

2.5.2. Enfoques híbridos que aprovechan las fortalezas tanto del acero como de los materiales compuestos.

Se espera una mayor adopción de diseños híbridos que combinen materiales compuestos con estructuras de acero, aprovechando la ligereza de los compuestos en áreas estratégicas sin comprometer la integridad estructural.

Los enfoques híbridos que aprovechan las fortalezas tanto del acero como de los materiales compuestos juegan un papel crucial en la superación de desafíos y en la mejora del rendimiento de las embarcaciones en la construcción naval. Aquí se destacan algunos aspectos clave de estos enfoques:

Distribución estratégica: La combinación de acero y compuestos permite una distribución estratégica de los materiales, colocando acero en áreas donde se requiere mayor resistencia y compuestos en áreas donde la ligereza es esencial. Esto optimiza la relación peso-resistencia de la embarcación.

Reducción de peso global: Al emplear compuestos en estructuras no críticas o en partes donde el peso es un factor crucial, se logra una reducción significativa en el peso global de la embarcación, mejorando la capacidad de carga. La ligereza de los compuestos contribuye directamente a la mejora de la eficiencia de combustible. La combinación equilibrada con acero garantiza que la estructura sea lo suficientemente fuerte sin agregar peso innecesario.

Combinación de propiedades: El acero aporta resistencia mecánica y durabilidad, mientras que los compuestos ofrecen resistencia a la corrosión. Combinar estos materiales aborda desafíos de corrosión en entornos marinos, aumentando la vida útil de la embarcación.

Menor mantenimiento: Al utilizar compuestos en áreas propensas a la corrosión, se reduce la necesidad de tratamientos anticorrosivos frecuentes, disminuyendo los costos y el tiempo de mantenimiento.

Formas más eficientes: Los compuestos permiten diseños más flexibles y aerodinámicos. Esta flexibilidad en el diseño contribuye a la eficiencia energética, ya que se pueden optimizar las formas del casco para reducir la resistencia al agua. La combinación de acero y compuestos facilita la innovación en la estructura de la embarcación, permitiendo formas y configuraciones que serían difíciles de lograr con acero tradicional solo. Posibilita la creación de cascos más eficientes desde el punto de vista hidrodinámico, reduciendo la resistencia al avance y mejorando la eficiencia en el consumo de combustible.

Versatilidad: Los enfoques híbridos son adaptables a diversas aplicaciones en la construcción naval, desde buques de carga hasta yates de lujo. La versatilidad en el uso de materiales permite una mayor personalización según los requisitos específicos de cada tipo de embarcación.

Los enfoques híbridos que aprovechan las fortalezas de acero y materiales compuestos desempeñarán un papel crucial en el futuro de la construcción naval. Estos enfoques ofrecen soluciones equilibradas que superan desafíos inherentes a cada material por separado y permiten la creación de embarcaciones más eficientes, duraderas y adaptables a las demandas específicas de la industria.

La eliminación completa del acero en la construcción naval es una perspectiva desafiante y, en el corto y mediano plazo, parece improbable debido a varias razones fundamentales. El acero ha sido el material principal en la construcción naval durante décadas debido a sus propiedades mecánicas excepcionales, resistencia y durabilidad. Sin embargo, se puede prever una disminución en su predominancia a medida que los materiales compuestos y otras innovaciones continúan evolucionando. El acero sigue siendo insustituible en áreas críticas donde se requiere una resistencia mecánica excepcional, como en el casco principal de muchos buques. La resistencia y la durabilidad del acero en condiciones extremas, como en el océano, son cualidades difíciles de replicar completamente con otros materiales. La combinación de las fortalezas de ambos materiales ofrece un equilibrio óptimo entre resistencia, peso y durabilidad. A medida que la investigación y el desarrollo continúan, podríamos ver avances significativos en materiales compuestos que permitan su aplicación en áreas más críticas de las embarcaciones. Sin embargo, eliminar completamente el acero requeriría no solo mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos, sino también abordar los desafíos asociados con la producción a gran escala y la durabilidad a largo plazo.

Las normativas y certificaciones en la construcción naval están históricamente basadas en el uso de materiales tradicionales como el acero. Cambiar por completo a materiales alternativos requeriría la revisión y el establecimiento de nuevas normativas para garantizar la seguridad y la conformidad con estándares internacionales.

Los costos económicos y la viabilidad de la producción de embarcaciones sin acero serían un factor determinante. La infraestructura industrial y los procesos de fabricación están profundamente arraigados en el uso del acero, y cambiar completamente estos sistemas requeriría inversiones significativas y una reevaluación de la cadena de suministro.

