



Artículo de Divulgación

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval: un vínculo esencial que aporta al desarrollo de Chile

Metallurgical engineering and shipbuilding: an essential link that contributes to Chile's development

RESUMEN

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval están íntimamente conectadas y son esenciales para el desarrollo económico y social de los países. La construcción naval depende de la industria metalúrgica para desarrollar materiales adecuados que cumplan con las exigencias de una industria competitiva, mientras que la industria metalúrgica necesita de la demanda constante de la construcción naval para evolucionar tecnológicamente. La fabricación de partes y piezas de un buque involucra procesos metalúrgico-mecánicos que han avanzado mediante la innovación. La Política Nacional de Construcción Naval impulsa el desarrollo de la industria naval y ofrece una oportunidad de crecimiento y diversificación para la industria metalúrgica. Juntas, estas industrias pueden contribuir significativamente al desarrollo de Chile.

Palabras clave: Ingeniería; Metalurgia; Construcción naval; Materiales.

ABSTRACT

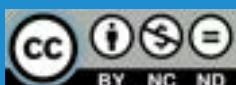
Metallurgical engineering and shipbuilding are closely connected and essential for the economic and social development of countries. Shipbuilding relies on the metallurgical industry to develop suitable materials that meet the demands of a competitive industry, while the metallurgical industry needs the constant demand of shipbuilding to evolve technologically. The manufacturing of ship parts and pieces involves metallurgical-mechanical processes that have advanced through innovation. The National Naval Construction Policy promotes the development of the naval industry and offers an opportunity for growth and diversification for the metallurgical industry. Together, these industries can significantly contribute to the development of Chile.

Keywords: Engineering; Metallurgy; Shipbuilding; Materials.

Autor de Correspondencia

Enzo Tesser Díaz
enzo.tesser@usach.cl
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 26 de marzo, 2025
Artículo Aceptado: 5 de mayo, 2025
Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



Introducción

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval son dos disciplinas tecnológicas estrechamente vinculadas que han facilitado sustancialmente el progreso y desarrollo de las naciones. Durante los últimos tres siglos, desde la revolución industrial hasta la actualidad, la capacidad para construir embarcaciones robustas y duraderas ha dependido en gran medida de los avances en ciencia e ingeniería de materiales, particularmente en ingeniería metalúrgica. Entre estos avances se incluyen el desarrollo de una amplia gama de aceros, la sofisticación de aleaciones no ferrosas resistentes a la corrosión, la producción metálica en grandes volúmenes de productos planos y largos, la mejora de procesos de fabricación como el conformado metálico, la soldadura y las fundiciones, así como la innovación tecnológica emergente. Estos desarrollos no solo han fortalecido la construcción naval, sino que también han impactado diversas áreas productivas, generando sinergias económicas y sociales que se traducen en oportunidades de desarrollo para los países (Till, 2023).

Desde la antigüedad, las civilizaciones que controlaron los espacios marítimos pudieron ampliar sus territorios y establecer rutas comerciales que cambiaron el mundo. Lograron esto navegando distancias cortas a bajas velocidades, en embarcaciones construidas principalmente de madera, utilizando el viento y la fuerza humana como medios de propulsión. Hoy en día, circumnavegar el mundo en buques modernos hechos de acero, impulsados por motores de alta potencia y capaces de resistir diversas condiciones es una tarea común. Sin embargo, la construcción naval sigue teniendo una justificación geopolítica, basada en la necesidad de los estados de globalizar su economía, proteger sus intereses y proyectar su influencia en el ámbito marítimo de diversas maneras (Till, 2009).

Actualmente, la ingeniería metalúrgica ocupa un papel esencial en la evolución del diseño de buques y la construcción naval. La investigación y el desarrollo de nuevos materiales permiten la creación de embarcaciones más ligeras y eficientes, con un me-

nor impacto ambiental, lo cual es fundamental para enfrentar los desafíos contemporáneos, como el cambio climático y la necesidad de transporte sostenible (Bruce, 2020).

Asimismo, la colaboración entre ingenieros metalúrgicos y navales es esencial para la innovación y la mejora continua en el diseño y la fabricación de embarcaciones. La implementación de tecnologías avanzadas, como la fabricación de partes mediante manufactura aditiva metálica y la inteligencia artificial (Joshi *et al.*, 2023), están transformando la manera en que se conciben y construyen los buques, abriendo un universo de posibilidades para el futuro de la ingeniería en su amplio espectro.

Este artículo es solo una pincelada sucinta de temas científico-tecnológicos muy complejos y profundos, enfocado en llamar la atención del capital humano más importante de la Universidad de Santiago de Chile, el alumno. Tiene el propósito de mostrar de manera simple y didáctica la relevancia que poseen las industrias metalúrgica y naval para el desarrollo de los países, explicando sus aspectos más importantes y como se conectan para generar sinergia, revelando al lector los múltiples desafíos y oportunidades que vienen para el futuro del mundo y específicamente de nuestro país.

Cada tema ha sido cuidadosamente seleccionado y desarrollado de manera concisa, con énfasis en aspectos relevantes de la ingeniería metalúrgica. El artículo no incluye conclusiones, ya que se espera que el lector forme su propia opinión y visión del tema, fomentando la discusión a partir de la información proporcionada. Esta publicación se fundamenta principalmente en los conocimientos adquiridos por el autor durante más de 30 años de trayectoria en diversos ámbitos de la ingeniería, así como en su participación en la redacción de la recientemente promulgada Política Nacional de Construcción Naval. El objetivo es suscitar en el lector un interés genuino y una necesidad de profundizar en la investigación, si es que así lo desea.