Aunque es poco probable que el acero sea eliminado por completo en la construcción naval en el futuro cercano, es probable que veamos una evolución en la proporción de materiales compuestos utilizados en diversas partes de las embarcaciones. La investigación continua y los avances tecnológicos podrían cambiar gradualmente la dinámica, pero la adopción completa de materiales no metálicos en todos los aspectos de la construcción naval enfrenta desafíos considerables en términos de rendimiento, regulaciones y viabilidad económica.

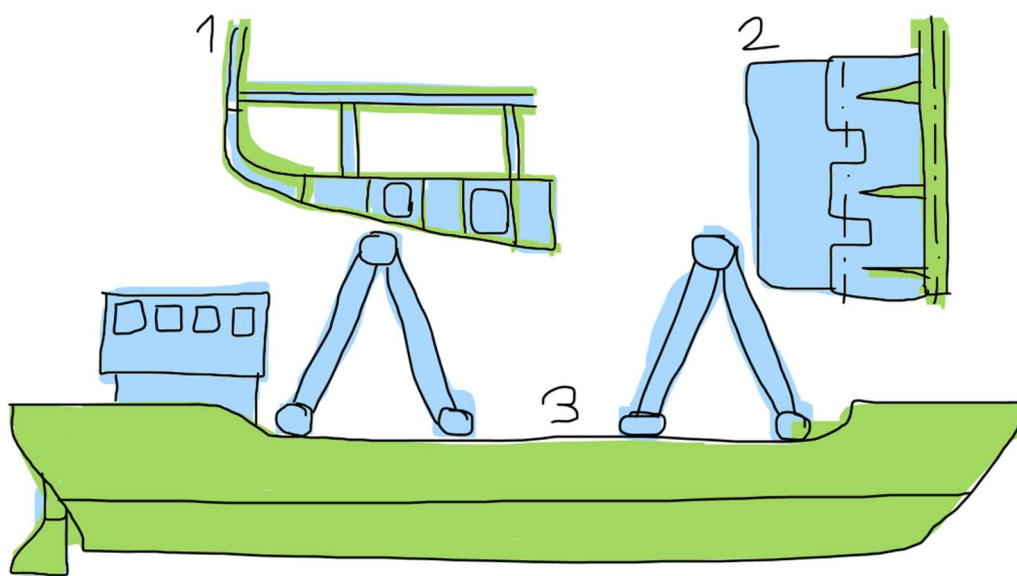


Figura 65: Representación esquemática de un barco (general cargo) utilizando composites y acero en su construcción (Autor)

En la Figura 65 se puede apreciar un esquema de un barco, en verde están representadas secciones de acero, mientras que el azul corresponde a los composites. Este es un planteamiento sobre cómo podrían distribuirse estos materiales para la construcción de un barco. En el esquema 1 se pueden apreciar las secciones transversales, donde utilizando una combinación de ambos materiales teóricamente obtendríamos una reducción de peso respecto al uso exclusivo de acero. En el esquema 2 se puede apreciar la pala del timón, donde el eje del timón sería de acero, mientras que la pala estaría creada con composites uniendo acero y composites mediante protuberancias en el eje que se incrustarían en la pala. Por último, podemos observar una vista general del barco donde el forro del casco sería de chapa de acero, mientras que la superestructura y las tapas de bodega estarían creadas con composites.

3. Conclusiones

Tras haber consultado cerca de 200 fuentes, realizando una extensa e intensa revisión sobre la transición del acero a los materiales compuestos en la construcción naval, abordando aspectos como el recorrido histórico que han tenido y seguirán teniendo estos materiales o sus cualidades y propiedades que los hacen tan útiles y necesarios en esta industria naval, el autor del trabajo ha extraído las conclusiones que se exponen a continuación:

1. Rastreo histórico

En la construcción naval, el acero ha liderado con firmeza durante un largo periodo. Sin embargo, la transición hacia los materiales compuestos no es simplemente un cambio de paradigma, sino un salto evolutivo. El acero, al igual que le ocurrió a la madera se convierte en un testimonio vivo de la adaptación constante de la industria. Este cambio no es solo una transformación en la elección de materiales; es el reflejo de una narrativa más profunda, donde la necesidad de eficiencia y sostenibilidad se relacionan con la construcción naval.

La conclusión no es simplemente la llegada de nuevos materiales, sino el reconocimiento de que la construcción naval es un arte en constante transformación, basando su futuro en los cimientos del pasado y asegurando que cada barco construido sea un paso hacia adelante en una búsqueda interminable por la mejora continua del sector.