Fabricación de un bloque del buque antártico Almirante Viel al interior de un galpón dotado con toda la maquinaria adecuada para su confección. Posteriormente, una vez terminado el bloque, se moverá al exterior para su ensamblaje con otras secciones del buque. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

2. Conceptos fundamentales de la arquitectura, ingeniería y construcción naval moderna.

La arquitectura, ingeniería y construcción naval moderna se basan en una serie de conceptos fundamentales que han evolucionado a lo largo del tiempo, impulsados por avances tecnológicos y la necesidad de optimizar el rendimiento, la seguridad y la eficiencia de las embarcaciones, entendiéndose ésta como el término genérico que engloba a los buques o barcos civiles y militares (considerando aquí el diseño y desarrollo de submarinos de propulsión convencional y nuclear) de diferentes tamaños, desplazamiento y usos, como también los artefactos navales, muy utilizados en la industria acuícola y petroquímica.

2.1. Arquitectura Naval

Al hablar de arquitectura naval, se debe entender como el área que permite primordialmente diseñar embarcaciones, basada en 4 pilares fundamentales: hidrodinámica, estabilidad, diseño de distribución de espacios y resistencia estructural.

- **Hidrodinámica:** permite estudiar el flujo del agua alrededor del casco para minimizar la resistencia y optimizar la propulsión, determinando el diseño

de formas de casco eficientes para diferentes velocidades y condiciones de navegación, cuidando la laminaridad del fluido, optimizando su futuro rendimiento operacional (Larsson *et al.*, 2010; Lee, 2019).

- **Estabilidad:** evalúa la capacidad de la embarcación para mantener su posición vertical y recuperarse de inclinaciones, explotando los conceptos de centro de gravedad y el centro de carena para garantizar la estabilidad en diferentes condiciones de carga (Lee, 2019; Moore y Paulling, 2022).
- **Diseño de distribución de espacios:** es la optimización del espacio a bordo para la tripulación, carga, maquinaria y sistemas, generando espacios seguros y funcionales que cumplan con las normativas y los requisitos de las especificaciones técnicas asociadas a las funcionalidades de la embarcación (Vorus, 2010).
- **Resistencia Estructural:** es el pilar que permite el diseño de la estructura del casco para soportar las cargas estáticas, hidrostáticas y dinámicas a las que estará sometida la embarcación. De este pilar depende fundamentalmente la selección de materiales y técnicas de construcción para garantizar la integridad estructural en todo el ciclo de vida



Modelo a escala de un buque, el cual se somete a pruebas hidrodinámicas en un canal artificial, con el propósito de evaluar el comportamiento del casco respecto al agua. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

de la embarcación, por lo tanto, es una de las áreas mas relacionadas con la ingeniería metalúrgica. En términos muy simples, el casco de un buque puede ser visto como una gran viga que se somete permanentemente a cargas de carácter estático y dinámico, producto de su propio peso (gravedad), de la acción del mar (olas y corrientes) y el viento. La flexión (arrufo y quebranto) y la torsión, actuando siempre de manera combinada, generan permanentes y complejos estados de esfuerzos normales (tensión y compresión) y cortantes en todas partes, con diferentes direcciones y magnitudes. A su vez, el casco es una estructura, es decir, está compuesto por un sinnúmero de otros elementos estructurales unidos entre si para resistir en forma sinérgica las cargas antes mencionadas (Andrews, 2012). A diferencia de un automóvil detenido o un avión dentro de un hangar, las estructuras de las embarcaciones una vez botadas al agua (casi al final de su construcción) nunca dejan de someterse a las cargas dinámicas, ya que, aunque no navegue y se encuentre en un muelle, la influencia del oleaje y el viento es permanente. Lo anterior, implica mayores exigencias a los materiales, generando efectos y fallas recurrentes, tales como el fenómeno de la fatiga.

2.2. Ingeniería Naval

La ingeniería naval es una disciplina que abarca una amplia gama de conocimientos enfocados en el diseño, construcción, pero principalmente en el sostenimiento y operación de embarcaciones y sus sistemas, con el propósito de optimizar su rendimiento y confiabilidad durante todo el ciclo de vida. Generalmente las áreas de conocimiento se enmarcan en la propulsión, sistemas de ingeniería e ingeniería de materiales.

- Propulsión: diseño, selección y operación de sistemas y plantas de propulsión eficientes y confiables, las cuales están integradas por un motor que entrega la fuerza motriz (motores diésel, turbinas a gas, motores eléctricos, reactores nucleares, turbinas a vapor y en algunos casos, la combinación de los anteriores, como son los sistemas de propulsión militar) y sistemas de hélices y transmisión (ejes y descansos) para maximizar la eficiencia y el rendimiento de la propulsión (Kerwin y Hadler, 2010). Los materiales utilizados para la fabricación de los componentes del sistema de propulsión son aleaciones metálicas de diferentes tipos y procesos de fabricación (forja, fundición,

mecanizado, etc.) y muy sofisticadas, destacando la tecnología asociada a las aleaciones ferrosas en todo su espectro como aceros y fundiciones, aleaciones no ferrosas como las de cobre y superaleaciones como las de base níquel, cobalto y hierro.