2. Evolución del acero

La evolución tecnológica del acero no solo ha sido una respuesta a las demandas estructurales, sino también un reflejo de la aspiración humana por la excelencia. Cada tonelada de acero de alta resistencia es un testimonio de la ingeniería desafiando los límites con estas innovaciones en un avance hacia una construcción naval más eficiente, sostenible y acorde con los cambios constantes del mundo y la sociedad.

3. Materiales compuestos

Estos materiales compuestos no sólo ofrecen una respuesta a la corrosión, sino que son arquitectos de una nueva era de barcos más livianos y ágiles. En sus fibras y uniones yace la promesa de una construcción naval que fusiona la durabilidad con la eficiencia, un testimonio tangible de cómo la innovación en materiales puede alterar el curso de la navegación. Así, la introducción de materiales compuestos no es simplemente un cambio de materia prima, es el inicio de una era donde la resistencia y la ligereza convergen en una ruta que impulsa a la construcción naval hacia horizontes aún más prometedores.

4. Coexistencia de acero y materiales compuestos de matriz polimérica (*composites*)

La actual panorámica de la construcción naval revela una armonía entre el acero tradicional y los vanguardistas materiales compuestos. La coexistencia de estos elementos no es simplemente un equilibrio de fuerzas, sino un testimonio de la adaptabilidad de la industria a las demandas cambiantes. En este escenario, la ligereza y resistencia de los materiales compuestos no son solo atributos técnicos, sino motores que impulsan la eficiencia operativa y ahorran combustible. Cada nave que abraza esta dualidad de materiales se convierte en un símbolo flotante de cómo la síntesis inteligente de tecnologías puede redefinir las métricas tradicionales de la construcción naval. Así, la realidad actual no es solo una muestra de la coexistencia, sino un capítulo en la historia de la construcción naval, donde la diversidad de materiales es la clave para desbloquear nuevos niveles de eficiencia y rendimiento.

5. Tendencias futuras

La necesidad apremiante de estándares internacionales y la superación de barreras técnicas y regulatorias se destacan como las barreras que deben ser sorteadas para que la adopción generalizada de materiales compuestos alcance su pleno potencial. Este desafío supone un llamado a la colaboración global y a la formulación de políticas que allanen el camino hacia un futuro donde los océanos sean surcados por barcos que navegan no sólo con la innovación de hoy, sino la promesa sostenible de mañana. En este contexto, la incorporación de tecnologías basadas en materiales compuestos no solo puede impulsar la eficiencia y la viabilidad económica de la industria, sino que también puede contribuir directamente a varios ODS, como el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) al fomentar la adopción de tecnologías sostenibles y el ODS 14 (Vida Submarina) al reducir el impacto ambiental de las actividades marítimas.

De esta forma, la superación de las barreras mencionadas no solo se presenta como un imperativo técnico, sino también como una oportunidad para avanzar en línea con los principios fundamentales de los ODS. La colaboración global y la formulación de políticas deben, por tanto, no solo abordar los desafíos actuales, sino también alinearse con las metas más amplias de desarrollo sostenible.

4. Referencias

.1 *Introduction*. (1998).

(13) *Juan C Suárez-Bermejo* Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://www.researchgate.net/profile/Juan-Suarez-Bermejo>

37th America's Cup Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.americascup.com/es/home>

About Corrosion – All about corrosion science and engineering Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.aboutcorrosion.com/>

AC75 BOAT CONCEPT - Emirates Team New Zealand. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de https://emirates-team-new-zealand.americascup.com/en/gallery/109_AC75-BOAT-CONCEPT.html

Advanced Composite Materials and Solutions. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.gurit.com/>

Airbus technology getting ready to compete in the 2021 America's Cup | Airbus. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-12-airbus-technology-getting-ready-to-compete-in-the-2021-americas-cup>

Aker Solutions | Aker Solutions. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.akersolutions.com/>

Alloy Development - Thermo-Calc Software. Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://thermocalc.com/solutions/solutions-by-application/alloy-development/>

Amaechi, C. V. (2022). Local tailored design of deep water composite risers subjected to burst, collapse and tension loads. *Ocean Engineering*, 250, 110196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110196>

Andrés Roiz, M. Á. (2014). *Comportamiento a impacto de uniones adhesivas estructurales en materiales híbridos para construcción naval*. Trabajo Fin de Master, Universidad de Cantabria, 2014 <http://hdl.handle.net/10902/5954>

Apraiz Barreiro - Tratamientos termicos | PDF. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://es.scribd.com/document/356662747/Apraiz-Barreiro-tratamientos-termicos>

Aristizábal, R. E., Silva, C. M., Pérez, P. A., Stanek, V., & Katz, S. (2009). 09-104 *Studies of a Quenched Cupola Part II: The Behavior of C, Si, Mn and S in the Metallic Charge*.

Askeland, D. R., Llidó, J. B., & de Pedro, J. B. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). International Thomson Editores México.

Benetti Yachts | Luxury & Italian Excellence since 1873. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.benettiyachts.it/>

Benford, H. (2009). *In Tribute to Riveted Ships*.

- Bessemer process | Dates, Definition, & Facts | Britannica*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.britannica.com/technology/Bessemer-process>
- Black Pearl - Oceanco*. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.oceancoyacht.com/fleet/black-pearl/>
- Blanco del Río, T. (2015). *Evaluación de la degradación de la madera por humectación: empleo de ensayos no destructivos por inspección visual y ultrasonidos*. Trabajo Fin de Master, Universidad de Cantabria, 2014 <http://hdl.handle.net/10902/7711>
- Boekholt, R. (1996a). 4 - The use of semi-automatic and automatic GMAW and FCAW in shipbuilding. En R. Boekholt (Ed.), *Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide* (pp. 103-131). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093196.103>
- Boekholt, R. (1996b). 6 - The introduction and use of welding robots. En R. Boekholt (Ed.), *Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide* (pp. 137-194). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093196.137>
- Boekholt, R. (1996c). 9 - Estimated productivity improvement by welding mechanization and automation. En R. Boekholt (Ed.), *Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide* (pp. 215-232). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093196.215>
- Brodrene Aa - energy efficient fast ferries in carbon fibre*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.braa.no/>
- Brouwer, W. D., van Herpt, E. C. F. C., & Labordus, M. (2003). Vacuum injection moulding for large structural applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(6), 551-558. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00060-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00060-5)
- Calle, M. A. G., Salmi, M., Mazzariol, L. M., Alves, M., & Kujala, P. (2020). Additive manufacturing of miniature marine structures for crashworthiness verification: Scaling technique and experimental tests. *Marine Structures*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102764>
- Charles, F., Coston-Guarini, J., Guarini, J.-M., & Fanfard, S. (2016). Wood decay at sea. *Journal of Sea Research*, 114, 22-25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seares.2016.05.002>
- Chlorinity and salinity of seawater - EniG. Periodic Table of the Elements*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de https://www.periodni.com/es/chlorinity_and_salinity_of_seawater.html
- City of Adelaide Clipper Ship*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.cityofadelaide.org.au/>

- Conferencia Online CME: "La fabricación aditiva (AM-3D Printing) en el Sector Naval. Presente y futuro" - YouTube.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=OvEA-are-qA>
- Conformado de metales | AMG MetalMecánica.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.amgmetalmecanica.com/servicios/conformado/>
- Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974 (Convenio SOLAS).* Recuperado 31 de octubre de 2023, de [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\)%2C-1974.aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS)%2C-1974.aspx)
- Cutty Sark | Royal Museums Greenwich.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.rmg.co.uk/cutty-sark>
- Delivering the Global Composites Market | CompositesWorld.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.compositesworld.com/>
- Diaz, R., Smith, K., Bertagna, S., & Bucci, V. (2023). Digital Transformation, Applications, and Vulnerabilities in Maritime and Shipbuilding Ecosystems. *Procedia Computer Science*, 217, 1396-1405. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.338>
- Dikshit, V., Bhudolia, S., & Joshi, S. (2017). Multiscale Polymer Composites: A Review of the Interlaminar Fracture Toughness Improvement. *Fibers*, 5, 38. <https://doi.org/10.3390/fib5040038>
- Dominic, M., & Nandakumar, C. G. (2012). *Environmental impact of Non Metallic Hull Ships*. <https://doi.org/10.1109/ICGT.2012.6477991>
- Dorafshan, S., Maguire, M., & Collins, W. (2018). Infrared Thermography for Weld Inspection: Feasibility and Application. *Infrastructures*, 3, 1-17. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040045>
- Du, C., Gao, X., & Kitamura, S. (2018). Measures to Decrease and Utilize Steelmaking Slag. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0202-4>
- El acero en la industria de la construcción naval.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://metinvestholding.com/es/media/article/stalj-v-sudostroenii-ot-istorii-do-nashih-dnej>
- El diseño generativo en IA redefine el proceso de ingeniería.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://revistabyte.es/tendencias-tic/disenio-generativo-proceso-ingenieria/>
- El MS Fullagar; el primer barco de casco soldado de la historia - Fundación NUESTROMAR.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.nuestromar.org/antiguas/el-ms-fullagar-el-primer-barco-de-casco-soldado-de-la-historia/>
- El pujante mercado de la fabricación aditiva para el sector naval – Clúster Marítimo Español.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de