- Sistemas de ingeniería: diseño e integración de sistemas de generación de energía, refrigeración, tratamiento de agua, comunicaciones, navegación, control automático, electricidad y electrónica. Para el caso de las embarcaciones de carácter militar se agregan los sistemas de armas (misiles, torpedos, cañones), sensores de vigilancia (radares, sonares, antenas de alta potencia, sistemas ópticos) y sistemas no tripulados (aéreos, superficie y submarinos).
- Ingeniería de materiales: selección de los materiales apropiados para cada componente de la embarcación, considerando factores como la resistencia, la corrosión, el peso y el costo. Además, se contempla la aplicación de técnicas de fabricación tradicionales, tales como la soldadura, el conformado y el mecanizado, así como técnicas de manufactura avanzadas, como la manufactura aditiva.

2.3. Construcción Naval

La construcción naval es el proceso integral de diseñar, construir, reparar y mantener embarcaciones de todo tipo. Esta actividad abarca desde pequeñas lanchas hasta enormes buques de carga, cruceros y buques de guerra. Principalmente se enfoca en la materialización de los diseños y especificaciones técnicas realizadas por los arquitectos e ingenieros navales, con los estándares requeridos por el armador. Hoy, el proceso de construir es complejo y distingue múltiples áreas de conocimiento, dentro de las cuales destacan: planificación y gestión de proyectos complejos, técnicas constructivas, tecnologías de fabricación, sostenibilidad, seguridad, digitalización (Bruce, 2020).

- Planificación y gestión de proyectos complejos: se planifica anticipadamente lo que se hará según los diseños y especificaciones técnicas realizadas por los arquitectos e ingenieros navales, con los estándares requeridos por el armador, desarrollando planes de construcción detallados. Posteriormente, se produce lo planificado gestionando eficientemente los recursos invertidos para cumplir con los plazos y el presupuesto. De manera transversal se gestiona y garantiza la calidad y seguridad en todos los procesos, aplicando técni-

cas y normas de gestión estandarizadas, las cuales son exigidas por las casas clasificadoras. En términos simples, tanto los procesos, como el personal que lo ejecuta, deben ser sometidos a un escrutinio que los valide en calidad y competencias.

- Técnicas constructivas: bien sabido es que a partir de la Segunda Guerra Mundial se produjo una revolución en lo que respecta a técnicas de construcción de buques, gracias a la visión propuesta para los buques de transporte de carga clase Liberty por el empresario e ingeniero civil estadounidense Henry Kaiser (Anderson, 2017). Introdujo dos grandes innovaciones en beneficio del tiempo y volumen de producción, que en tiempos de guerra era crítico: la construcción modular y el reemplazo de los remaches por la soldadura. Hasta antes de los "Liberty", las embarcaciones de todo tipo se construían íntegramente en un solo lugar físico, que dependiendo de la infraestructura de apoyo que se necesitara (grúas, talleres y maestranzas), podían ser patios de varada, gradas o diques secos, todos ellos en la intemperie. La secuencia de construcción era única, es decir, se podían enfrentar tantas construcciones de buques, como sitios de construcción estuviesen disponibles en el astillero, era como construir una casa o un edificio. La construcción modular implicó que cada pequeña sección, bloque o módulo del buque se podía producir en cualquier parte, con equipos de trabajo diferentes, bajo techo y en paralelo, aumentando exponencialmente la capacidad productiva de los astilleros, ya que en las gradas solo se debían armar los bloques previamente construidos (Bruce, 2020). Si bien, el remachado en aleaciones ferrosas fue un proceso productivo técnicamente seguro y muy probado, su ejecución requería tiempo y mano de obra masculina (debido a lo duro del trabajo de forja), la cual no estaba disponible porque los hombres se encontraban en el frente de combate. La introducción de la soldadura, proceso que requería más precisión que fuerza, implicó aumentar la velocidad para armar los bloques y aprovechar la mano de obra femenina disponible en tiempos de guerra. La construcción modular y la soldadura, como toda innovación, no estuvo exenta de problemas al inicio (fractura, fragilización, diseño, mano de obra, etc.), pero tal como lo dijera el mismo Kaiser en alguna instancia "los problemas son oportunidades vestidas en ropa de trabajo". A partir de estos problemas se dio paso al potenciamiento del área de materiales del Naval Research Laboratory (llegando a ser el más grande del

mundo), desarrollándose los estudios más importantes de la historia en mecánica de la fractura, fatiga e integridad estructural de materiales. Hoy, las innovaciones realizadas por Kaiser son parte de procesos bastante más complejos, avanzados y automatizados, que están muy arraigados y mejorados en el ámbito de la construcción naval.

- **Tecnologías de fabricación:** actualmente para cualquier proceso de fabricación en astilleros modernos se usan tres tecnologías que se complementan entre si para la optimización del proceso productivo: diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computador (CAE) y manufactura asistida por computadora (CAM) (Shrivastava et al., n.d.). Las tres en su conjunto han permitido aplicar robótica y automatización en los procesos de construcción de manera confiable, mejorando la calidad de los trabajos, disminuyendo los tiempos de producción y tecnificando la mano de obra.
- **Sostenibilidad:** la optimización del consumo de energía y la reducción de emisiones, producto de las exigencias impuestas por diferentes acuerdos internacionales, relacionados con las acciones que se deben tomar por el fenómeno del cambio climático, ha gatillado profundas mejoras en el diseño y construcción de embarcaciones, las cuales deben presentar menor impacto ambiental, utilizando tecnologías de propulsión alternativas y materiales sostenibles (Ministry of Defence UK, 2022). Es así, como se han mejorado los diseños de cascos y superestructuras de las embarcaciones para optimizar sus rendimientos, modificación en sus plantas de potencia para la utilización de combustibles carbono neutrales y/o verdes, y desarrollo de tecnologías que prevengan la contaminación del mar por los buques (emisión de sustancias nocivas al mar por causas operacionales y/o accidentales) (UNCTAD, 2023).
- **Seguridad:** diseño y construcción de embarcaciones que cumplan con las normativas de seguridad internacionales y los requisitos de las sociedades y casas de clasificadoras. Implementación de sistemas de seguridad avanzados y procedimientos de emergencia.
- **Digitalización:** uso de gemelos digitales, sensores y análisis de datos para optimizar el diseño, la construcción y el mantenimiento de las embarcaciones. Implementación de sistemas de navegación autónoma y conectividad a bordo.