<https://www.clustermaritimo.es/2020/07/08/el-pujante-mercado-de-la-fabricacion-aditiva-para-el-sector-naval/>

Electric Hydrofoiling - The Future of Boats | Candela. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://candela.com/>

Ensayo de flexión por impacto según Charpy | ZwickRoell. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-impacto/ensayo-de-flexion-por-impacto-charpy/>

Ensayo de Traccion. Ensayo, Grafica, Formulas, Problemas. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>

Ensayos de dureza | Struers.com. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#hardnesstestinghowto>

[EnvirSci Inquiry] Lehigh River Watershed Explorations. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://ei.lehigh.edu/envirosoci/watershed/history/industry/steel.html>

EPOLAM 2017, la resina epoxidica fácil de usar. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.boatindustry.es/noticias/30576/epolam-2017-la-resina-epoxidica-facil-de-usar>

Espín, T. K. B., Paredes, A. V. A., Salazar, A. J. S., & Vargas, A. D. Y. (2023). Introducción a los tratamientos térmicos: conceptos, propósitos y aplicaciones industriales. *ConcienciaDigital*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261604638>

Fabricante de óptica | Wavelength Opto-Electronic. Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://wavelength-oe.com/es/>

Far, A. R. H., Anijdan, S. H. M., & Abbasi, S. M. (2019). The effect of increasing Cu and Ni on a significant enhancement of mechanical properties of high strength low alloy, low carbon steels of HSLA-100 type. *Materials Science and Engineering: A*, 746, 384-393.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.025>

Feadship | Royal Dutch Shipyards. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.feadship.nl/>

Feadship | VIVA. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.feadship.nl/fleet/viva>

Find Materials and Suppliers - Matmatch. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://matmatch.com/>

Friedrich, K., & Almajid, A. (2012). Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Applied Composite Materials*, 20.
<https://doi.org/10.1007/s10443-012-9258-7>

Garcia, Y., Directores, G., Montón, J., & Pidemunt, T. *ARQUITECTURA TÉCNICA TRABAJO DE FINAL DE GRADO FORJA EN EL SIGLO XXI*.

Garrido, I., Lagüela, S., & Arias, P. (2018). Infrared Thermography's Application to Infrastructure Inspections. *Infrastructures*, 3, 35. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030035>

González Julián, J. (2012). *Desarrollo de materiales compuestos de nitruro de silicio conteniendo nanotubos de carbono: nuevas funcionalidades y aplicaciones*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica. 2012 <https://repositorio.uam.es/handle/10486/8354>

Herreros Sierra, M. A., Suárez Bermejo, J. C., Pinilla Cea, M. P., Miguel Alonso, S., Lopez Martin, F., & de Ulzurrun Romeo, I. (2008). MaLECoN: un nuevo material híbrido laminado fibra-metal para construcción naval. *Actas de 47º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima*. <http://www.ingenierosnavales.com/sesiones2008/index2.asp>

Hidrobo Bedón, A. J. (2028). *La madera en la construcción naval*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cantabria, 2023 <https://hdl.handle.net/10902/28425>

Hill, R., & Perez, A. L. (2017). 26 - New steels and corrosion-resistant alloys. En A. M. El-Sherik (Ed.), *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies* (pp. 613-626). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00026-7>

Historic England - Championing England's heritage | Historic England. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://historicengland.org.uk/>

HMS Warrior | National Museum of the Royal Navy. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.nmrn.org.uk/visit-us/portsmouth-historic-dockyard/hms-warrior>

Home | Science Museum. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.sciencemuseum.org.uk/>

HOME - FibreShip. Recuperado 31 de octubre de 2023, de <http://www.fibreship.eu/>

Home – VPLP Design. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.vplp.fr/en/>

Home page - worldsteel.org. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://worldsteel.org/>

Homepage. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.attica-group.com/en/>

«IHIMU-a» A Fully Automated Steel Plate Bending System for Shipbuilding. (s. f.).

ingemecánica. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://ingemecanica.com/>

Inicio | Naval Composites. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.navalcomposites.com/>

Innovacion con materiales compuestos o composites | Experience ACCIONA.
Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://experience.acciona.com/es/innovacion/composite-innovacion-con-materiales-compuestos/>

Insensys – Global leaders in fibre optic strain measurement systems in wind energy.
Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.insensys.com/>

International Maritime Organization. Recuperado 31 de octubre de 2023, de <https://www.imo.org/es>