Modelo CAD de un buque en su etapa de ingeniería de detalle. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

3. Requisitos de los materiales metálicos para la construcción naval

Las aleaciones metálicas utilizadas en la construcción naval deben cumplir con una serie de requisitos muy rigurosos, debido a las condiciones extremas a las que se enfrentan en el mar. Hoy, las rutas comerciales que deben seguir los buques mercantes y las operaciones que realizan los buques militares, implican que no sería un caso excepcional que naveguen, por ejemplo, desde el polo norte hasta la Antártida, pasando por diferentes ambientes, temperaturas, salinidades, microbiología, contaminantes, condiciones de mar y meteorología (Tibbitts, 2022). Por lo tanto, los diseños se deben efectuar para soportar toda clase de variables conocidas en el mundo y en las peores circunstancias, con el propósito de mantener la integridad estructural de los materiales y consecuentemente del activo. Es en este punto donde la ingeniería metalúrgica entrega sus mayores aportes a la construcción naval, ya que es la responsable de investigar, diseñar, desarrollar y producir los materiales adecuados para las especificaciones solicitadas. Hasta el día de hoy, los materiales metálicos, debido a su costo competitivo y versatilidad en cuanto a propiedades mecánicas, físicas y químicas, al menos en el ámbito naval (estructural y de sistemas), no han podido ser reemplazados, existiendo aún grandes espacios de investigación para mejorarlo. (Pantelakis y Rodopoulos, 2009)

Es necesario entender que la industria naval y marítima es una gran demandante de aleaciones metálicas, dentro de las cuales, las de más alto consumo en volumen son:

- Aleaciones ferrosas: son las de mayor uso en la construcción naval dada la versatilidad de productos que se pueden fabricar con ellas. Principalmente asociadas a la construcción de cascos, motores, hélices, descansos, líneas de ejes, sistemas de transmisión, gobierno, macizos (tubos de codaste), entre otros. Los materiales más usados son: aceros de baja aleación, aceros aleados y resistentes a la corrosión, aceros tratados térmicamente (QT), aceros fundidos, fundiciones.
- Aleaciones de aluminio: principalmente aleaciones de la serie 5000 para la construcción con soldadura de cascos para embarcaciones de menor peso y/o desplazamiento que las construidas en acero o simplemente para aliviar el peso de buques construidos parcialmente en acero.

- Aleaciones de cobre: utilizadas principalmente para la confección de sistemas que deben presentar alta resistencia ante la corrosión, como cañerías de agua salada para sistemas de enfriamiento de plantas de potencia, hélices y sistemas de refrigeración. Las más utilizadas son los broncees y latones en su amplio espectro y las aleaciones Cu-Ni 70-30 y 90-10.

Teniendo clara la principal demanda de materiales, se puede intuir cuáles son los requisitos más importantes que deben cumplir los materiales metálicos asociados a la construcción naval, tanto a nivel estructural como sistemas: tenacidad (tracción, impacto y fractura), resistencia a la fatiga y resistencia a la corrosión.

- Tenacidad: tal como se describió en la sección 2.1, todas las embarcaciones están sujetas a múltiples cargas de carácter estático y dinámico producidas por su propio peso y por la constante acción del viento y del mar. Además, las estructuras del casco en el océano, dependiendo el área de operación, podrían estar sometidas a fuertes impactos y tensiones producidas por el oleaje, rocas de bajo fondo y eventualmente hielo, por lo que los materiales deben ser tenaces, es decir, deben tener la característica de absorber una buena cantidad de energía antes de fracturarse. Por lo tanto, la tenacidad no solo se relaciona con la resistencia del material, sino que también con su ductilidad, la que a su vez es función de la temperatura, la velocidad de deformación y el estado de tensiones al cual está sometido. En este sentido, dependiendo del tipo de carga, estática o dinámica, se pueden distinguir dos tipos de tenacidades, la de tensión y la de impacto. La primera está considerada una carga estática o quasi – estática, donde su velocidad de deformación es muy baja, pudiendo ser medida en el clásico ensayo de tracción y nos sirve para evaluar el comportamiento estático de los materiales o de las estructuras. La segunda, se considera una carga dinámica de alta velocidad de deformación, pudiendo ser medida en el clásico ensayo de tenacidad al impacto (CVN e Izod) y nos sirve para evaluar el comportamiento del material sometido a cargas dinámicas de alta velocidad con geometrías que concentren esfuerzos (George E. Dieter, 1988). Existe un tercer tipo de tenacidad en los materiales, que no se relaciona directamente con la tracción ni el impacto, sino que tiene que ver con la capacidad del material para absorber energía con daños preexistentes,



Buque rompehielos Almirante Viel durante la reciente campaña antártica de verano (2024/2025) efectuando sus pruebas de rompimiento de hielo de hasta 1,2 m de espesor. Esta prueba demuestra la tenacidad que deben tener los aceros utilizados para la construcción del casco de un buque de estas características.

Fotografía cortesía de la Armada de Chile.

esta es la tenacidad a la fractura. En términos muy simples, se evalúa como la resistencia que presenta el material a la propagación de una grieta preexistente, el cual se somete a la acción de una carga estática o quasi – estática (Anderson, 2017). En la práctica, nos sirve para evaluar los tamaños críticos o máximos que pudiesen tener los daños o grietas en un sólido (activo, parte o pieza) sometido a diferentes cargas, antes que la grieta se propague en forma inusitada y se produzca una falla catastrófica, concepto fundamental de las inspecciones no destructivas (NDI: Non Destructive Inspection) efectuadas en estructuras navales, aeronáuticas, cañerías y otras industrias. Dicho todo lo anterior, el acero de baja aleación y bajo carbono, aparte de ser económicamente atractivo y soldable, su combinación de alta tenacidad (tracción, impacto y fractura) y ductilidad, lo hacen el material preferido en la construcción de cascos de buques.

- Resistencia a la fatiga: las estructuras navales experimentan cargas cíclicas debido a las olas y las operaciones normales. Las cargas relacionadas con las olas, corrientes y el viento son consideradas

de alta carga, pero baja frecuencia (bajo ciclo), las que pueden llegar a producir en algunos casos deformación plástica, endurecimiento por deformación, sobrecarga mecánica y ruptura del componente en poco tiempo, obedeciendo a una falla en el diseño y selección del material de fabricación que no se condice a la magnitud de cargas que debe soportar la estructura o el activo. Las cargas relacionadas a las operaciones normales se refieren a vibraciones inducidas por las plantas de potencia (motores), líneas de transmisión, hélices, maquinaria auxiliar, etc., son consideradas de baja carga, pero alta frecuencia (alto ciclo), las que producen cargas cíclicas menores, deformación elástica macroscópica y una vida útil predecible del componente si es bien monitoreado (Vorus, 2010). Bien sabido es que los materiales con estructura cristalina BCC presentan límite de fatiga, no así los FCC, es decir, los BCC por debajo de una cierta carga no nuclearán ni propagarán grietas debido a este fenómeno. Al igual que para el caso de la tenacidad, los aceros de baja aleación y bajo carbono, presentan estructura cristalina BCC y, por lo tanto, se hacen más atractivos para usarlos en la confección de cascos que las alea-

ciones de aluminio de la serie 5000, que poseen estructura cristalina FCC. Sin embargo, debido al mejor mantenimiento de los activos con estructura cristalina BCC, su uso ha aumentado en tiempo y ciclos de carga, por lo que hoy se están analizando e investigando los daños que se generan en materiales con límite de fatiga, pero con ultra-alto ciclo (Pérez Ipiña, 2004).

- Resistencia a la corrosión: la resistencia a la corrosión de los materiales es una propiedad fundamental que determina la capacidad que poseen para resistir el deterioro causado por reacciones químicas o electroquímicas con su entorno. Este deterioro puede manifestarse de diversas formas, como oxidación, picaduras, grietas o pérdida de masa. Los ambientes atmosféricos salinos y el agua de mar son altamente corrosivos, por lo que los materiales utilizados en la construcción naval deben resistir la corrosión para garantizar la vida útil de las embarcaciones durante todo el ciclo de vida programado. Factores como la composición química y microestructura del material, el ambiente, recubrimientos y tratamientos superficiales, pueden ser determinantes en la mitigación de este fenómeno, el cual genera grandes pérdidas en la industria naval.

4. Procesos metalúrgico-mecánicos asociados a la construcción naval

La elaboración de los materiales metálicos, como también las partes y piezas utilizadas para la construcción naval, implican varios procesos metalúrgicos. Entre ellos se encuentran la fundición, la laminación, el tratamiento térmico, la soldadura y el conformado (Williams, 1976).

- Fundición: la fundición es el proceso de verter metal fundido en moldes para crear piezas con formas específicas. Este proceso se utiliza para fabricar componentes estructurales y piezas de maquinaria para diferentes tipos de embarcaciones, cuya geometría es altamente compleja o son de un gran tamaño en volumen, dentro de los cuales destacan los llamados macizos: hélices, ejes, descansos de líneas de ejes, descanso de empuje y tubos de codaste, entre otros. Dadas las exigentes especificaciones técnicas de estos componentes, las fundiciones especializadas en estos trabajos son pocas y sus productos tienen un alto valor comercial, debido a la criticidad que representan en la estructura de un buque de gran tamaño o de alta complejidad.

- Laminación: La laminación es el proceso de pasar el metal a través de rodillos para reducir su espesor y mejorar sus propiedades mecánicas. Las planchas laminadas de acero se utilizan comúnmente en la construcción de cascos y otras partes estructurales de las embarcaciones, por lo que este producto plano es el más demandado en la construcción naval. Países que desarrollan la industria de construcción naval, muchas veces también desarrollan la industria siderúrgica o al revés, ya que la interacción y sinergia entre ellas es directa.
- Tratamiento térmico: el tratamiento térmico, que incluye procesos como el temple y el revenido (QT), se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas de los metales. Este proceso es esencial para garantizar que los materiales metálicos utilizados en la construcción naval cumplan con los estándares requeridos de resistencia y durabilidad. Para el caso de los buques, generalmente se utiliza acero al carbono de baja aleación que cumpla la norma ASTM A131, el cual es normalizado, con microestructura ferrítica – perlítica, sin embargo, para el caso de los aceros utilizados en la construcción del casco de submarinos convencionales y nucleares, poseen una composición química diferente y son tratados térmicamente con QT.

- Soldadura: la soldadura es un proceso de unión de materiales, generalmente metálicos, en el cual se produce la unión de las piezas mediante la aplicación de calor, presión o ambos, con o sin el aporte de un material de relleno, utilizando los conceptos metalúrgicos de fusión, difusión atómica y solidificación. Es una técnica fundamental en la construcción naval, ya que permite ensamblar grandes estructuras metálicas de manera eficiente. La calidad de las soldaduras es crucial para la integridad estructural de los buques. Debido al ambiente marino, esta soldadura debe cumplir con requisitos específicos de resistencia a la corrosión y tenacidad, utilizándose en aceros navales especiales, como el AH36 y HY80 que tienen alta resistencia y ductilidad. Se aplican procesos de soldadura que garantizan la calidad de las uniones, como la soldadura por arco sumergido (SAW). Se realizan inspecciones no destructivas rigurosas para asegurar la integridad de las soldaduras, dentro de las cuales destacan el ultrasonido y la gammagrafía.
- Conformado: el conformado metálico es un conjunto de procesos de fabricación que se utilizan



Proceso de soldadura automatizada durante la confección de un mamaparo estructural de un buque en construcción. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

para dar forma a los metales mediante la aplicación de fuerzas. En la construcción naval, estos procesos son esenciales para la creación de los componentes estructurales de los buques, como el casco, la cubierta y las cuadernas. Dentro de los procesos que destacan están:

- Plegado: se utiliza para crear ángulos y curvas en las planchas de metal. Se realiza aplicando fuerza a la plancha para doblarla alrededor de una matriz.
- Curvado: este proceso se utiliza para crear curvas complejas en las planchas de metal. Se realiza utilizando rodillos o prensas hidráulicas.
- Embutición: se utiliza para crear formas cóncavas en las planchas de metal. Se realiza presionando la plancha sobre una matriz con un punzón.

- Forjado: se utiliza para dar forma a los metales mediante golpes o presión. Se utiliza para crear componentes de alta resistencia, como ejes y hélices.

5. Innovaciones y avances tecnológicos

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval han experimentado en conjunto numerosos avances tecnológicos que han mejorado significativamente los niveles de calidad, producción, rendimiento y seguridad de las embarcaciones.

- Materiales compuestos: los materiales compuestos, que combinan metales con otros materiales como polímeros y cerámicos, están ganando popularidad en la construcción naval. Estos materiales ofrecen una excelente resistencia específica y resistencia a la corrosión, lo que los hace

ideales para aplicaciones de alto valor tecnológico como son los USV (Unmanned Surface Vehicle), UUV (Unmanned Underwater Vehicle), cascos de embarcaciones de recreo, barcos de pesca, embarcaciones de alta velocidad y buques militares. Se utilizan para construir cubiertas, mamparos y otras estructuras no estructurales, lo que reduce el peso y mejora la estabilidad, como también componentes estructurales como mástiles, timones, hélices y tanques de almacenamiento para hidrógeno verde (H2V). Algunos desafíos y consideraciones son su alto costo, reparación compleja, falta de normativa y estandarizaciones para su uso en construcción naval y su bajo índice de reciclaje, lo que los hace poco atractivos en términos de sustentabilidad.

- Tecnologías de soldadura avanzadas: la soldadura, un proceso fundamental en la unión de materiales, ha experimentado avances significativos en los últimos años en el ámbito de la construcción naval. Las tecnologías de soldadura avanzadas han surgido para satisfacer las demandas de esta industria que requiere precisión, eficiencia y calidad en sus uniones (Mandal, 2017). Algunas tecnologías destacadas son:
 - Soldadura por láser: esta técnica utiliza un haz de luz de alta intensidad para fundir y unir materiales. Ofrece alta precisión, baja deformación térmica y la capacidad de soldar materiales delgados y complejos.
 - Soldadura por fricción-agitación (FSW): un proceso de estado sólido que genera calor mediante fricción y agitación mecánica. Produce uniones de alta calidad sin la necesidad de materiales de relleno. Se utiliza preferencialmente en la fabricación de cascos de aluminio.
 - Soldadura robótica y automatización: la integración de robots y sistemas automatizados en los procesos de soldadura. Aumenta la productividad, la consistencia y la seguridad. Permite ser aplicada en producción masiva y entornos confinados que pueden implicar peligro, como son estanques de buques o cascos de submarinos.
 - Soldadura híbrida láser-GMAW: combina la precisión del láser con la eficiencia de la soldadura por arco metálico con gas (GMAW). Ofrece alta velocidad de soldadura, buena calidad de unión y la capacidad de soldar materiales gruesos.
- Soldadura por haz de electrones (EBW): este tipo de soldadura usa un haz de electrones de alta velocidad en un ambiente de vacío para realizar soldaduras de alta calidad. Es utilizado en aplicaciones que requieran una alta precisión, y en materiales que son difíciles de soldar con otros métodos.
- Innovaciones adicionales en procesos de soldadura: sensores avanzados para monitoreo en tiempo real de los parámetros de soldadura para garantizar la calidad y la seguridad. Control de calidad automático con sistemas que inspeccionan las soldaduras y detectan defectos de forma inmediata. Realidad aumentada que integra simuladores que permiten la capacitación de soldadores en entornos virtuales, reduciendo costos y riesgos (Boekholt, 1996).
- Manufactura avanzada: El desarrollo de nuevas tecnologías digitales relacionadas con la manufactura está facilitando la implementación de la Industria 4.0 y 5.0. Incluye una combinación de técnicas, procesos y tecnologías emergentes que permiten la creación de componentes y estructuras con alta precisión, eficiencia y calidad, con el objetivo de mejorar el producto (Shrivastava et al., n.d.). Entre las técnicas relevantes se encuentran el mecanizado numérico automatizado y la manufactura aditiva metálica.
 - Mecanizado numérico automatizado: El mecanizado tradicional que eliminan material para crear la forma deseada sigue siendo fundamental en la producción de piezas y componentes. Los procesos como el fresado y el torneado se han perfeccionado con la integración de sistemas CNC (Control Numérico por Computadora) y modelos digitales, mejorando la precisión, repetibilidad y calidad de los procesos y productos.
 - Manufactura aditiva metálica: También conocida comúnmente como impresión metálica 3D, está cambiando la manera en la que se podrían producir las piezas complejas o desarrollar su reparación en caso de falla. Esta tecnología permitiría la fabricación/reparación de componentes directamente a partir de modelos digitales, reduciendo los tiempos de producción y los costos. No es una tecnología absolutamente madura en la fabricación, presentando una serie de desafíos asociados al tamaño y calidad de las piezas y componentes. Entre las principales técnicas se encuentran:



Proceso de conformado metálico de curvatura simple una sección del casco de un buque en construcción.
Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

Fusión selectiva por láser (SLM), Inyección de aglutinante (MBJ), Deposición de metal aglutinado (BDM), Fabricación aditiva por ultrasónidos (UAM), Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), Cladding, Thermal Spray (Joshi *et al.*, 2023).

6. Desafíos y oportunidades para la industria metalúrgica de Chile en el contexto de la Política Nacional de Construcción Naval

El pasado 10 de enero del 2025, el Presidente de la República, Gabriel Boric Font, en el marco de su gira por la región del Biobío, firmó en los Astilleros y Maestranzas de la Armada (ASMAR) en Talcahuano, la Política Nacional de Construcción Naval. Si bien, esta noticia para algunos puede haber pasado desapercibida, representa un punto de inflexión para la construcción naval en Chile y una oportunidad para la industria nacional, especialmente la metalúrgica.

Tal como fue expresado en los puntos precedentes, la ingeniería metalúrgica representa una de las fuerzas motrices fundamentales para el desarrollo de otras industrias intensivas como la de construcción naval. Siendo más taxativo, sin metalurgia, no hay desarrollo de ninguna otra industria, y muchas veces la decisión pasa por importar la metalurgia y no desarrollarla en el propio país, con el propósito de evitar los costos de implementar una industria pesada de excelencia o por la ausencia de materias primas propias. Pero este no es el caso de Chile, que actualmente posee una industria metalúrgica cautiva y proveedora de la industria minera. Entonces, tal vez, la problemática sea la diversificación y la oportunidad podría estar en la construcción naval.

Históricamente, algunas naciones apostaron su desarrollo tecnológico en industrias similares a la naval, como la automotriz o la aeronáutica, pero todas, en términos económico – sociales, tienen la similitud de

buscar el desarrollo sobre la base de tres vectores: la academia, la industria y el estado (Etzkowitz y Leydesdorff, 1995). Pero ¿cuáles son los elementos diferenciadores de la industria naval para Chile?

La industria naval y marítima juega un papel crucial en la economía global, siendo responsable de transportar más del 90% del comercio internacional de mercancías, de las cuales, más del 70 % corresponden a commodities (minerales, metálicos, combustibles y agrícolas, entre otros). Para un futuro de mediano plazo, se prevé que la revolución tecnológica y económica asociada a la retirada paulatina de los combustibles fósiles, determine que Chile se convierta en uno de los principales productores y exportadores a nivel mundial de vectores energéticos o commodities energéticos avanzados y sustentables, tales como el Litio, Hidrógeno Verde y sus derivados, cuya única manera de ser transportados es por mar, ge-

nerando grandes necesidades de desarrollo naviero e infraestructura portuaria (Gobierno de Chile, 2018). Todo lo anterior determina y le da fuerza a la importancia estratégica de la actividad marítima para el desarrollo del país. Su valor se extiende a diversos aspectos, desde la construcción y el mantenimiento de buques, la operación de puertos, la prestación de servicios logísticos, desarrollo de tecnología, generación de empleos, impulso de la innovación, contribución a un futuro más sostenible, capacidad para facilitar el comercio internacional y contar con personal más calificado (Till, 2023).

Específicamente, la construcción naval presenta un conjunto de oportunidades significativas para el desarrollo nacional, abarcando aspectos económicos, sociales, educacionales, tecnológicos y estratégicos (Till, 2009).



El pasado 10 de enero del presente año, en los Astilleros y Maestranzas de la Armada (ASMAR) de Talcahuano, el Presidente de la República Gabriel Boric Font firmó la Política Nacional de Construcción Naval, en el marco de su gira por la región del Biobío. Fotografía cortesía de Prensa Presidencia, Gobierno de Chile.

Una industria de construcción naval robusta y desarrollada tiene un alto impacto en la economía, generando miles de empleos directos e indirectos, en diversos sectores, de buena calidad, bien remunerados, duraderos y con oportunidades de capacitación para la mano de obra local.

Se estima que, por cada empleo directo en construcción naval, se generan entre 2 y 3 empleos indirectos en otras áreas de la economía, generándose un fortalecimiento de la industria nacional y de la oferta laboral. Esto contribuye al desarrollo social de las comunidades donde se ubican los astilleros impulsando el desarrollo regional, ya que los astilleros suelen generar un efecto dinamizador en la economía local (De la Llera, 2018).

Lo anterior, demandará el ajuste o modificación de planes de estudios en distintas áreas de la Academia, acompañado implícitamente de mayor desarrollo tecnológico e innovación, ya que la construcción naval exige un alto nivel de conocimiento científico, técnico y tecnológico, lo que impulsa la investigación y el desarrollo en diversas áreas. Además, fomenta la transferencia de tecnología y la creación de nuevas empresas de base tecnológica capaces de ampliar su rubro de desempeño. El desarrollo de tecnologías propias permite a los países ganar competitividad en el mercado internacional.

La construcción naval puede convertirse en una importante fuente de exportaciones para un país, generando ingresos de divisas y contribuyendo al crecimiento del PIB, ya que los buques construidos en el Chile pueden ser vendidos a armadores nacionales e internacionales. La exportación de componentes y servicios navales también es una oportunidad para las empresas del sector.

Una industria naval sólida permite a un país construir y mantener sus propios buques militares, lo que aumenta su capacidad de defensa y disuasión. Esto también reduce la dependencia de otros países para la adquisición de armamento y equipos navales. Una fuerte presencia naval es clave para proteger la soberanía marítima y los intereses nacionales.

Claramente, la consolidación de una industria como la de construcción naval, demandará el soporte de una industria metalúrgica robusta y de vanguardia, la cual podría ser extranjera o nacional. Entonces, la gran pregunta es: ¿la industria metalúrgica chilena está dispuesta a tomar el desafío?

Referencias

- Anderson TL. 2017. Fracture mechanics: Fundamental and Applications. Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Ratón, USA.
<https://doi.org/10.1201/9781315370293>
- Andrews D. 2012. Choosing the style of a new design - the key ship design decision. International Journal of Maritime Engineering 154 (A2).
<https://doi.org/10.5750/ijme.v160iA1.1048>
- Boekholt R. 1996. Welding systems and processes used in the fabrication, assembling and building dock. In Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide.
<https://doi.org/10.1533/9780857093196.69>
- Bruce G. 2021. Shipbuilding management. Springer Nature In Shipbuilding Management.
<https://doi.org/10.1007/978-981-15-8975-1>
- Dieter GE. 1988. Mechanical metallurgy. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, USA.
[https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(62\)91145-6](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(62)91145-6)
- De la Llera, J. et al. (2018). EVALUACIÓN ECONÓMICA-SOCIAL DE ALTERNATIVAS PARA LA RENOVACIÓN DE LA FUERZA DE SUPERFICIE DE LA ARMADA DE CHILE.
- Etzkowitz H, Leydesdorff L. 1995. The triple helix - University - Industry - Government relations: A Laboratory for Knowledge Based Economic Development. EASST Review 14: 14-19.
- Gobierno de Chile. 2018. Política Oceánica Nacional de Chile. https://www.acanav.cl/wp-content/uploads/2021/07/poli_tica_ocea_nica_nacional_de_chile_ok-1.pdf
- Joshi S, Martukanitz RP, Nassar AR, Michaleris P. 2023. Additive manufacturing with metals: Design, processes, materials, quality assurance, and applications. In: Additive manufacturing with metals: Design, processes, materials, quality assurance, and applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37069-4>
- Kerwin JE, Hadler JB. 2010. The principles of naval architecture series: Propulsion. In: Society of Naval Architects and Marine Engineers. <https://app.knovel.com/kn/resources/kpPNASP004/toc>

- Larsson L, Raven HC, Paulling JR. 2010. Ship resistance and flow. <https://www.rexresearch1.com/BoatShipBuildingLibrary/PrinciplesNavalArchitShipResistanceFlow.pdf>
- Lee BS. 2019. Flotation. In: Hydrostatics and stability of marine vehicles. In: Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping.
- Mandal NR. 2017. Ship construction and welding. In: Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping. <http://www.springer.com/series/10523>
- Ministry of Defence UK. 2022. National Shipbuilding Strategy UK: A refreshed strategy for a globally successful, innovative and sustainable shipbuilding enterprise. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/643873/NationalShipbuildingStrategy_lowres.pdf
- Moore CS, Paulling JR. 2022. Intact stability. In: Encyclopedia of Ocean Engineering. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8_300387
- Pantelakis S, Rodopoulos C. 2009. Engineering against fracture. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9402-6>
- Pérez Ipiña J. 2004. Mecánica de fractura. In: Alsina E. (Ed.). Librería y Editorial Alsina. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>
- Shrivastava A, Arora A, Srivastava C, Dhawan N, Singh SS. 2023. New horizons in metallurgy, materials and manufacturing. Springer Nature.
- Tibbitts BF. 2022. Naval surface ships. In: Ship Design & Construction, Volume 2, Chapter 55.
- Till G. 2009. Seapower, a guide for the Twenty-First Century. Ed. Routledge, London, UK.
- Till G. 2023. How to grow a navy: The development of maritime power. In: Taylor & Francis Group, Ed. Routledge, <https://doi.org/10.4324/9781003100553>
- UNCTAD. 2023. Review of maritime transport 2023, towards a green and just transition. United Nations Publications Ed. <https://doi.org/10.18356/9789213584569c006>
- Vorus WS. 2010. The principles of naval architecture Series: Vibration. Published by The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey, USA.
- Williams JD. 1976. Materials for engineers. In: Production engineer (Vol. 55, Issue 4). <https://doi.org/10.1049/tpe.1976.0066>