Ivaldi, A., Bayatfar, A., Caprace, J.-D., Egorov, G., Heggelund, S. E., Hirakawa, S., Kwon, J. M., Mcgreer, D., Prebeg, P., Sielski, R., Slagmolen, M., Sobey, A., Tang, W., & Wu, J. (2022, septiembre 11). Committee IV.2: Design Methods. *Day 1 Sun, September 11, 2022*. <https://doi.org/10.5957/ISSC-2022-COMMITTEE-IV-2>

Iwańkiewicz, R., & Rutkowski, R. (2023). Digital Twin of Shipbuilding Process in Shipyard 4.0. *Sustainability*, 15. <https://doi.org/10.3390/su15129733>

Jagus, K., Sender, J., Jericho, D., & Flügge, W. (2021). Digital thread in shipbuilding as a prerequisite for the digital twin. *Procedia CIRP*, 104, 318-323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.054>

Javier Hernández Rueda Directores, J., Mari Cruz García Gutiérrez Tiberio Ezquerro Sanz, D. A., & Nieves Menéndez González, D. *Control de la nanoestructura como procedimiento para optimizar las propiedades físicas de materiales compuestos de matriz polimérica y nanotubos de carbono.*

Jun Ou Minzhong Huang, Y. W. S. H. J. L., & Wu, S. (2023). Additive manufacturing of flexible polymer-derived ceramic matrix composites. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), e2150230. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2150230>

JUNG, I., SUN, H., KANG, J., Lee, C., & LEE, S. (2018). Big Data Analysis Model for MRO Business Using Artificial Intelligence System Concept. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7, 134-138. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.33.18593>

Kim, M., Choi, W., Kim, B.-C., Kim, H., Seol, J. H., Woo, J., & Ko, K. H. (2015). A vision-based system for monitoring block assembly in shipbuilding. *Computer-Aided Design*, 59, 98-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.09.001>

Kim, S.-J., Suzuki, J., Gao, X., Ueda, S., & Kitamura, S. (2016). A Kinetic Model to Simulate the Reaction Between Slag and Matte for the Production of Ferromanganese Alloy from Steelmaking Slag. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0042-z>

Klein, M., Sienicki, T., & Eichenberger, J. (2005, noviembre). *Laser ultrasonic inspection of welds used in shipbuilding.*

- Kuranchie, C., Yaya, A., & Bensah, Y. D. (2021). The effect of natural fibre reinforcement on polyurethane composite foams – A review. *Scientific African*, 11, e00722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00722>
- La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible*. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Laser Cutting - Cutting Processes - TWI*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-laser-cutting-052>
- Laser Cutting: Steel and Aluminum*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.cuttingexperts.com/laser-cutting-steel-aluminum/>
- Lavery, B. (2017). *Barcos 5000 años de aventura marítima*. Dorling Kindersley Limited.
- Liu, J., Ma, J., Vaz, M. A., & Duan, M. (2020). Axisymmetric structural behaviours of composite tensile armoured flexible pipes. *Marine Structures*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102829>
- LOCTITE HY 4070 - Henkel Adhesives*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de https://www.henkel-adhesives.com/es/es/producto/structural-adhesives/loctite_hy_40700.html
- Lowde, M. J., Peters, H. G. A., Geraghty, R., Graham-Jones, J., Pemberton, R., & Summerscales, J. (2022). The 100 m Composite Ship? *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/jmse10030408>
- Luna Rossa Prada Pirelli Team*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.lunarossachallenge.com/en/home>
- Lürssen Yachts*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.lurssen.com/en/home/>
- Mahendra, K. V, & Radhakrishna, K. (2007). Castable composites and their application in automobiles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(1), 135-140.
- Maiorano Lauria, L. P. (2022). *Materiales espumados metálicos con inclusiones térmicas de base carbono y nanoingeniería interfacial*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. Departamento de Química Inorgánica 2022 <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/130245>
- Marco, A., El, P., De, S., & De, R. *Pliego de Prescripciones Técnicas PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS (PPT)*.
- Materials Traveling to Outer Space for 50 Years | Solvay*. Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://www.solvay.com/en/article/solvay-materials-have-been-traveling-outer-space-more-50-years>

- Mauro, F., & Kana, A. A. (2023). Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review. *Ocean Engineering*, 269, 113479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113479>
- McMahon, W., Birdsall, H. A., Johnson, G. R., & Camilli, C. T. (1957). Degradation studies of MYLAR. *1957 Conference on Electrical Insulation*, 22-23. <https://doi.org/10.1109/EIC.1957.7507281>
- Metalshub - Alloying elements in steel production*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.metals-hub.com/blog/alloying-elements-in-steel-production/>
- Muhammad, A., Rahman, M. R., Baini, R., & Bakri, M. K. Bin. (2021). Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry. En *Advances in sustainable polymer composites* (pp. 185-207). Elsevier.
- National Museum of the US Navy*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.history.navy.mil/content/history/museums/nmusn.html>
- Naval Group / An International Group*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.naval-group.com/en>
- Navantia 4.0*. Recuperado 2 de noviembre de 2023, de <https://www.navantia.es/es/navantia-4-0/>
- Norizan, M. N., Abdan, K., Sapuan, S., Laila, A. H. A. M., Rahmah, M., & Zin, M. (2017). A review: Fibres, polymer matrices and composites. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 25, 1085-1102.
- Oceanco. Specialised in building innovative high quality custom superyachts*. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.oceancoyacht.com/>
- Página principal*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.navegar-es-preciso.com/>
- Papavinasam, S. (2014). Materials. *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry*, 133-177. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397022-0.00003-0>
- Park, S., & Huh, J.-H. (2022). Study on PLM and Big Data Collection for the Digital Transformation of the Shipbuilding Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/jmse10101488>
- Pendhari, S. S., Kant, T., & Desai, Y. M. (2008). Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures*, 84(2), 114-124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.007>
- Pierson, H. O., & Lieberman, M. L. (1975). The chemical vapor deposition of carbon on carbon fibers. *Carbon*, 13(3), 159-166. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-6223\(75\)90226-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-6223(75)90226-2)
- Portada - Desarrollo Sostenible*. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

- Prince, K. (2002). Composites win over sports market. *Reinforced Plastics*, 46(9), 48-51. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(02\)80160-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(02)80160-6)
- Process Automation for the Future of Shipbuilding – Naval Architect*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://naval-architect.io/the-future-of-shipbuilding/>
- Ramsses Project: Ramsses Project*. Recuperado 31 de octubre de 2023, de <https://www.ramsses-project.eu/>
- Removing barriers to lightweighting ships with composites | CompositesWorld*. Recuperado 31 de octubre de 2023, de <https://www.compositesworld.com/articles/removing-barriers-to-lightweighting-ships-with-composites>
- Ribeiro, F. M. F., Campilho, R. D. S. G., Carbas, R. J. C., & da Silva, L. F. M. (2016). Strength and damage growth in composite bonded joints with defects. *Composites Part B: Engineering*, 100, 91-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.060>
- Riedel, U. (2012). 10.18 - Biocomposites: Long Natural Fiber-Reinforced Biopolymers. En K. Matyjaszewski & M. Möller (Eds.), *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (pp. 295-315). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00268-5>
- Rojas, J. E. , & S. Héctor. *Tasa de degradación de madera por el perforador de manglar Psiloteredo healdi (Bivalvia:Teredinidae) en el Lago de Maracaibo, Venezuela*. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de <http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442000000100018&lng=en&nrm=iso>
- Rong, H., Dahmen, K.-H., Garmestani, H., Yu, M., & Jacob, K. I. (2013). Comparison of chemical vapor deposition and chemical grafting for improving the mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites with multi-wall carbon nanotubes. *Journal of Materials Science*, 48(14), 4834-4842. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7119-2>
- Rowell, R. M. (2012). Moisture properties. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition*, 75-98. <https://doi.org/10.1201/B12487>
- Roy, B., & Karak, N. (2012). Synthesis and characterization of thermostable hyperbranched epoxy resin for surface coating applications. *Journal of Materials Research*, 27(14), 1806-1814. <https://doi.org/10.1557/JMR.2012.86>
- Schultz, T. P., Nicholas, D. D., & Preston, A. F. (2007). A brief review of the past, present and future of wood preservation. *Pest Management Science*, 63(8), 784-788. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ps.1386>
- Seawater: Composition*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.marinebio.net/marinescience/02ocean/swcomposition.htm>

- Sharma, M., Gao, S., Mäder, E., Sharma, H., Wei, L. Y., & Bijwe, J. (2014). Carbon fiber surfaces and composite interphases. *Composites Science and Technology*, 102, 35-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.07.005>
- Shell Global*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.shell.com/>
- Singh, R. (2016). Chapter 3 - Welding and Joining Processes. En R. Singh (Ed.), *Applied Welding Engineering (Second Edition)* (pp. 163-195). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804176-5.00015-3>
- Soldadura con arco de carbón*. Recuperado 1 de noviembre de 2023, de https://www.sapiensman.com/tecnoficio/soldadura/soldadura_de_carbon.php
- Suárez Bermejo, J. C., & Herreros Sierra, M. A. (2008). New Fiber-Metal Hybrid Laminated Material, MALECON. *3rd Annual MAST. Conference Proceedings*. <http://www.mastconfex.com/>
- Suárez, J. C., Miguel, S., de Ulzurrun, I., Pinilla, P., Herreros, M. A., & López, F. (2004). Modos de fallo en un material h\`ibrido estructural para construcción naval: Malecón. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 21, 350-355.
- Teaca, C. A., Roşu, D., Musta\c{t}ă, F., Rusu, T., Roşu, L., Roşca, I., & Varganici, C.-D. (2019). Natural bio-based products for wood coating and protection against degradation: A Review. *BioResources*, 14(2), 4873-4901.
- Testing Machines and Testing Systems for Metals*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de www.zwickroell.com/en/applications/metals/standards
- The digital shipyard: robotics in shipbuilding - Ship Technology*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.ship-technology.com/features/feature-the-digital-shipyard-robotics-shipbuilding/>
- The Engineering ToolBox*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- The International thermodynamic equation of seawater, 2010: calculation and use of thermodynamic properties - UNESCO Biblioteca Digital*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188170>
- The Royal Navy: today and tomorrow : HILL, J. R : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <http://archive.org/details/royalnavytodayto0000unse>
- The Voice of the American Steel Industry | American Iron and Steel Institute*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.steel.org/>
- Tipos de materiales compuestos*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>
- Tu portal de acceso a la UE, noticias, puntos destacados | Unión Europea*. Recuperado 3 de noviembre de 2023, de https://european-union.europa.eu/index_es

- TURAN, E., KOÇAL, T., & ÜNLÜGENÇOĞLU, K. (2011). Welding technologies in shipbuilding industry. *Tojsat*, 1(4), 24-30.
- UNE-EN 10020:2001 *Definición y clasificación de los tipos de a...* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0024235>
- Unión de vidrio.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://esp.sika.com/es/industria/marino/embarcaciones-derecreoyyates/Uni%C3%B3n%20de%20vidrio.html>
- Uniones Adhesivas.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://unionesadhesivas.com/es/blog>
- UnionStahl - Ihr Partner für Grobblech - Stark in Kompetenz und Technik.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de <https://www.unionstahl.com/>
- US Department of Commerce, N. O. and A. A. *What are microplastics?*
- Uzay, Ç., Boztepe, M., Bayramoglu, M., & Geren, N. (2016, noviembre). *Adhesion Surface Bonding Capability of Different Metal Sheets for Fiber Metal Laminate (FML) Applications.*
- Vela Cuadros, R. (2021). *Diseño y construcción de embarcación de recreo en poliéster reforzado de fibra de vidrio, (PRFV), mediante moldeo y mecanizado por control numérico por ordenador, (CNC).* Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cantabria, 2021 <http://hdl.handle.net/10902/22813>
- Villa Caro, R. (2016). EVOLUCIÓN DEL ACERO NAVAL DESDE LA TÉCNICA DEL REMACHADO HASTA EL AH-36. *Revista General de Marina*, 270.
- Vukelic, G., Vizentin, G., Ivosevic, S., & Bozic, Z. (2022). Analysis of prolonged marine exposure on properties of AH36 steel. *Engineering Failure Analysis*, 135, 106132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106132>
- War at sea in the ironclad age : Hill, J. R : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive.* Recuperado 3 de noviembre de 2023, de https://archive.org/details/isbn_9780304352739/mode/2up
- Wei, C., Wang, G., Cridland, M., Olson, D. L., & Liu, S. (2018). Chapter 25 - Corrosion Protection of Ships. En M. Kutz (Ed.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)* (Third Edition, pp. 533-557). William Andrew Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00026-5>
- Yongjing Wang, D. T. P., & Ji, C. (2015). Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering*, 2(1), 1075686. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686>
- Yu, Y., Liu, X., Yan, J., Wang, Y., & Qing, X. (2021). Real-Time Life-Cycle Monitoring of Composite Structures Using Piezoelectric-Fiber Hybrid Sensor Network. *Sensors*, 21(24), 8213. <https://doi.org/10.3390/s21248213>

- Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*, 9(4), e14534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>
- Zhou, B., Zhang, X., & Li, H. (2019). Study on Air Bubble Defect Evolution in Wind Turbine Blade by Infrared Imaging with Rheological Theory. *Applied Sciences*, 9(22). <https://doi.org/10.3390/app9224742>
- Ziółkowski, M., & Dyl, T. (2020a). Possible applications of additive manufacturing technologies in shipbuilding: A review. *Machines*, 8(4), 1-34. <https://doi.org/10.3390/machines8040084>
- Ziółkowski, M., & Dyl, T. (2020b). Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review. *Machines*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/machines8040084>



AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros.

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo