



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Nuevos materiales. Posibilidades de la utilización del grafeno y materiales compuestos en la construcción naval

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Javier Zulueta Cuquerella

DIRECTORES: Pedro Carrasco-Pena

Gerardo González-cela Echevarría

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Nuevos materiales. Posibilidades de la utilización del grafeno y
materiales compuestos en la construcción naval*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) realiza una evaluación preliminar de la viabilidad técnica y económica de implementar grafeno en la construcción naval militar en sustitución del acero naval Grado A. El estudio analiza el comportamiento estructural de la viga-casco mediante una validación cruzada entre cálculos analíticos y simulaciones por elementos finitos (FEM), evaluando la flexión, la resistencia y los criterios de fallo en laminados anisotrópicos. Los resultados identifican un compromiso crítico de diseño: mientras que una carga del 0,5% en masa de nanoplaquetas de grafeno (GNP) constituye el óptimo mecánico basado en la literatura al elevar la resistencia a 285 MPa, se propone el 1,0% en masa como referencia operativa con el fin de superar el umbral de percolación eléctrica indispensable para el blindaje electromagnético (EMI) y garantizar la viabilidad de infusión industrial. Bajo el criterio de igual capacidad resistente, la viga-casco representativa alcanza una reducción de masa lineal del 70,8 % frente al acero; para la evaluación económica a escala de plataforma se adopta una reducción estructural global conservadora del 39 %. El análisis económico, planteado como una estimación orientativa bajo escenarios de incertidumbre, arroja un periodo de retorno (payback) de 4,2 años para un Buque de Acción Marítima (BAM) en el escenario medio. Finalmente, la integración multicriterio mediante el método TOPSIS concluye que, si bien el acero sigue siendo el estándar por madurez industrial, el PRFV dopado al 0,5% con grafeno se posiciona como una solución estratégica viable para nichos tácticos donde la ligereza y la baja firma electromagnética sean prioritarias frente al coste inicial.

PALABRAS CLAVE

Grafeno, Materiales compuestos, Construcción naval, Análisis mecánico, Método TOPSIS.

DEDICATORIA

A mis padres, por haber sido los fundadores de un hogar donde el trabajo se vive con alegría y por forjar en mí el temple de las virtudes que hoy me definen. A mis hermanos: Álvaro, por su entereza y buen corazón; Íñigo, por ser motivo constante de admiración; Manuela, por su integridad y liderazgo natural; Vicente, por su bondad innata y Santiago, por su energía inagotable. Sin saberlo, todos habéis sido el motor inestimable que me ha impulsado a culminar este proyecto.

A mis amigos de la escuela: Gonzalo, Jaime, Juan, Manuel, Kiko, Nico, Javi y Pablo, entre otros muchos. Gracias por ser mi válvula de escape y por compartir tantas noches interminables de estudio a lo largo de estos años. A Pili, que, sin saberlo, ha estado presente en cada palabra de este trabajo. Y, por último, a Dios, por todo lo anterior.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores, el CC D. Pedro Carrasco-Pena y el CF D. Gerardo González-cela Echevarría. Su orientación profesional, su exigencia en el detalle y su capacidad para fomentar la excelencia de una manera tan amena y natural han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco profundamente la generosidad y el tiempo dedicado por Javier Pérez Martínez de Avanzare Materials, Santiago Martín y Adolfo Navarro de Astilleros Armón, y Raimundo Tapia y Olalla Vilela de Rodman Polyships. Su amplia experiencia en el sector naval de unos y en el uso de nanomateriales de otros, compartida a través de extensas entrevistas técnicas y visitas a sus instalaciones, han constituido una base de conocimiento esencial para analizar la viabilidad del grafeno en la construcción naval contemporánea objeto de este TFG.

Finalmente, agradezco al Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar y a la Universidad de Vigo por facilitar los medios necesarios para la consecución de este Grado en Ingeniería Mecánica.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos.....	9
1.1 Contexto y motivación	9
1.2 Objetivos	11
1.3 Metodología	12
2 Estado del arte	14
2.1 Definición, características y aplicaciones del grafeno	14
2.1.1 Propiedades químicas y geométricas del grafeno.....	15
2.1.2 Consideraciones sobre la aplicación del grafeno en estructuras	15
2.1.3 Aplicaciones del grafeno para tratamientos superficiales	16
2.1.4 Aplicación en estructuras ligeras y ultrarresistentes	17
2.1.5 Aplicaciones en blindaje electromagnético y firmas reducidas	18
2.1.6 Aplicaciones en baterías y supercondensadores navales.....	18
2.1.7 Aplicaciones en sensores estructuralmente integrados	19
2.1.8 Aplicaciones a servicios y sistemas anticorrosión	20
2.1.9 Aplicaciones a la propulsión y mejora hidrodinámica	21
2.1.10 Aplicaciones sistemas de armas y almacenamiento de energía.....	22
2.2 Definición, tipos y aplicaciones de los materiales compuestos	22
2.2.1 PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio)	22
2.2.2 PRFC (Poliéster Reforzado con Fibra de Carbono)	22
2.2.3 PRFA (Poliéster Reforzado con Fibra de Aramida).....	23
2.3 La producción en materiales compuestos en construcción naval	24
2.3.1 Laminado manual	24
2.3.2 Infusión por vacío.....	24
2.4 Consideraciones sobre plásticos para aplicar en este TFG	25
2.5 PRFV cargado con grafeno en masa: cargas más habituales	25
2.5.1 Cargas de grafeno	26
2.6 Justificación técnica de la carga del 0,5% de grafeno para este TFG	27
2.7 Los materiales compuestos y el grafeno a nivel normativo	28
2.8 Métodos de modelado de las estructuras navales.....	29
2.8.1 Evolución de los métodos de análisis estructural en la ingeniería naval.....	29
2.8.2 Validación cruzada: métodos analíticos y numéricos	30

2.8.3	Modelado y simulación en Autodesk Inventor.....	30
2.8.4	Implicaciones normativas y Sociedades de Clasificación.....	30
2.9	Herramienta de análisis multicriterio TOPSIS.....	31
2.9.1	Formulación básica de la metodología TOPSIS.....	31
2.9.2	La metodología TOPSIS en el sector naval.....	32
2.10	Comparación estructural: el buque como viga.....	33
3	Trabajo de campo y entrevistas	34
3.1	Entrevista al director de Astilleros Armón (Navia)	35
3.1.1	Conclusión técnica de la entrevista	35
3.2	Entrevista al responsable de desarrollo de negocio de “Avanzare Materials”.....	36
3.2.1	Conclusión técnica de la entrevista	37
3.3	Entrevista al director de Astilleros Armón (Vigo).....	37
3.3.1	Conclusión técnica de la entrevista	38
3.4	Entrevista al director técnico de Astilleros Rodman Polyships	38
3.4.1	Conclusión técnica de la entrevista	38
3.5	Entrevista a la directora de laboratorio de Rodman Polyships	39
3.5.1	Conclusión técnica de la entrevista	39
3.6	Visita a Astilleros Armón (Vigo).....	40
3.6.1	Conclusión técnica de la visita	40
3.7	Visita a Astilleros Rodman Polyships (Moaña).....	41
3.7.1	Conclusión técnica de la visita a Rodman Polyships	43
4	Desarrollo	45
4.1	Cálculo mecánico de la viga casco de un buque	45
4.1.1	Secciones representativas en construcción naval	45
4.1.2	Justificación de los perfiles escogidos.....	46
4.1.3	Parámetros de diseño y metodología de cálculo	46
4.1.4	Viga casco sección cuadrada. (Caso I).....	47
4.1.5	Viga en Doble T: caso didáctico tradicional. (Caso II).....	50
4.1.6	Interpretación técnica	51
4.2	Análisis comparado de los resultados FEM.....	52
4.2.1	Modelado de elementos en Autodesk Inventor (acero naval)	52
4.2.2	Implicaciones a nivel normativo para el modelado FEM de laminados	53
4.2.3	Consideraciones sobre el modelado FEM.....	53
4.2.4	Modelado de la viga-casco de sección cuadrada.....	53
4.2.5	Modelado de la viga-casco de sección en doble T	70
4.3	Estudio económico	75

4.3.1	Definición de los casos de estudio y parámetros de diseño	75
4.3.2	Masa estructural y ahorro de combustible.....	76
4.3.3	Consumo de combustible y superficie mojada.....	77
4.3.4	Modelo económico simplificado	78
4.3.5	Periodo de retorno y VAN.....	80
4.3.6	Modelo de sensibilidad multivariable	81
4.3.7	Consideraciones sobre los resultados	82
4.3.8	Conclusión técnica	83
4.4	Metodología TOPSIS para la toma de decisiones aplicada	83
4.4.1	Alternativas y criterios de evaluación	83
4.4.2	Construcción de la matriz de decisión, normalizada y ponderada	84
4.4.3	Soluciones ideales y coeficientes de cercanía	85
4.4.4	Análisis de sensibilidad de la metodología TOPSIS	87
4.4.5	Conclusión de resultados de la aplicación del TOPSIS	87
4.4.6	Justificación del uso de método TOPSIS	87
5	Análisis de resultados.....	89
5.1	Análisis de la literatura en la materia.....	89
5.2	Análisis de los resultados del trabajo de campo: visión de la industria.....	90
5.3	Resultados del análisis mecánico y FEM.....	91
5.3.1	Resultados de análisis numérico.....	91
5.3.2	Resultados del análisis FEM comparado.....	93
5.3.3	Resultados de las vigas en doble T.....	95
5.4	Resultados de viabilidad económica y operativa	96
5.4.1	Análisis del Coste del Ciclo de Vida (LCC) y Periodo de Retorno	96
5.5	Resultado final del análisis multicriterio (TOPSIS)	99
6	Conclusiones y líneas futuras.....	101
6.1	Conclusiones	101
6.1.1	Conclusión general del trabajo.....	102
6.1.2	Limitaciones del estudio.....	103
6.2	Líneas futuras	103
7	Bibliografía.....	104
	Anexo I: implicaciones sociales, económicas, y ambientales	113
	Anexo II: reflexiones éticas y sociales	114
	Anexo III: entrevista al director del astillero Armón (Navia)	115
	Anexo IV: entrevista al director comercial de Avanzare Materials	122

Anexo V: entrevista al director de los astilleros Armón (Vigo).....	130
Anexo VI: entrevista al director técnico Rodman Polyships (Moaña).....	135
Anexo VII: entrevista a la directora del laboratorio de Rodman Polyships	144
Anexo VIII: informe de propiedades del PRFV de Rodman Polyships.....	147
Anexo IX: informe de Avanzare Materials	148
Anexo X: imágenes obtenidas durante las visitas técnicas	149
Anexo XI: declaración sobre uso responsable de herramientas IA	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Representación de la configuración del grafito a) y del grafeno en b).....	15
Figura 2-2 Buque <i>Graphenano One</i> , primer y único construido con grafeno.....	16
Figura 2-3 Resistencia última a flexión para concentraciones de grafeno en PRFV	18
Figura 2-4 Representación de batería de grafito en a) y representación de la de grafeno en b).....	19
Figura 2-5 Esquema de aplicación de nano-láminas de grafeno para SHM.....	20
Figura 2-6 Esquema de aplicación de nano-láminas de grafeno para SHM.....	20
Figura 2-7 Esquema de las resistencias de un buque en navegación (Elaboración propia)	21
Figura 2-8 Embarcación de vela ligera a); barco de alta competición b).....	23
Figura 2-9 Pieza de estructura en aramida (Kevlar) para ensayo en laboratorio.....	23
Figura 2-10 Conformado de perfil de casco en material compuesto por laminado manual.....	24
Figura 2-11 Fabricación de mamparo en material compuesto mediante infusión al vacío	25
Figura 2-12 Esquema cualitativo de elaboración propia basada en [63] [64]	28
Figura 2-13 Flujograma de aplicación de la metodología TOPSIS.....	31
Figura 2-14 Representación de viga casco y doble T sometida a quebranto y arrufo.....	33
Figura 3-1 Composición de maquinaria típica de astillero de construcción en acero.	41
Figura 3-2 Proceso de conformado de estructuras PRFV en Rodman Polyships (I).	42
Figura 3-3 Proceso de conformado de estructuras PRFV en Rodman Polyships (II).	43
Figura 4-1 Viga-casco con forma cuadrada de 500 x 500 mmy 6 mm de espesor.	48
Figura 4-2 Sección cuadrada, fundamento de las fórmulas de I y A.....	49
Figura 4-3 Sección doble T, fundamento de las fórmulas de I y A.....	50
Figura 4-4 Mallado TET10 de la viga-casco de acero en Nastran In-CAD	54
Figura 4-5 Desplazamientos (mm) en la viga-casco acero con 463 kN (sección cuadrada).....	55
Figura 4-6 Distribución del $SF \approx 1,0$ en la fibra de máxima tracción (sección cuadrada).	56
Figura 4-7 Configuración del laminado PCOMP en Nastran In-CAD.....	58
Figura 4-8 Condiciones de contorno y carga del modelo Nastran In-CAD para viga laminada.	58
Figura 4-9 Distribución tensión normal máxima a) y mínima b) en MPa.....	59
Figura 4-10 Distribución del <i>Strength Ratio</i> (SR) mínimo por capa.	60
Figura 4-11 Configuración del laminado PCOMP equivalente en Nastran In-CAD	62
Figura 4-12 Distribución de desplazamientos PRFV con $t = 10,96$ mm. (463 kN).	62
Figura 4-13 Distribución de ten ion máxima a) y distribución de tensión mínima b).....	63
Figura 4-14 Distribución del SR mínimo por capa (criterio Tsai-Wu)	63
Figura 4-15 Distribución tensión máxima tracción a); distribución tensión mínima b).....	65
Figura 4-16 Distribución del SR mínimo por capa. PRFV+GNP, $t=10,96$ mm y 463 kN.....	66
Figura 4-17 Tensión normal máxima a). Tensión normal mínima b)	69
Figura 4-18 Distribución del SR mínimo por capa con carga de 0,5% de grafeno	69

Figura 4-19 Obtención de la sección doble T a partir de la viga-casco cuadrada	71
Figura 4-20 SF y flecha en la viga-casco de acero en sección doble T; SF aprox. 1 zona central..	72
Figura 4-21 Desplazamientos en mm PRFV 0,5% GNP de doble T	74
Figura 4-22 SR mínimo del laminado completo de la viga en PRFV 0,5 % GNP de doble T	74
Figura 4-23 Gráfica de fracción estructural según eslora.....	76
Figura 4-24 Comparación del coeficiente de cercanía obtenido mediante TOPSIS	86
Figura 5-1 Comparativa de la carga límite (P_{lim}).....	91
Figura 5-2 Comparativa del peso lineal estructural.....	92
Figura 5-3 Flecha máxima por deformación elástica.	94
Figura 5-4 Masa lineal y eficiencia del peso.	95
Figura 5-5 Proyección del ciclo de vida LCC para el BAM acumulado a 30 años.....	97
Figura 5-6. Periodos de retorno discretos y ajustes cuadráticos por mínimos cuadrados	98
Figura 5-7 Coeficientes de cercanía con respecto a los escenarios planteados.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Selección de criterios de ponderación objetivos	13
Tabla 4-1 Propiedades obtenidas en la literatura.....	47
Tabla 4-2 Viga cuadrada. Análisis A: carga límite geometría fija	49
Tabla 4-3 Viga cuadrada. Análisis B: espesor equivalente para igual carga.....	49
Tabla 4-4 Viga doble T. Análisis A: carga límite con geometría fija para cada material	51
Tabla 4-5 Doble T. Análisis B: Esp. equivalente para igual carga límite	51
Tabla 4-6 Comparación de resultados analíticos y FEM viga-casco acero cuadrada	56
Tabla 4-7 Propiedades mecánicas de los materiales definidos en Nastran (MAT8).....	57
Tabla 4-8 Secuencia de apilamiento del laminado PCOMP	57
Tabla 4-9 Comparación de resultados analíticos y FEM para la viga de PRFV	61
Tabla 4-10 Apilamiento del laminado equivalente PCOMP (t = 10,96 mm).....	61
Tabla 4-11 Comparación de resultados FEM para los tres modelos analizados	64
Tabla 4-12 Propiedades de los materiales para PRFV	65
Tabla 4-13 Comparación directa PRFV base vs PRFV+GNP 0,5 % (t=10,96 mm).....	66
Tabla 4-14 Propiedades mecánicas, espesor y masa lineal para cada material.	67
Tabla 4-15 Laminado PRFV + GNP 0,5 % (t = 7,65 mm).....	68
Tabla 4-16 Comparación de los resultados del estudio de sección cuadrada.....	70
Tabla 4-17 Laminado de la viga PRF GNP 0,5% doble T (Esp.: espesor)	73
Tabla 4-18 SR de cada elemento estructural del al viga PRFV-0,5% GNP, doble T	75
Tabla 4-19 Tabla de parámetros de las plataformas consideradas	76
Tabla 4-20 . Resultado estructural y ahorro propulsivo adoptado.....	77
Tabla 4-21 Consumos y horas de navegación de las plataformas	78
Tabla 4-22 Areas mojadas (WSA) de cada plataforma	78
Tabla 4-23 Coste inicial y ahorro operativo anual	80
Tabla 4-24 Periodos de retorno y VAN a los 10 años.....	81
Tabla 4-25 Matriz de Ponderación de Escenarios	82
Tabla 4-26 Rangos estimados de amortización según escenario	82
Tabla 4-27 Matriz de decisión genérica.	84
Tabla 4-28 Matriz de decisión final	84
Tabla 4-29 Matriz normalizada	84
Tabla 4 30 Ponderación de criterios	85
Tabla 4-31 Matriz normalizada ponderada.....	85
Tabla 4-32 Solución ideal positiva y negativa	85
Tabla 4-33 Valor diferencial con ideal positivo	86
Tabla 4-34 Valor diferencial con ideal negativo	86

Tabla 4-35 Coeficientes de cercanía.....	86
Tabla 5-1 Comparación de hallazgos en los capítulos 2 y 3 del TFG.....	90
Tabla 5-2 Periodos de retorno	98
Tabla 5-3 Tabla de escenarios considerados para el estudio de sensibilidad	99

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El progreso de la ingeniería naval ha estado siempre condicionado por la aparición de avances tecnológicos y, entre otros, por la aplicación de nuevos materiales, que han permitido optimizar el rendimiento estructural de los buques, así como aumentar sus niveles de seguridad y durabilidad. En este escenario, el desarrollo de materiales avanzados, como el grafeno y los materiales compuestos, plantea alternativas de diseño innovadoras que desafían los métodos constructivos convencionales. En esta línea, el presente trabajo tiene como objetivo analizar de forma introductoria las posibilidades que ofrecen los materiales compuestos y el grafeno para su futura aplicación en la construcción naval. En este apartado se abordan los aspectos fundamentales de este Trabajo de Fin de Grado (TFG), incluyendo la motivación que llevó a su realización, los objetivos principales que se pretenden alcanzar y la metodología empleada para su desarrollo.

1.1 Contexto y motivación

La construcción naval se encuentra en un proceso de transformación impulsado por la necesidad de reducir emisiones, mejorar la eficiencia energética y disminuir el coste del ciclo de vida de los buques, al tiempo que se incrementan las exigencias normativas y los requisitos de seguridad y fiabilidad en servicio. En este contexto, la búsqueda de nuevos materiales y la consolidación de estos, que permitan aligerar las plataformas, reducir las necesidades de mantenimiento y aumentar la durabilidad frente al ambiente marino se ha convertido en una línea prioritaria de investigación y desarrollo. Esta necesidad acuciante que es común en la industria naval se particulariza especialmente en el ámbito militar, donde la optimización del diseño de los cascos y las estructuras del buque se ha convertido en una prioridad para llevar a cabo las operaciones con la mayor eficiencia posible [1].

De forma paralela, el escenario geopolítico actual ha reforzado la necesidad de incrementar las capacidades de defensa en Europa, con un aumento sostenido de la inversión en programas militares y, en particular, en plataformas navales, con el objetivo de mejorar la autonomía estratégica, y acelerar la incorporación de tecnologías que aporten ventajas operativas [2].

En el caso de España, estas prioridades se alinean con la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID), que promueve el desarrollo de capacidades tecnológicas críticas y el fortalecimiento de la base industrial y tecnológica de defensa, situando la construcción naval militar como un elemento central por su impacto directo en la operatividad, el sostenimiento y la disponibilidad de medios para la defensa marítima. En el apartado 6.1.1 de esta publicación, “*Diseño de plataformas navales de superficie*” [3, p. 78] se explicita la importancia de impulsar el desarrollo e implementación de los nuevos materiales para incrementar las capacidades operativas de la Armada [3]:

«Investigación y desarrollo encaminado a apoyar el diseño de la futura generación de plataformas navales de superficie, de forma que dispongan de

prestaciones operativas y de navegación mejoradas que permitan dar respuesta a las futuras amenazas. Se contemplan aspectos relacionados con sus propiedades hidrodinámicas (obra viva), aerodinámicas (obra muerta), estructurales, compartimentado, flotabilidad, estabilidad, funcionalidad de la plataforma, capacidad de carga, etc. incluyendo la incorporación de nuevos materiales.»

Siguiendo esta hoja de ruta general sobre el desarrollo de nuevos materiales, la Armada propone la investigación concreta de las ventajas e inconvenientes del uso del grafeno como material avanzado en las nuevas construcciones navales atendiendo a los requisitos y las características de las nuevas plataformas. Se pone en relieve, por tanto, la importancia que da la Armada a la realización de este TFG, encuadrándola dentro de su propia propuesta [4].

Con esta motivación, resulta imprescindible realizar un estudio pormenorizado en el que se comparen los materiales tradicionales de construcción naval, siendo el más representativo el acero, con los materiales compuestos, particularizando, además, de acuerdo al interés explícito de la Armada, el uso potencial del grafeno.

Tradicionalmente, el acero ha sido el material predominante en la construcción naval debido a su madurez tecnológica, coste y disponibilidad, pero presenta limitaciones asociadas al peso estructural y a la corrosión en ambientes marinos, lo que se traduce en mayores necesidades de mantenimiento y penalizaciones operativas a lo largo de la vida útil del buque. Frente a ello, los materiales compuestos reforzados con fibra han demostrado ofrecer ventajas potenciales en términos de reducción de masa, resistencia a la corrosión y libertad de diseño, especialmente en superestructuras y elementos donde el ahorro de peso resulta crítico, aunque su implantación en buques de gran porte sigue condicionada por aspectos normativos, comportamiento frente al fuego, inspección, reparación y coste, que deben evaluarse de manera realista y basada en evidencias [5].

En este contexto, surgen los materiales compuestos, como los polímeros reforzados con fibra de vidrio y de carbono, que permiten replantear el diseño estructural de los buques desde un enfoque orientado a la optimización del peso, la resistencia específica y la durabilidad, introduciendo nuevas posibilidades en términos de configuración geométrica, integración funcional y eficiencia operativa, aunque su adopción a gran escala requiere un análisis detallado de sus limitaciones mecánicas, su comportamiento en servicio y su viabilidad económica frente a los materiales tradicionales. [6]

Paralelamente, el grafeno ha emergido en la última década como un nanomaterial con propiedades excepcionales, entre las que destacan su elevada resistencia mecánica, gran estabilidad química y alta impermeabilidad a gases y líquidos. Estas características lo convierten en un candidato prometedor como aditivo funcional en recubrimientos protectores para aplicaciones anticorrosión en estructuras metálicas expuestas a ambientes marinos agresivos, donde las pérdidas económicas asociadas a la corrosión y al incremento de rozamiento hidrodinámico son especialmente relevantes. La ligereza del grafeno, además, puede significar un gran avance en términos de reducción de desplazamiento o de volumen de carena, minimizando la resistencia al avance de los buques [7].

Además de la pérdida de integridad y su consiguiente rozamiento hidrodinámico provocado por la corrosión, el *biofouling* asociado al crecimiento de organismos marinos sobre los cascos representa otro problema crítico, pues incrementa la resistencia al avance del buque, el consumo de combustible y, por tanto, su impacto ambiental. En este ámbito, se está investigando el empleo de recubrimientos basados en grafeno y sus derivados como solución potencialmente menos tóxica y más duradera frente a las pinturas anti incrustantes tradicionales, combinando propiedades *antifouling* y anticorrosivas en un mismo sistema [8].

A pesar del notable volumen de trabajos publicados en los últimos años, la mayoría de los estudios disponibles se desarrolla aún en condiciones de laboratorio controladas o en sectores ajenos al ámbito estrictamente naval, como la automoción, la aeronáutica o aplicaciones generales industriales. Esto

implica que, en muchos casos, las evaluaciones se realizan sobre probetas de geometría sencilla, tiempos de exposición relativamente cortos o escenarios de carga y degradación que no reproducen fielmente las sollicitaciones mecánicas, químicas y ambientales presentes en un buque en servicio.

Como consecuencia, existe una brecha significativa entre los resultados prometedores que se obtienen a escala experimental y la evidencia disponible sobre su comportamiento en estructuras navales reales, sometidas a ciclos de carga complejos, operaciones prolongadas, tareas de mantenimiento rutinario y exigencias normativas específicas. Esta falta de validación en condiciones representativas introduce incertidumbre tanto en la aplicabilidad real de estos materiales como en su impacto sobre el ciclo de vida (LCC) completo del buque: coste, fiabilidad, reparación y disponibilidad operativa.

En este contexto, se considera necesario llevar a cabo un análisis técnico orientado específicamente al diseño naval que permita reinterpretar los resultados de la literatura desde la perspectiva de las exigencias propias del ámbito. De este modo, se pretende valorar de forma crítica y fundamentada el verdadero alcance de las propuestas actuales, identificando qué soluciones presentan un potencial realista de implementación, cuáles requieren desarrollos adicionales y en qué condiciones podrían integrarse en proyectos de construcción o modernización de buques.

Por todo lo anteriormente mencionado, el presente Trabajo de Fin de Grado se enmarca en una línea de investigación orientada al estudio de nuevos materiales, principalmente grafeno y materiales compuestos para aplicaciones navales. El objetivo es aportar una visión estructurada y crítica sobre el grado de madurez, las ventajas potenciales sobre los materiales tradicionales y las limitaciones actuales de los materiales compuestos o dopados con grafeno en construcción naval, valorando finalmente en qué medida pueden contribuir a mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la seguridad de los buques, así como su viabilidad de implantación en escenarios realistas alineados con las prioridades marcadas por la ETID.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del TFG es evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (en adelante PRFV) y PRFV dopado con nanopartículas de grafeno en la construcción naval militar, mediante un estudio comparativo frente al acero naval aplicado a un modelo representativo de viga-buque. Para la consecución de este objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Fundamentación técnica y del estado del arte: realizar una revisión bibliográfica crítica sobre el comportamiento mecánico del grafeno en matrices poliméricas, justificando técnicamente su influencia en la resistencia a la rotura, fatiga y degradación salina, así como la idoneidad del método TOPSIS para la toma de decisiones en ingeniería naval. Además se incluirá un estudio de campo que permita comprobar mediante entrevistas a expertos y visitas a astilleros el estado de la cuestión que permita la toma de decisiones objetiva documentada.
2. Modelado estructural: desarrollar un análisis mecánico comparativo utilizando un elemento estructural representativo de la construcción naval (viga hueca de pared delgada o viga-casco) sometido a cargas de escala real, evaluando parámetros de rigidez (flecha), resistencia estructural (límite elástico del acero y rotura del composite) y eficiencia de peso.
3. Validación metodológica y simulación: ejecutar una validación cruzada entre el método analítico y el análisis por elementos finitos (FEM), corrigiendo el modelo numérico para considerar la anisotropía, heterogeneidad y naturaleza laminar de los materiales compuestos en lugar de tratarlos como sólidos isótropos.
4. Evaluación económica del ciclo de vida (LCC): determinar el impacto económico de la sustitución de materiales en un buque tipo BAM, calculando mediante ecuaciones detalladas el ahorro operativo en combustible y mantenimiento (anticorrosión) y estableciendo el periodo de retorno de la inversión (payback).

5. Formulación de conclusiones estratégicas: sintetizar los resultados obtenidos para identificar las barreras de implantación y ventajas competitivas del grafeno en la Armada, proponiendo líneas futuras de investigación basadas en hitos técnicos verificables y medibles.

1.3 Metodología

La metodología se define como un estudio técnico-documental y experimental-numérico, estructurado en fases para evaluar la viabilidad de materiales compuestos y dopados con grafeno frente al acero naval:

1. Fundamentación y trabajo de campo: revisión crítica de literatura científica sobre el comportamiento del grafeno en resinas (dispersión, fatiga y degradación salina). Se integra el estudio de campo mediante entrevistas a técnicos y directivos del sector naval de Astilleros “Armón”, “Avanzare Materials” y “Rodman Polyships” para validar la escalabilidad industrial y definir los pesos de la matriz de decisión. Dado que el grafeno aplicado a estructuras navales constituye todavía una tecnología emergente y con escasa implantación industrial directa, la revisión bibliográfica se ha complementado con trabajo de campo cualitativo mediante entrevistas y directivos de astilleros y del ámbito de los materiales avanzados. Esta información primaria no sustituye a la evidencia experimental ni normativa, pero permite contextualizar la viabilidad industrial, la escalabilidad productiva y las barreras reales de implantación de los materiales compuestos dopados con grafeno en el sector naval.
2. Modelado estructural: selección de un elemento representativo de la viga-buque mediante una viga hueca de pared delgada (viga-casco) o perfil naval de grandes dimensiones. El dimensionado y los factores de seguridad se definen bajo los criterios empleados en construcción naval para garantizar la representatividad empleando modelo escalado sencillo para valorar las posibilidades del grafeno.
3. Simulación FEM y validación: análisis estructural comparativo mediante cálculo analítico y FEM (Nastran/Inventor) con cargas de escala real (toneladas). El modelo numérico corrige deficiencias previas al considerar la anisotropía, heterogeneidad y naturaleza laminar de los composites, definiendo orientaciones de fibra y propiedades de la matriz para asegurar resultados reproducibles.
4. Análisis Económico de ciclo de vida (LCC): evaluación del impacto económico mediante el cálculo del ahorro operativo (combustible por reducción de desplazamiento y mantenimiento anticorrosivo). Se establecen ecuaciones detalladas para determinar el payback bajo escenarios operativos realistas del buque BAM.
5. Optimización y decisión multicriterio (TOPSIS): aplicación del método TOPSIS, justificado frente a otras alternativas MCDM, para jerarquizar los materiales basándose en criterios de eficiencia estructural (resistencia/peso), coste y madurez tecnológica. Se incluye un análisis de sensibilidad para garantizar la robustez de las conclusiones finales.

Incluiremos a continuación una matriz de validación cualitativa, debido a las restricciones de la bibliografía en el campo naval. Esta permite fortalecer la rigidez metodológica de la memoria y reducir la subjetividad que se puede percibir desde el desconocimiento del análisis de variables cualitativas, la Tabla 1-1 muestra estos elementos y vincula directamente los hallazgos del trabajo con el consenso obtenido de los expertos de la industria consultados.

La selección de las variables de estudio y la ponderación de los criterios analizados no solo responden a una revisión bibliográfica, sino que han sido validadas mediante un proceso de consulta directa con actores clave de la industria naval. Se presenta para consolidar el consenso de expertos sobre las dimensiones estructurales, económicas y productivas que condicionan la viabilidad real de los materiales compuestos dopados con grafeno.

Las cinco dimensiones analizadas se corresponden con tres columnas en las que se puede ver la dimensión seleccionada, qué hallazgo se considera crítico y desde qué entrevista ha sido validado, de esta forma se puede obtener una visión más objetiva para el desarrollo del trabajo.

Tabla 1-1 Selección de criterios de ponderación objetivos

Dimensión	Hallazgo crítico	Validación
Estructural	El grafeno refuerza la matriz, pero no sustituye el papel de la fibra en el PRFV.	Avanzare Materials
Económica	El ahorro de peso debe justificar el sobrecoste; crítico en alta velocidad, secundario en carga.	Armón Navia
Productiva	La soldabilidad y reciclabilidad del acero lo mantienen como estándar industrial.	Armón Navia
Operativa	La innovación naval es gradual; se prioriza la fiabilidad y la normativa IACS.	Armón Vigo
Futuro	El grafeno entrará primero en aplicaciones periféricas (sensores, coatings) antes que estructurales.	Rodman Vigo

2 ESTADO DEL ARTE

Para estudiar los nuevos materiales en el ámbito de la construcción naval, es imprescindible conocer la normativa establecida por las Sociedades de Clasificación. Estas definen requisitos reguladores, atendiendo a criterios de seguridad, resistencia estructural y durabilidad, siendo aplicables para buques tanto civiles como militares. Por otro lado, se incorporan tecnologías avanzadas de fabricación para la construcción de buques de guerra, como materiales compuestos reforzados, técnicas de moldeo al vacío, laminados multicapa y recubrimientos funcionales. Este conjunto de tecnologías se orienta a la consecución de una mayor rigidez, resistencia y eficiencia operativa. La conjunción de normativa, herramientas de análisis y tecnologías constructivas representa el marco en el que se sitúa el presente trabajo y justifica la posterior comparación de materiales convencionales y compuestos con grafeno en elementos estructurales representativos.

2.1 Definición, características y aplicaciones del grafeno

La producción inequívoca de grafeno monoatómico se logró en 2004 mediante la técnica de exfoliación mecánica con cinta adhesiva aplicada a cristales de grafito, por el grupo de Andre Geim y Konstantin Novoselov en la Universidad de Manchester. Este procedimiento permitió aislar escamas de grafeno de alta calidad y condujo rápidamente a la demostración de propiedades singulares, consolidando el interés científico por el material [9].

El grafeno se puede obtener tanto por métodos “arriba-abajo” como “abajo-arriba”. En el primer caso se usa el método CVD (*Chemical Vapor Deposition*) para la obtención de monocapas de grafeno. Esta manera de obtención se considera especialmente atractiva para aplicaciones en la industria electrónica, ya que permite, en condiciones controladas, la síntesis de láminas continuas con superficies del orden de varios centímetros cuadrados. No obstante, estos procesos requieren la operación bajo condiciones exigentes, como altos niveles de vacío o el uso de sistemas altamente especializados. Aunque los avances recientes en la técnica de CVD han contribuido de forma significativa al desarrollo de monocapas de grafeno de gran extensión superficial, estos métodos aún presentan limitaciones que impiden su plena madurez tecnológica [10].

En el segundo caso, el método vía exfoliación química es el más habitual. Este fue el método mediante el cual se descubrió el grafeno en 2004. Presenta una elevada complejidad operativa y, en general, conduce a un bajo rendimiento en la obtención de láminas de grafeno de gran tamaño estructuralmente independientes [10].

El grafeno se caracteriza por una combinación excepcional de propiedades físico-químicas, entre las que destacan su elevada resistencia mecánica, alta rigidez y excelentes conductividades térmica y eléctrica, estas últimas, superiores a las del cobre. Presenta además una densidad muy reducida, una notable estabilidad química y una sobresaliente capacidad como barrera frente a la permeación de

especies químicas y la corrosión, cualidades de especial relevancia en medios marinos o ambientes altamente agresivos. Su aplicación desde su descubrimiento se ha orientado en múltiples campos como se puede comprobar en la revisión bibliográfica de [11] que intenta dar las perspectivas de aplicación. Algunas de las cuales pueden ser la difusión en otros materiales como el acero, en los procesos de soldadura como mejora de características mecánicas o de duración [12] [13] también en materiales compuestos [14] y en otras aplicaciones tecnológicas de los composites [15] o aplicaciones generales en tratamientos superficiales de otros materiales [16].

El grafeno puede encontrarse en forma de láminas individuales, polímeros o recubrimientos como incorporado en matrices de materiales compuestos. Esta versatilidad estructural permite explotar sus propiedades intrínsecas para el refuerzo y la optimización de sistemas compuestos avanzados, contribuyendo a mejorar su integridad mecánica, resistencia a la degradación y eficiencia térmica y eléctrica. En consecuencia, el grafeno se posiciona como un material de referencia para el desarrollo de componentes estructurales de altas prestaciones en el ámbito de la construcción naval y, particularmente, en buques militares [17] [18].

2.1.1 Propiedades químicas y geométricas del grafeno

El grafeno consiste en una capa única de átomos de carbono en red hexagonal bidimensional, con enlaces sp^2 , lo que genera enlaces fuertes σ , que forman un orbital π deslocalizado por encima y por debajo de la red, donde cada átomo se enlaza covalentemente con tres vecinos, siendo la conglomeración de millones de capas de grafeno el material grafito (Figura 2-1). La distancia entre los átomos de carbono adyacentes es de aproximadamente 0,142 nm y los ángulos de enlace son de 120° , lo que le confiere una geometría plana y altamente simétrica. Su geometría está representada en la misma [19].

Esta red electrónica es la clave de su elevada conductividad eléctrica y notable estabilidad química. Dichas características geométricas y electrónicas convierten al grafeno en un material extraordinariamente rígido, liviano y resistente a la corrosión, perfecto para reforzar compuestos en usos avanzados, como estructuras navales [19].

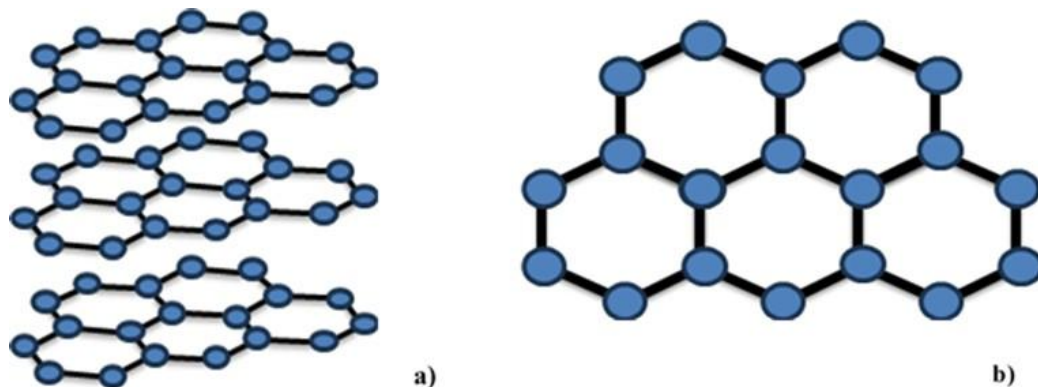


Figura 2-1 Representación de la configuración del grafito a) y del grafeno en b)
(Elaboración propia)

2.1.2 Consideraciones sobre la aplicación del grafeno en estructuras

En la construcción naval, el grafeno emerge como aditivo clave en composites y recubrimientos para cascos, mejorando resistencia mecánica, reduciendo peso y mitigando corrosión marina. Aunque su implementación comercial es incipiente, proyectos de I+D demuestran viabilidad en laminados PRFV dopados con bajas concentraciones (<1 wt%) [20] [21] [22].

Feby et al. (2021) revisan exhaustivamente el potencial del grafeno en operaciones navales, documentando mejoras del 25-55% en la resistencia a tracción y módulo elástico en materiales compuestos reforzados con grafeno, sometidos a ensayos de inmersión salina prolongada. Estos materiales exhiben una reducción del 40% en la absorción de humedad respecto a laminados PRFV

convencionales, lo que se traduce en mayor durabilidad para cascos de buques mercantes y offshore [23].

Kumar et al. (2025) evalúan el grafeno en materiales estructurales marinos, reportando incrementos del 30% en tenacidad a impacto y ciclos de fatiga en recubrimientos y composites epoxi-grafeno. Ensayos normalizados bajo condiciones de niebla salina confirman una superioridad anticorrosiva, proponiendo su empleo en híbridos para plataformas offshore y cascos ligeros, con potencial de ahorro de combustible del 10-15% por reducción hidrodinámica [24].

Graphenano presentó en 2017 el Graphenano One, (Figura 2-2) el primer barco fabricado con grafeno del mundo, una lancha de 8 metros construida con composites epoxi reforzados con grafeno mediante infusión en vacío. Este prototipo reduce el peso en un 20 % respecto a equivalentes sin grafeno, mejora la relación fuerza-peso y eficiencia hidrodinámica, logrando mayor velocidad y menor consumo; diseñado para pruebas reales en mar abierto. Desde su construcción en 2017, no se ha vuelto a fabricar un buque de las mismas características, lo que evidencia su inmadurez industrial [25].



Figura 2-2 Buque Graphenano One, primer y único construido con grafeno
(Imagen obtenida de Graphenano Nanotechnologies [26])

En conjunto, la literatura revisada y el prototipo Graphenano One apuntan a una viabilidad técnica preliminar del uso del grafeno en sistemas compuestos de aplicación naval ligera. No obstante, la evidencia disponible continúa siendo limitada en términos de escala industrial, validación reglamentaria y continuidad de aplicación en buques en servicio. Por tanto, el interés del grafeno en construcción naval debe interpretarse, en el estado actual de la técnica, como una opción prometedora pero todavía condicionada por barreras normativas, económicas y de madurez tecnológica.

2.1.3 Aplicaciones del grafeno para tratamientos superficiales

Desde su aislamiento experimental, la industria en general y la industria de construcción naval en particular han aprovechado las capacidades del grafeno para mejorar la calidad de los productos. Algunas de estas aplicaciones actuales son los recubrimientos avanzados, basados en nanocompuestos de matriz polimérica (como epoxi o viniléster) reforzados con materiales 2D como el grafeno, que optimizan la integridad estructural mediante barreras de tortuosidad extrema, mecanismos de autorreparación por microencapsulación de inhibidores y biocidas físicos de baja energía superficial [23] [27]. Su aplicación en el sector naval es crítica y se divide en las siguientes áreas funcionales [8] [23] [27] [28]:

1. **Protección de cascos y apéndices:** la integración de nanoláminas de grafeno mitiga la corrosión galvánica y la degradación hidrotérmica al sellar micro poros en la matriz, creando una barrera impermeable a iones de cloruro y oxígeno. La empresa GIT Coatings comercializa recubrimientos de liberación de incrustaciones (foul-release) basados en

grafeno y libres de biocidas (XGIT-Fuel y XGIT-Force) que han obtenido la homologación de tipo de Lloyd's Register y declaran una ganancia de potencia garantizada en torno al 6 % y ahorros de combustible de hasta el 10 %, con aplicaciones ya en curso sobre flotas comerciales

2. **Sistemas antivegetativos (*antifouling*) sostenibles:** sustituyen los biocidas tóxicos convencionales por mecanismos de disrupción mecánica y extracción de fosfolípidos, donde el contacto directo con los bordes afilados del grafeno provoca la lisis celular de micro y macro organismos, proceso conocido como *nano-knife*.
3. **Gestión térmica y deshielo (*deicing*):** en buques que operan en regiones árticas o antárticas, se utilizan pinturas conductoras basadas en nanocintas de grafeno que generan calor mediante efecto Joule (calentamiento resistivo), evitando la acumulación de hielo en cubiertas y estructuras críticas.
4. **Recubrimientos fotovoltaicos (*solar paint*):** el desarrollo de pinturas que incorporan materiales fotosensibles permite transformar las superficies exteriores de la superestructura en captadores de energía solar, contribuyendo a la eficiencia energética del buque.
5. **Protección balística y de impacto:** en buques militares, se utilizan híbridos de aramida (Kevlar) y grafeno que aumentan la capacidad de absorción de energía frente a fragmentos y ondas expansivas, mejorando la seguridad de los compartimentos críticos.

La empresa GIT Coatings, por ejemplo, comercializa recubrimientos de liberación de incrustaciones (foul-release) basados en grafeno y libres de biocidas (XGIT-Fuel y XGIT-Force) que han obtenido la homologación de tipo de Lloyd's Register y declaran una ganancia de potencia garantizada en torno al 6 % y ahorros de combustible de hasta el 10 %, con aplicaciones ya en curso sobre flotas comerciales. [29]

2.1.4 Aplicación en estructuras ligeras y ultrarresistentes

Las estructuras ligeras y ultrarresistentes en el sector naval se fundamentan en el uso de nanocompuestos reforzados con grafeno, un material que posee una resistencia intrínseca aproximadamente 200 veces superior al acero. En los laminados compuestos, la integración de pequeñas fracciones de grafeno incrementa significativamente la rigidez flexora y la tenacidad a la fractura sin incurrir en penalizaciones de masa, optimizando la transferencia de carga en la interfaz matriz-fibra. Su aplicación se manifiesta en elementos estructurales conformados por materiales compuestos y grafeno, tales como el representado en la Figura 2-3 en la que podemos ver las tradicionales barras de refuerzo estructural para hormigones sustituyendo a las tradicionales de acero que permiten aligerar estas [1] [28] [24]. Los avances técnicos en este campo permiten [1] [28] [24]:

1. **Mejora del rendimiento mecánico:** la adición de nanoláminas de grafeno mejora la resistencia a la tracción, al impacto y el comportamiento ante la fatiga.
2. **Absorción de energía:** el uso de sistemas híbridos maximiza la capacidad de absorción de energía frente a impactos dinámicos y ondas expansivas.
3. **Optimización del diseño:** esta tecnología permitirá reducir el espesor de los cascos y superestructuras, aumentando la eficiencia del combustible y la capacidad de carga de los buques sin comprometer su integridad estructural bajo condiciones hidrostáticas severas.

Como ejemplo de los anteriores mencionaremos el caso del ensayo de First Graphene (aditivo PureGRAPH) con el astillero Ascent Shipwrights, donde la adición de grafeno a laminados de poliéster reforzado con fibra de vidrio elevó la tensión última a flexión un 59 % (Figura 2-3) frente al composite FRP convencional, integrándose además en el proceso de fabricación existente [30]

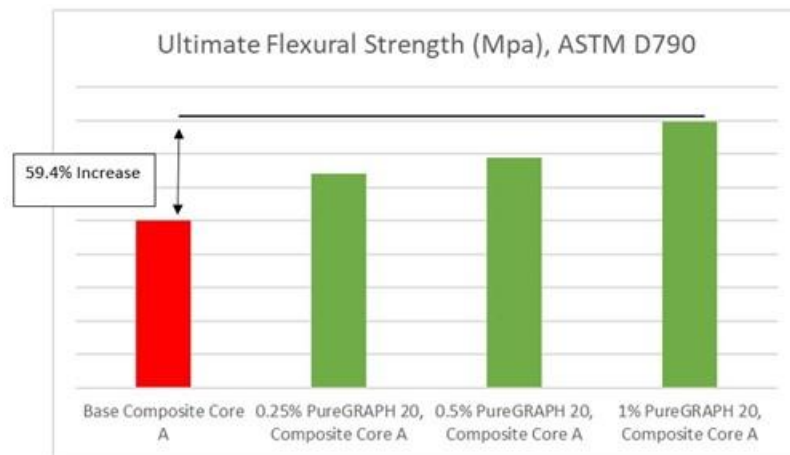


Figura 2-3 Resistencia última a flexión para concentraciones de grafeno en PRFV
(Imagen obtenida del experimento realizado por “First Graphene”) [30]

2.1.5 Aplicaciones en blindaje electromagnético y firmas reducidas

El blindaje electromagnético y la reducción de firmas en buques de guerra modernos se logran mediante la integración de nanocompuestos de matriz polimérica reforzados con materiales como el grafeno y fibras de carbono. La elevada conductividad eléctrica de estos aditivos permite crear capas delgadas capaces de atenuar emisiones y ondas de radar sin incurrir en las penalizaciones de masa propias de los blindajes metálicos pesados [1] [23] [28] [24]. Los aspectos técnicos clave de su uso son:

1. **Firma de radar (RCS):** el uso de estructuras de PRFC (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono), permite reducir la sección eficaz de radar al absorber o dispersar la energía electromagnética incidente, facilitando el sigilo frente a sistemas de detección.
2. **Firma térmica (infrarroja):** los materiales compuestos ofrecen una baja conductividad térmica inherente, que combinada con el uso de nanocintas de grafeno para la gestión del calor, permite controlar y minimizar la radiación infrarroja emitida por el casco y los sistemas de propulsión.
3. **Blindaje electromagnético y radomos:** los nanocompuestos permiten diseñar radomos con baja interferencia electromagnética, optimizando la transmisión y recepción de señales propias mientras se protegen los sistemas electrónicos sensibles del pulso electromagnético y emisiones hostiles.
4. **Sigilo acústico:** en submarinos y vehículos submarinos, estos materiales proporcionan propiedades de amortiguamiento acústico, reduciendo la firma sonora y dificultando la detección por sonar.

Como casos documentados, en el plano experimental se han fabricado y ensayado pantallas absorbentes de radar tipo Salisbury basadas en composites de grafeno multicapa, con espesores de ~1,7–1,8 mm y resonancia en banda X (~12 GHz), orientadas a la reducción de firma radar y a la supresión de interferencias electromagnéticas [31]; en un sector afín, el aeroespacial, una metasuperficie flexible de grafeno sobre fibra de sílice (*graphene@silica fabric*), crecida por CVD e integrada en la capa de aislamiento térmico de la aeronave, reduce la reflexión radar hasta -42 dB sin alterar la masa ni la geometría de la estructura [32].

2.1.6 Aplicaciones en baterías y supercondensadores navales

La integración de grafeno en los electrodos optimiza el almacenamiento electroquímico al permitir una estequiometría de Li_2C_6 , lo que duplica la capacidad específica teórica de los ánodos hasta los 744 mAh/g en comparación con el grafito convencional (Figura 2-4). En los cátodos, el grafeno funciona como un aditivo conductor que mitiga la baja conductividad intrínseca de los materiales activos,

mejorando la cinética de las reacciones y extendiendo significativamente la estabilidad de los ciclos de carga y descarga [33].

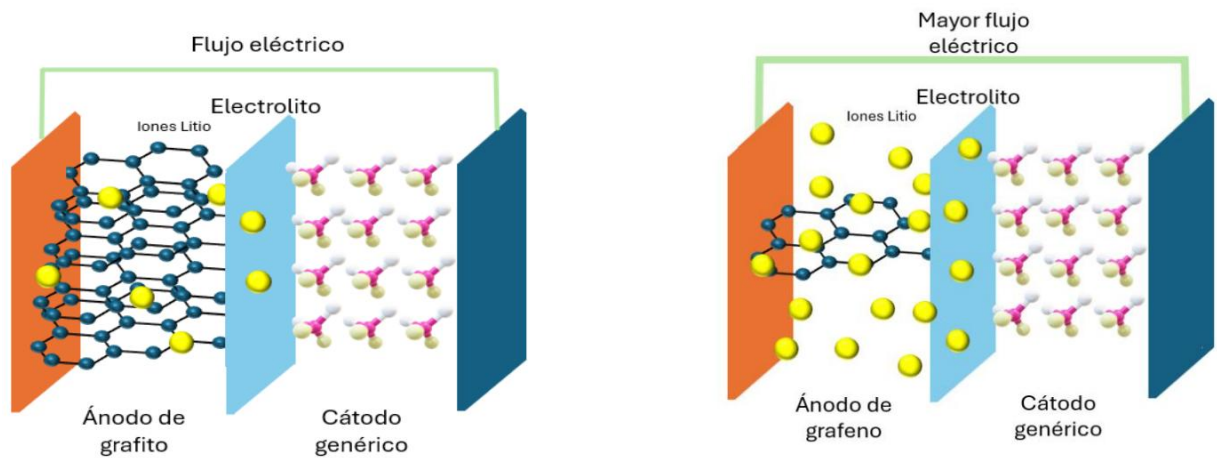


Figura 2-4 Representación de batería de grafito en a) y representación de la de grafeno en b)
(Elaboración propia)

En el sector naval, estos avances permiten diseñar sistemas híbridos y colectores de corriente flexibles mucho más compactos, lo que facilita que buques no tripulados y submarinos multipliquen su autonomía y tiempo de inmersión al reducir drásticamente el peso del banco de baterías. Los supercondensadores de grafeno de la empresa Skeleton Technologies fueron evaluados por el US Naval Surface Warfare Center, que halló una resistencia serie (ESR) inferior a la mitad y una densidad de potencia más de 10 kW/kg superior a la de los competidores no dopados, atribuyendo la mejora al grafeno, siendo reportados los valores experimentales en sendos artículos de la revista *IEEE Transactions on Plasma Science* [33] [34] [35].

2.1.7 Aplicaciones en sensores estructuralmente integrados

La integración de nanoláminas de grafeno en compuestos de matriz polimérica permite explotar su conductividad eléctrica para transformar elementos como paneles, mástiles y cuadernas en materiales inteligentes con capacidad de auto sensorizado. Estos sistemas operan como sensores distribuidos que facilitan la monitorización de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*) en tiempo real, detectando con alta resolución fenómenos de fatiga, deformaciones mecánicas y daños por impacto mediante la respuesta eléctrica del material ante la flexión o presión. Al actuar como sistemas nanoelectromecánicos integrados, estas estructuras permiten implementar estrategias de mantenimiento predictivo, optimizando la seguridad operativa y la vida útil del buque sin añadir masa adicional ni componentes externos complejos [1] [24].

Anas et. al (2018) integraron galgas extensométricas "inteligentes" de nanoplaquetas de grafeno sobre laminados de fibra de vidrio (GFRP) y registraron su respuesta bajo carga de tracción, demostrando capacidad de monitorización de salud estructural [36].

Por otro lado, sensores fabricados con tinta de grafeno impresa sobre el composite alcanzan una sensibilidad (o factor de galga, es decir, cambio de resistencia eléctrica por unidad de deformación) más de tres veces superior a la de las galgas metálicas convencionales, lo que permite detectar deformaciones más pequeñas [37].

En la Figura 2-5 se muestra una representación esquemática de la aplicación de nanoláminas de grafeno para control de salud estructural del casco de un buque tras un impacto. La energía del impacto es sensorizada por las nanoláminas de grafeno y transformada en señal eléctrica. Esta señal es amplificada y evaluada para el análisis estructural en un osciloscopio en la cámara de máquinas.

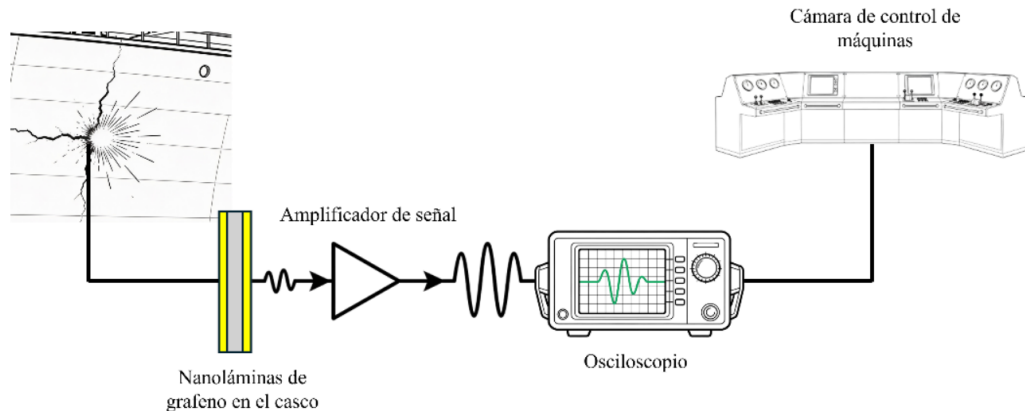


Figura 2-5 Esquema de aplicación de nano-láminas de grafeno para SHM
(Elaboración propia)

2.1.8 Aplicaciones a servicios y sistemas anticorrosión

Los recubrimientos de nanocompuestos reforzados con grafeno en sistemas de conducción mitigan la corrosión galvánica y la erosión-corrosión mediante una barrera de impermeabilidad extrema y alta inercia química. Su aplicación en tuberías y conductos optimiza la resistencia mecánica frente a fluidos abrasivos y previene la degradación interfacial al bloquear la migración de agentes corrosivos hacia el sustrato, como se expone en la Figura 2-6. Se proyecta su integración futura en sistemas de refrigeración, válvulas y tuberías críticas, donde su carácter de biocida físico y su estabilidad hidrotérmica permitirán controlar el *biofouling* y la biocorrosión de forma sostenible [7].

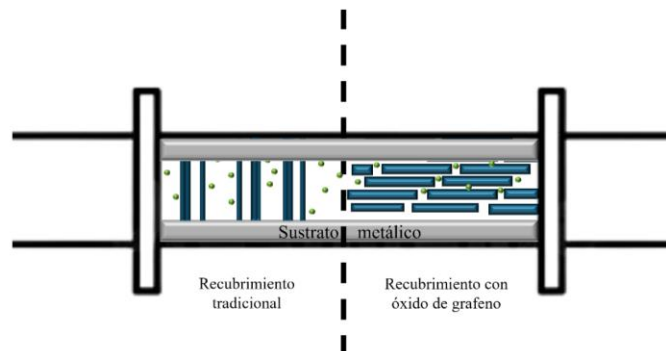


Figura 2-6 Esquema de aplicación de nano-láminas de grafeno para SHM
(Elaboración propia)

En el plano de la aplicación real a gran escala, Talga Group llevó a cabo un ensayo comercial sobre dos portacontenedores de unas 33000 t pertenecientes al mismo armador. En el primero, el *Algarrobo* (225 m de eslora, posteriormente rebautizado *Robin 1*), se recubrieron 700 m² del casco a finales de 2019 con una imprimación que incorporaba el aditivo de grafeno Talphene predispersado en fábrica (considerada la mayor aplicación individual de grafeno realizada hasta la fecha). En el segundo, el *Arica*, de tamaño similar, el aditivo (comercializado como Talcoat) se suministró como polvo dispersable mezclado in situ por los aplicadores con un sistema epoxi comercial de un fabricante distinto.

Antes de las aplicaciones, los ensayos de laboratorio respaldaron la decisión: la imprimación con grafeno mejoró la protección frente a la corrosión en niebla salina respecto a los sistemas comerciales de referencia y, en los ensayos mecánicos encargados al organismo independiente The Welding Institute (TWI) conforme a la normativa americana ASTM, aumentó la adhesión al sustrato (~7 %) y entre capas (~14 %), con mejor resistencia a la abrasión [38]. Ya en servicio, la inspección a los 15 meses del casco del primer buque indicó que el recubrimiento de grafeno igualaba o superaba al estándar comercial: en la sección pintada con el sistema convencional aparecían marcas de corrosión ausentes en la zona tratada con Talcoat, según el comunicado de la empresa a la bolsa australiana (ASX) [39]. Estos resultados,

aunque reportados por el mismo fabricante, concuerdan con la mejora de barrera y protección anticorrosiva documentada en la literatura revisada [40].

2.1.9 Aplicaciones a la propulsión y mejora hidrodinámica

Los revestimientos basados en nanocompuestos de grafeno optimizan la eficiencia propulsiva y la hidrodinámica naval mediante la creación de superficies de baja energía superficial y superhidrofobicidad, lo que reduce drásticamente la resistencia friccional. La incorporación de estas capas permite disminuir el coeficiente de fricción de interfaces metálicas hasta un rango de 0,15–0,16 mitigando el arrastre hidrodinámico desde las primeras etapas de navegación [41].

En cuanto al *biofouling*, el grafeno actúa como un biocida físico mediante un mecanismo de disrupción mecánica de membranas (efecto *nano-knife* mencionado en 2.1.3) que inactiva a los colonizadores primarios por contacto directo. Al retrasar la formación de biopelículas y evitar el asentamiento de macroorganismos sin el uso de biocidas lixiviables convencionales, se mantiene la suavidad del casco, lo que se traduce en una reducción esperada del 5-10% en el consumo de combustible y en las emisiones de gases de efecto invernadero al evitar el incremento de masa y volumen hidrodinámico [42].

En la Figura 2-7 se ilustran las resistencias a las que se enfrenta un buque en navegación. La resistencia total (R) se compone de la resistencia del aire (R_a), la resistencia del agua (R_s), la resistencia de las olas (R_w) y la resistencia por fricción (R_f). El empuje (T_f) requerido para desplazar los buques depende de la velocidad (v) como se reseña en la expresión (2.1). La potencia necesaria para propulsar el barco representa un parámetro clave que determinará los requisitos de propulsión del buque [43].

$$T_f = R \cdot v \quad (2.1)$$

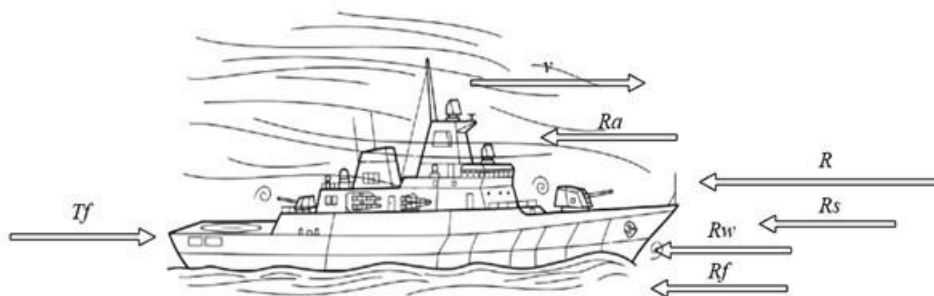


Figura 2-7 Esquema de las resistencias de un buque en navegación
(Elaboración propia)

En el equilibrio de fuerzas que rige el avance del buque a velocidad constante v , el empuje del propulsor T_f debe igualar a la resistencia total al avance R (Figura 2-7). Esta resistencia se descompone en la resistencia aerodinámica R_a , que actúa sobre la obra muerta, y la resistencia hidrodinámica en el agua, integrada a su vez por la resistencia por formación de olas R_w , la componente residual o de presión R_s y, sobre todo, la resistencia de fricción R_f . Esta última es la dominante: la fricción de superficie supone en torno al 80–90 % de la resistencia total de un buque en servicio [44], de modo que reducir R_f disminuye R y, para una misma velocidad v , rebaja el empuje T_f (y por tanto la potencia de propulsión y el consumo) necesarios para mantenerla.

En esta línea, Tian et al. desarrollaron un recubrimiento de caucho de silicona cargado con nanoplaquetas de grafeno que reproduce el mecanismo de "calentamiento de capa límite" de la piel del delfín: el grafeno, como relleno térmicamente conductor, eleva la conductividad térmica del recubrimiento —un 20, 40 y 50 % para contenidos de 0,17, 0,33 y 0,67 % en peso— lo que calienta localmente la capa límite, reduce la viscosidad del agua en contacto y disminuye así la fricción R_f [45].

El contenido de ~0,33 % en peso ofreció el mejor compromiso entre conductividad térmica y propiedades mecánicas, coherente con el comportamiento de umbral observado en el resto de aplicaciones del grafeno. Aunque a escala comercial los recubrimientos reductores de fricción más extendidos no son todavía de grafeno, su eficacia hidrodinámica está demostrada en buque real: un recubrimiento antiincrustante reductor de fricción logró un 25 % menos de fricción superficial en laboratorio y fue validado sobre un granelero de 176.000 t durante cinco años conforme a la norma ISO 19030 [44], lo que ilustra el potencial de esta vía para los aditivos de grafeno.

2.1.10 Aplicaciones sistemas de armas y almacenamiento de energía

La elevada superficie específica y conductividad intrínseca del grafeno optimizan la eficiencia de la doble capa electroquímica, facilitando la integración de sistemas de almacenamiento más compactos y térmicamente estables en arquitecturas navales restringidas. Estos avances permiten que los sistemas de energía dirigida y radares de alta potencia operen sin comprometer la integridad de otros componentes críticos, gracias a que los supercondensadores actúan de forma complementaria a las baterías para manejar demandas energéticas extremas [33] [44] [45].

2.2 Definición, tipos y aplicaciones de los materiales compuestos

El término material compuesto se emplea actualmente para describir aquellos materiales formados por la combinación de dos o más componentes distintos, diferenciables tanto desde el punto de vista físico como mecánico. Estos materiales se obtienen mediante procesos de fabricación controlados que permiten diseñar y optimizar sus propiedades en función de los requisitos de la aplicación. La clave de los materiales compuestos reside en la interacción entre sus fases constituyentes, que da lugar a un comportamiento global superior al de cada uno de los materiales por separado. Este efecto sinérgico permite alcanzar combinaciones de propiedades (como alta resistencia, rigidez y bajo peso) que no serían posibles utilizando materiales convencionales de forma aislada [46]. En la práctica, los tres tipos predominantes corresponden a polímeros reforzados con diferentes fibras (vidrio, carbono y aramida), seleccionados según requisitos de propósito, eslora, carga y certificación reglamentaria [46].

2.2.1 PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio)

El PRFV constituye el material compuesto más extendido en la construcción naval, especialmente en embarcaciones de recreo, patrulleras y estructuras secundarias. Está formado por fibras de vidrio embebidas en matrices poliméricas, generalmente resinas poliéster, viniléster o epoxi. [28]. Su principal ventaja reside en su equilibrio entre coste, facilidad de fabricación y comportamiento frente a la corrosión, lo que permite su producción a gran escala mediante técnicas como el laminado manual o la infusión por vacío.

Además, presenta una buena resistencia mecánica en relación con su peso, lo que lo convierte en una solución adecuada para aplicaciones donde no se requieren niveles extremos de rigidez estructural como las embarcaciones de vela ligera. [47]. Sin embargo, [47] su módulo de elasticidad es significativamente inferior al del acero, lo que implica mayores deformaciones bajo carga. Esto limita, su uso en estructuras primarias de gran eslora si no se compensa mediante soluciones geométricas como configuraciones tipo sándwich o refuerzos estructurales adicionales. [28]

2.2.2 PRFC (Poliéster Reforzado con Fibra de Carbono)

Los compuestos de fibra de carbono representan la opción de mayor rendimiento dentro de los materiales compuestos utilizados en naval. Están formados por fibras de carbono de alta resistencia integradas en matrices epoxi, lo que les confiere una rigidez y resistencia muy superiores al PRFV (su módulo elástico está en torno a los 250-300 GPa), junto con una densidad considerablemente menor que la del acero [48].

Estas propiedades permiten reducir significativamente el peso estructural manteniendo niveles elevados de rigidez y resistencia, lo que resulta crítico en aplicaciones de alta exigencia como embarcaciones de competición [48].

No obstante, su elevado coste y la complejidad de los procesos de fabricación y control de calidad limitan su uso a aplicaciones donde el rendimiento justifica la inversión. Además, su conductividad eléctrica puede generar problemas de corrosión galvánica cuando se combina con metales, lo que requiere un diseño cuidadoso de las uniones [49] [50]. En la Figura 2-8 podemos ver dos ejemplos de los dos tipos de estructuras construidos en los dos primeros casos: embarcaciones pequeñas como los raqueros de la ENM o veleros de alta competición de PRFC [51].



Figura 2-8 Embarcación de vela ligera a); barco de alta competición b)
(Imagen obtenida en la ENM y de Waterline Media, respectivamente)

2.2.3 PRFA (Poliéster Reforzado con Fibra de Aramida)

Las fibras de aramida se caracterizan por presentar una elevada resistencia específica y una notable capacidad de absorción de impactos, lo que las hace especialmente adecuadas para su uso como refuerzo en zonas estructurales susceptibles de recibir cargas dinámicas o impactos localizados. [52]

Entre las fibras de aramida más utilizadas destacan Kevlar y Twaron, que se comercializan en distintas variantes según sus propiedades mecánicas. Estas se utilizan habitualmente en elementos como la cabuyería, donde la capacidad de absorción de energía resulta determinante [52]

Sin embargo, presentan limitaciones en términos de rigidez y resistencia a compresión, además de una mayor sensibilidad a la humedad y a la degradación por radiación ultravioleta. Estas características hacen que rara vez se utilicen como material estructural principal, siendo más habitual su integración en soluciones híbridas. Este tipo de fibra, además, muestra una tendencia a desfibrarse, lo que las hace menos recomendables en aplicaciones sometidas a esfuerzos de flexión [46]. En la Figura 2-9 se puede ver una pieza combinada sometida a ensayo de flexión para una construcción del astillero Rodman.



Figura 2-9 Pieza de estructura en aramida (Kevlar) para ensayo en laboratorio.

(Imagen de autoría propia obtenida en el laboratorio de Astilleros Rodman)

2.3 La producción en materiales compuestos en construcción naval

Los métodos de fabricación de materiales compuestos determinan en gran medida sus propiedades finales. Las técnicas más utilizadas en el sector naval son el laminado manual y la infusión por vacío. Estas son las dos técnicas más empleadas y las que optimizan el coste de obtención de los distintos laminados estructurales para los buques:

2.3.1 Laminado manual

El laminado manual es una técnica tradicional ampliamente utilizada en la fabricación de estructuras compuestas, especialmente en la industria naval y de pequeña producción. Consiste en colocar manualmente las capas de refuerzo sobre un molde, aplicando la resina con brocha o rodillo hasta lograr la impregnación completa. Su principal ventaja es la simplicidad del proceso y la baja inversión en materiales y equipos, lo que la convierte en una opción atractiva para prototipos o series cortas [47].

No obstante, este método presenta limitaciones en cuanto a calidad y repetitividad. La impregnación depende directamente de la habilidad del operario, por lo que pueden aparecer zonas con exceso o falta de resina, así como burbujas de aire o poros. Estas imperfecciones reducen las propiedades mecánicas finales del laminado y generan una mayor dispersión de resultados, especialmente en piezas de gran superficie o geometría compleja [53]. La Figura 2-10 muestra el proceso de laminado manual sobre un molde de patrullero de 66 pies. En la imagen se ve la parte monolítica del casco y el reforzado posterior que se efectúa con espumas de distinta densidad, que se toma una vez pegado a la superficie con resinas y tejidos en PRFV produciendo el laminado de los esfuerzos denominados omegas o *top-hats*.



Figura 2-10 Conformado de perfil de casco en material compuesto por laminado manual

(Imagen de autoría propia obtenida por el autor en el astillero Rodman (Moaña))

2.3.2 Infusión por vacío

La infusión por vacío es un proceso más avanzado que permite obtener laminados de alta calidad con menor contenido de resina y mejor compactación de las fibras (Figura 2-11). En este método, las capas de refuerzo se colocan en seco sobre el molde y se sellan con una bolsa de vacío. A continuación, la resina se introduce de forma controlada por la diferencia de presión, garantizando una impregnación homogénea y la eliminación de burbujas de aire durante el proceso, como se expone en [47].

Gracias a este control, la infusión por vacío mejora significativamente las propiedades mecánicas y la consistencia del material, además de reducir la exposición del operario a compuestos volátiles. Sin embargo, requiere mayor planificación y el uso de consumibles (tubos, tejidos de drenaje y bolsas de vacío) que incrementan el coste inicial y la complejidad del proceso. Pese a ello, su eficiencia y calidad han impulsado su adopción en aplicaciones estructurales exigentes del sector naval y aeronáutico [54].

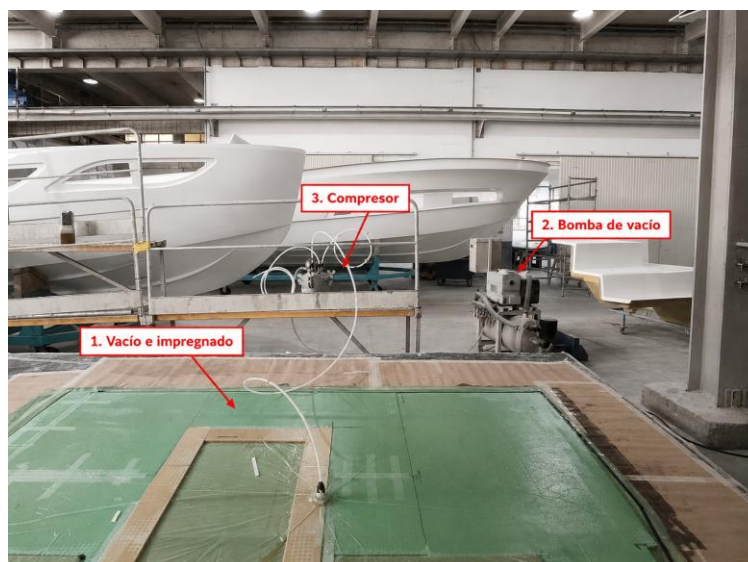


Figura 2-11 Fabricación de mamparo en material compuesto mediante infusión al vacío
(Imagen de autoría propia obtenida en el taller de laminado del Astillero Rodman (Moaña))

2.4 Consideraciones sobre plásticos para aplicar en este TFG

Se selecciona, por tanto, el PRFV como material compuesto base para el presente estudio frente a alternativas como el PRFC o el PRFA, debido a su mayor representatividad y viabilidad en el ámbito de la construcción naval. El PRFV constituye actualmente el material compuesto más extendido en embarcaciones de recreo, patrulleras y estructuras secundarias, gracias a su equilibrio entre coste, facilidad de fabricación, resistencia a la corrosión y comportamiento mecánico suficiente para aplicaciones estructurales no críticas [55].

La baja rigidez intrínseca del PRFV constituye una de sus principales limitaciones estructurales, dificultando su empleo en embarcaciones de gran eslora y situando el límite práctico de diseño en torno a los 60 m. En este contexto, el dopaje de la matriz con nanopartículas de grafeno se plantea como una estrategia para mejorar sus propiedades mecánicas y aproximar su comportamiento al de los compuestos de fibra de carbono, manteniendo al mismo tiempo las ventajas económicas y de procesamiento asociadas a las resinas de poliéster, entre las que destacan el curado rápido a temperatura ambiente, la compatibilidad con distintos tipos de cargas y su buena resistencia eléctrica entre otras [56].

En contraste, el PRFC, aunque presenta propiedades mecánicas superiores (especialmente en rigidez y resistencia específica), implica costes significativamente más elevados y mayores exigencias de fabricación y control de calidad, lo que limita su uso a aplicaciones muy específicas. Por su parte, el PRFA destaca por su elevada tenacidad e impacto, pero presenta limitaciones en compresión, sensibilidad a la humedad y dificultades en el mecanizado e integración estructural, limitándose su uso, como se ha expuesto arriba, para elementos no estructurales.

En este contexto, el PRFV se configura como la opción más adecuada para un análisis comparativo, permitiendo evaluar el potencial de mejora mediante la incorporación de grafeno sobre una base material ya consolidada en el sector naval [50].

2.5 PRFV cargado con grafeno en masa: cargas más habituales

La incorporación de nano-refuerzos de grafeno en matrices poliméricas no sigue una ley de proporcionalidad directa; el comportamiento del material resultante está intrínsecamente ligado a la morfología de la red de dispersión. Si bien el grafeno posee propiedades intrínsecas excepcionales, su eficacia en un compuesto de PRFV depende de su capacidad para actuar como puente de transferencia de cargas en la interfaz fibra-matriz. Diversas investigaciones en matrices epoxídicas y de poliéster refuerzan la tesis de que existe un “umbral de eficiencia” situado entre el 0,5% y el 4% en peso. Superado

este rango, el sistema experimenta un fenómeno de saturación donde la ganancia en el módulo elástico se ve eclipsada por una degradación de la tenacidad de fractura, debido a que las nano-plaquetas dejan de actuar como refuerzo para convertirse en inclusiones defectuosas [57].

Desde el punto de vista del procesado, un incremento en la fracción de masa de grafeno altera drásticamente la reología de la resina. Por encima del 4%, el aumento exponencial de la viscosidad cinemática impide una correcta impregnación por capilaridad de los tejidos de vidrio (rowing), comprometiendo la mojabilidad de las fibras y favoreciendo la formación de vacíos (voids) y caminos de delaminación prematura. Por tanto, la selección de la dosis óptima debe responder a un compromiso entre la mejora de las propiedades mecánicas y la garantía de una microestructura libre de defectos, asegurando que el método de fabricación sea reproducible y comparable con los estándares actuales de la industria naval [57] [58].

2.5.1 Cargas de grafeno

A continuación, se explican las diferentes proporciones de adición de grafeno al material, describiendo su nivel de viabilidad y limitaciones. Se debe tener presente lo explicado anteriormente respecto a la no linealidad de las cargas de grafeno en la matriz de polímero y refuerzo. Las cargas más habituales son:

1. **PRFV + 0,5% grafeno.** Con un 0,5% de grafeno, el material puede mejorar la transferencia de carga entre matriz y fibra, la resistencia interlaminar y ciertas propiedades de flexión o impacto. Es una concentración baja, razonable y fácil de dispersar. El problema es que, para un análisis estructural naval donde la rigidez global importa en gran medida, la mejora puede no ser suficiente. Algunos estudios muestran mejoras claras con cargas bajas, incluso en torno a 0,25-0,5%, pero también resultados modestos o dependientes del método de fabricación [59].
2. **PRFV + 1% grafeno.** El 1% es una concentración muy útil como hipótesis de trabajo porque permite plantear una mejora mecánica apreciable sin entrar todavía, de forma tan agresiva, en los problemas de aglomeración que aparecen con cargas superiores. Hay literatura que trabaja específicamente con contenidos de 1% en materiales compuestos reforzados con fibra y polímeros, y varios estudios señalan que al superar aproximadamente ese rango puede empezar la pérdida de resistencia por mala dispersión [57].
3. **PRFV + 2% grafeno.** Con 2% puede aumentar la rigidez de la matriz, pero también empieza a crecer el riesgo de aglomerados. Esos aglomerados funcionan como concentradores de tensiones, empeoran la transferencia de carga y pueden reducir resistencia a tracción, flexión o fatiga. En materiales compuestos navales esto es delicado, porque no basta con que el material sea rígido en laboratorio, sino que debe ser también repetible, fabricable y fiable en un contexto industrial [60].
4. **PRFV + 3% grafeno.** A partir de concentraciones como 3%, la dispersión se vuelve mucho más crítica. Aunque pueden encontrarse estudios donde ciertos módulos o propiedades térmicas mejoran con contenidos altos, estructuralmente aparece una tensión clara: más grafeno puede aumentar rigidez local, pero también aumentar viscosidad, defectos, porosidad, mala impregnación de fibra y acumulaciones de partículas. En un laminado PRFV, eso puede ser especialmente problemático porque el fallo no depende solo de la matriz, sino de la interfaz fibra-matriz [60].
5. **PRFV + 4% grafeno.** Cuando añadimos hasta un 4% en masa, ya nos encontramos en un rango donde el material puede comportarse más como un sistema difícil de fabricar que como una solución estructural eficiente. La literatura sobre grafeno en polímeros insiste en que las propiedades dependen mucho de la dispersión, la funcionalización, la orientación, la interacción con la matriz y el método de fabricación. A contenidos altos, el riesgo de aglomeración y defectos aumenta, lo que puede perjudicar precisamente las propiedades que interesan en un casco, a saber; resistencia, tenacidad, fatiga y comportamiento inter-laminar [61].

En este trabajo se ha seleccionado un contenido aproximado del 1 % en peso de grafeno en el compuesto PRFV por situarse en el rango de refuerzo considerado eficiente en la literatura [21] [22] [62] y, al mismo tiempo, compatible con las limitaciones de procesamiento propias de un entorno de laboratorio.

2.6 Justificación técnica de la carga del 0,5% de grafeno para este TFG

La elección de una carga del 0,5% de grafeno en peso para el desarrollo de este trabajo no es arbitraria. Responde a una estrategia de multiobjetivo. En primer lugar, desde una perspectiva mecánica, entre el 0,5 y el 1% se garantiza que el material se sitúe por encima del umbral de percolación cinemático, asegurando una mejora sustancial en la resistencia al cortante entre facetas laminares sin penalizar la ductilidad del laminado. A esta concentración, la distancia inter-particular del grafeno permite una dispersión homogénea mediante métodos de cizalla convencionales, evitando la formación de aglomerados que actuarían como concentradores de tensiones y puntos de inicio de grietas catastróficas, un riesgo inaceptable en estructuras críticas como la viga casco de un buque.

En segundo lugar, se ha priorizado la viabilidad de fabricación. Mantener la viscosidad de la mezcla en niveles operativos permite emplear técnicas de infusión o laminado manual manteniendo los tiempos de gel y la calidad de la interfase fibra-resina, factores que en concentraciones superiores (2-4%) se verían gravemente degradados. Finalmente, esta decisión dota al estudio de una sólida validez comparativa; el 1% como máximo es el estándar de referencia en la literatura científica de vanguardia [21] [22] [62], lo que permite validar los resultados obtenidos en este TFG frente a ensayos normalizados, garantizando que las conclusiones sobre la mejora de la resistencia longitudinal sean extrapolables a un escenario de construcción naval real y tecnológicamente alcanzable. Es decir, el análisis matemático resultará verosímil respecto del ensayo en laboratorio.

En cuanto al comportamiento a fatiga, la incorporación de nanoplaquetas de grafeno actúa principalmente sobre la matriz y la interfaz fibra-resina, que es donde se inicia y propaga el daño cíclico en los laminados de fibra de vidrio. Los mecanismos descritos en la literatura son la desviación y el puenteo de grietas y la disipación de energía, lo que se traduce en una degradación de rigidez más lenta y un menor autocalentamiento del material durante el ciclado. Ahora bien, esta mejora responde a la misma no linealidad descrita para las propiedades estáticas: las mejoras óptimas de resistencia a fatiga se reportan típicamente para contenidos de grafeno bajos (del orden de 0,1–0,3 % en peso), donde las nanoplaquetas retrasan el inicio y la propagación de grietas, mientras que concentraciones mayores provocan apilamiento y aglomeración de plaquetas que generan microdefectos y reducen la vida a fatiga [63] [64]. En laminados PRFV multiescala dopados con grafeno se ha verificado experimentalmente que las concentraciones bajas aumentan la vida a fatiga, observándose una caída de dicha vida al elevar la carga de nanopartículas [63]. Este resultado es coherente con la elección de un máximo del 1 % adoptada en este trabajo y refuerza el interés de explorar contenidos del orden del 0,5 % señalados en la Tabla 4-1. Con las evidencias encontradas en la literatura, se construye la gráfica vida a fatiga-contenido GNP de la Figura 2-12.

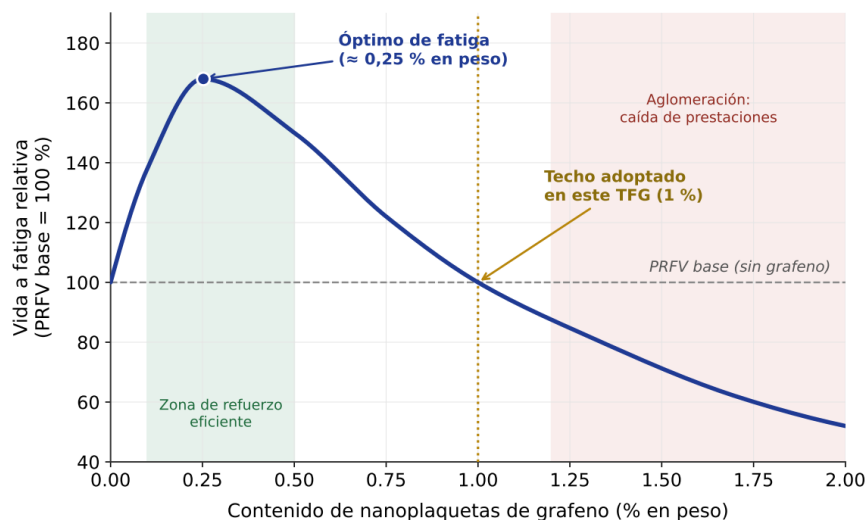


Figura 2-12 Esquema cualitativo de elaboración propia basada en [63] [64]

En lo relativo a la durabilidad frente al ambiente marino, los laminados PRFV son intrínsecamente sensibles a la degradación por absorción de agua, que plastifica la matriz, favorece el descohesión fibra-matriz y la ósmosis. El grafeno bien disperso mitiga este fenómeno: gracias a su elevada relación de aspecto, las nanoplaquetas actúan como barrera frente a la difusión de agua a través de la matriz, obligando a las moléculas a seguir un camino más tortuoso y reduciendo así la absorción [65]. En composites de fibra de vidrio/epoxi envejecidos en agua de mar de forma prolongada, la adición de nanocargas de grafeno (0,5 %) mejora el comportamiento a largo plazo frente a las probetas de referencia, reduciendo la absorción de agua y preservando mejor las propiedades [66]. No obstante, este efecto protector depende críticamente de la calidad de la dispersión: se ha comprobado que contenidos de 0,25–0,5 % en peso mejoran la retención de propiedades mecánicas tras el envejecimiento higrotérmico, mientras que al aproximarse al 1 % la resistencia tiende a disminuir [59], ya que los aglomerados generan caminos capilares que facilitan la entrada de agua. Estos resultados concuerdan con la reducción del 40 % en la absorción de humedad documentada para laminados PRFV dopados [23] y con la función de barrera del gelcoat descrita en el capítulo 3.5.

2.7 Los materiales compuestos y el grafeno a nivel normativo

Actualmente, sociedades como Bureau Veritas (NR467 C DT R20/ NR467 B DT R20) regulan específicamente mamparos secundarios y paneles con laminados a base de materiales compuestos, exigiendo pruebas de impacto, fuego (como el estándar FTP Code para pruebas de fuego/no combustibilidad en materiales navales redactado por la IMO) y fatiga bajo condiciones marinas. Esta aproximación conservadora facilitó la adopción gradual desde los años 80 en yates recreativos y patrulleras, priorizando seguridad estructural. Por otro lado, la ISO 12215:2020 (Partes 5-8) establece requisitos para propiedades mecánicas, laminados y estructuras en barcos recreativos <500 GT con materiales compuestos [67] [68] [69] [70].

Sin embargo, para el caso particular del grafeno, las sociedades de clasificación no contemplan actualmente su regulación, síntoma de su carácter todavía emergente. Esta falta de consolidación normativa se debe a su inexplorada solvencia con respecto a los estrictos requisitos que establecen las sociedades de clasificación para materiales empleados en componentes críticos, basados en propiedades mecánicas certificadas, ensayos de comportamiento y durabilidad, así como criterios de seguridad equivalentes. [71] Aunque la ISO/TS 9651:2025 establece descriptores estandarizados para grafeno (número de capas, tamaño lateral, densidad de defectos), sigue siendo una especificación técnica preliminar que no proporciona aún la validación plena requerida para aplicaciones estructurales críticas bajo reglas como las de DNV [72].

Si bien no existe una regulación nacional al respecto, ni existe mención explícita sobre normativa de materiales basados en grafeno, el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana sí contempla la concesión de ayudas para la construcción naval a aquellos buques que destaquen en el campo de la “investigación e innovación, transferencia de tecnología y cooperación entre empresas, con especial hincapié en la economía con bajas emisiones de carbono, la resiliencia y la adaptación al cambio climático” (BOE 183 del 1 de agosto de 2022, Disposición 12898, Orden ICT/739/2022 Capítulo 1, Artículo 4), encuadrando esta subvención en el marco del PERTE Naval de la UE (Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica del sector Naval) [73] [74].

En este contexto, cualquier uso de grafeno en buques debe considerarse experimental, limitado a elementos no críticos o refuerzos de materiales compuestos, siempre acompañado de validaciones mediante ensayos certificados y modelización estructural que permita justificar su comportamiento frente a cargas y sollicitaciones habituales.

Por lo tanto, en el presente trabajo, el análisis del grafeno se realiza mediante la comparación de materiales convencionales y PRFV con grafeno en un elemento estructural representativo, utilizando cálculos mecánicos clásicos y modelización FEM simplificada como herramienta de evaluación preliminar, dentro del marco permitido por la normativa actual.

2.8 Métodos de modelado de las estructuras navales

Las estructuras de buques emplean para definir su estructura principal o viga-casco materiales muy diversos como madera, acero, aluminio, composites y composiciones de todo lo anterior. Además de lo anterior las dimensiones de los barcos varían en eslora desde unos pocos metros hasta varios cientos como por ejemplo un pequeño pesquero de 12 metros y un portacontenedores de 300 metros de eslora. Por tanto, tenemos una dicotomía entre tamaño y materiales que hace que la elección de los procesos de diseño y modelado de la estructura no sean siempre iguales.

2.8.1 Evolución de los métodos de análisis estructural en la ingeniería naval

El análisis de estructuras navales además integra criterios normativos establecidos por sociedades de clasificación como la IACS, se integra con herramientas de cálculo avanzadas para predecir el comportamiento ante cargas estáticas, vibraciones y sollicitaciones dinámicas [75].

Los ingenieros navales han utilizado históricamente métodos analíticos basados en la mecánica de vigas, placas y cascos rígidos, complementados con fórmulas empíricas y hojas de cálculo para estimar tensiones, flechas y reacciones en elementos estructurales. Estas aproximaciones, derivadas de normas como las de RINA o IACS, permiten cálculos rápidos para diseños preliminares, aunque limitados en geometrías complejas [76] [77].

El desarrollo de la informática ha impulsado los métodos numéricos, destacando la simulación por Elementos Finitos (FEM), que modela estructuras tridimensionales complejas, evalúa distribuciones de esfuerzos y deformaciones, y valida diseños según criterios de seguridad. El FEM facilita análisis estáticos, dinámicos y modales en buques, como presiones hidrostáticas o excitaciones por motores, superando las restricciones de los métodos tradicionales [75].

Estos enfoques numéricos permiten comparar materiales convencionales con materiales compuestos avanzados reforzados con grafeno, evaluando propiedades mecánicas como la rigidez, la deformación y la resistencia estructural. En simulaciones FEM controladas, los nano-compuestos de grafeno muestran mayor tenacidad y ligereza, optimizando diseños navales para eficiencia y durabilidad [78].

De todas formas, el análisis FEM no debe considerarse una herramienta infalible, sino un proceso que requiere una evaluación previa frente a soluciones analíticas de la teoría clásica de laminados. Es imperativo modelar no solo las cargas mecánicas, sino también el comportamiento térmico y la contracción durante el curado, factores que determinan la calidad final y la precisión dimensional de las estructuras compuestas en el ámbito naval [79].

Por todo lo anterior es necesario evidenciar que para nuestro análisis debemos tener presente la producción de material con unas características isotrópicas y así no podemos emplear laminados de grandes espesores en el análisis de las cargas, dado que está demostrada la influencia de variables cualitativas como el tiempo de curado o el tamaño o cargas empleadas en los composites.

2.8.2 Validación cruzada: métodos analíticos y numéricos

La evolución de la ingeniería naval hoy en día se caracteriza por la transición desde materiales isotrópicos tradicionales, como el acero naval, hacia materiales compuestos avanzados que ofrecen una optimización significativa en la relación resistencia-peso. No obstante, este cambio de paradigma exige una evolución paralela en las herramientas de cálculo y en la rigurosidad de los procesos de validación técnica y normativa [80].

En el diseño estructural naval, la validación cruzada se establece como una necesidad metodológica fundamental para garantizar la integridad de la plataforma. Históricamente, los ingenieros han dependido de métodos analíticos basados en la mecánica de vigas y fórmulas empíricas y estadísticas derivadas de las Sociedades de Clasificación para realizar cálculos rápidos en fases preliminares.

Dada la complejidad geométrica de las secciones de los buques y la naturaleza heterogénea de los laminados, estos métodos presentan limitaciones. La integración de la simulación por FEM permite modelar distribuciones de esfuerzos tridimensionales más complejos. La validación cruzada consiste, por tanto, en contrastar las soluciones de la teoría clásica de laminados o fórmulas de Navier con los resultados numéricos para asegurar que el modelo computacional corrige desviaciones asociadas a la morfología del material.

2.8.3 Modelado y simulación en Autodesk Inventor

Autodesk Inventor se ha consolidado como una herramienta versátil en el entorno industrial para el diseño asistido por ordenador (CAD) y el análisis de ingeniería. Su entorno de trabajo permite la creación de piezas sólidas (.ipt) y ensamblajes complejos (.iam), facilitando la transición desde bocetos 2D acotados hasta extrusiones y revoluciones 3D que representan fielmente los perfiles estructurales navales [81].

Para el análisis de esfuerzos, el software integra motores de cálculo como Nastran entre otros, que permiten evaluar estados de tensión y flechas producidas bajo cargas de escala real. En el caso de materiales compuestos, el modelado en Inventor exige definir constantes de ingeniería como módulos elásticos, coeficientes de Poisson y módulos de cortadura que reflejen el comportamiento ortotrópico de los laminados, permitiendo identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos que los métodos manuales podrían omitir [81].

2.8.4 Implicaciones normativas y Sociedades de Clasificación

El diseño de estructuras navales está estrictamente supeditado a los reglamentos de las Sociedades de Clasificación miembros de la IACS como Bureau Veritas o DNV. Estas normas definen los requisitos de seguridad, resistencia y durabilidad que deben cumplir tanto los materiales convencionales como los nuevos compuestos.

En particular, reglamentos como el NR546 de Bureau Veritas [82] permiten explícitamente el uso de modelos de viga-casco para evaluar la inercia de flexión y cortante, siempre que se basen en una justificación técnica sólida. La normativa impone factores de seguridad más conservadores para los plásticos reforzados (PRFV) debido a su modo de rotura frágil y sin aviso de fluencia. Además, la introducción de aditivos como el grafeno plantea un reto regulatorio, ya que su uso suele requerir procesos de “*Approval in Principle*” (AiP) y ensayos certificados de fuego (FTP Code) y fatiga para validar su comportamiento en el hostil ambiente marino.

2.9 Herramienta de análisis multicriterio TOPSIS

El método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) es una técnica de análisis multicriterio ampliamente utilizada para la toma de decisiones en entornos complejos donde intervienen múltiples criterios, a menudo en conflicto entre sí. El principio fundamental de TOPSIS se basa en la idea de que la mejor alternativa debe ser aquella que se encuentre lo más cercana posible a la solución ideal positiva y, simultáneamente, lo más alejada posible de la solución ideal negativa. La solución ideal positiva representa la alternativa hipotética que maximiza los criterios de beneficio y minimiza los criterios de coste, mientras que la solución ideal negativa representa el escenario opuesto.

El procedimiento del método TOPSIS comienza con la construcción de una matriz de decisión que recoge las alternativas y los criterios considerados. Posteriormente, esta matriz se normaliza con el fin de eliminar las diferencias de escala entre los criterios, y se pondera según la importancia relativa asignada a cada uno de ellos. A continuación, se determinan las soluciones ideal positiva y negativa, y se calcula la distancia euclidiana de cada alternativa respecto a ambas soluciones. Finalmente, se obtiene el coeficiente de cercanía relativa, que mide el grado de proximidad de cada alternativa a la solución ideal positiva. Este coeficiente permite establecer una clasificación objetiva de las alternativas, facilitando la selección de la opción más adecuada. Entre las principales ventajas del método TOPSIS destacan su simplicidad conceptual, su capacidad para considerar simultáneamente criterios de maximización y minimización, y su aplicabilidad en diversos ámbitos de la ingeniería, la gestión y la toma de decisiones estratégicas [83].

En la Figura 2-13 se puede ver de forma esquemática como es el proceso de aplicación de la metodología TOPSIS de forma general. En nuestro caso la aplicaremos de forma sencilla a la elección de la solución más favorable. No debemos confundir la más favorable con la mejor, debemos comparar esto con el siguiente ejemplo: supongamos que unos pesqueros deciden salir a pescar a un caladero donde el mejor de los buques en la pesca no es el que más pesca, sino que es aquel que se aleja más del fracaso absoluto en la pesca. Será aquel que ha aunado una serie de componentes como: tiempo en llegar y volver al caladero, tiempo de faena, cantidad de capturas, llegada a puerto sin competencia extrema y ratio ganancia costes favorable.

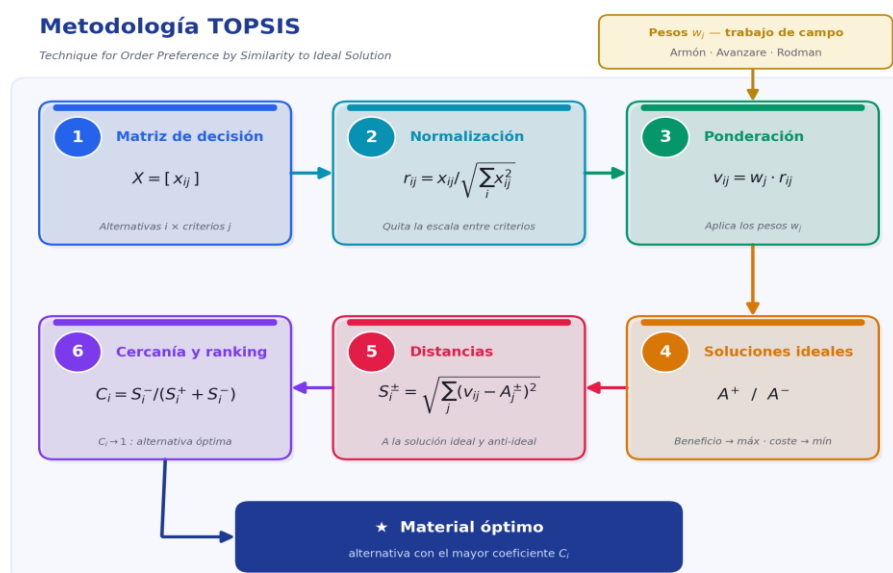


Figura 2-13 Flujograma de aplicación de la metodología TOPSIS
(Elaboración propia)

2.9.1 Formulación básica de la metodología TOPSIS

Una vez decidido el uso de la metodología TOPSIS, veremos en este apartado la formulación básica que emplearemos en el desarrollo para determinar las posibilidades de la elección del material. Este se

estructura en las siguientes fases algorítmicas que se explican a continuación y que se pueden ver de forma esquemática en Figura 2-13.

Primero debemos construir la matriz de decisión m en el que relacionamos las alternativas, en nuestro caso los materiales, con los criterios n donde cada elemento de la matriz viene representado x_{ij} por en donde la alternativa es i y el criterio j .

En segundo lugar, se procede a la normalización de la matriz m obteniendo la matriz normalizada r_{ij} mediante la norma euclidiana de tal forma que obtenemos la siguiente expresión $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}}$;

Se asigna a cada criterio un peso w_j obtenido mediante el consenso de expertos del sector (astilleros Armón, Avanzare Materials, personal del astillero Rodman), garantizando que la jerarquía de importancia (p. ej., Coste > Escalabilidad > Peso) refleje la realidad industrial que analizaremos en el trabajo de campo. La matriz ponderada se obtiene como la expresión $v_i = w_j \cdot n_{ij}$.

Ahora debemos identificar las soluciones ideales que escribimos como ideal positivo (A^+) e ideal negativo (A^-). Para criterios beneficiosos como la resistencia a la corrosión o la escalabilidad el valor A^+ es el valor máximo y para criterios de coste como flecha, peso de la estructura, o CAPEX el valor A^+ es el valor mínimo.

Ahora procedemos a buscar las soluciones S ideales positivas e ideales negativas (A^+), (A^-) mediante el cálculo de las separaciones euclidianas de las soluciones calculando en cada caso para las primeras las positivas $S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2}$ y para las negativas $S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2}$.

Por último, procedemos a determinar el coeficiente de cercanía (C_i) que se obtiene de ratio final de las alternativas de tal forma que $C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$; de esta forma los valores de C_i próximos a 1 indican la solución óptima bajo los criterios definidos.

2.9.2 La metodología TOPSIS en el sector naval

Esta metodología está ampliamente contrastada en el sector naval. Existen múltiples ejemplos que abarcan desde procesos de selección de astillero para construir un buque combinando este con otros procedimientos multicriterio como el proceso de análisis por jerarquías (AHP) usando este último para determinar los pesos de las variables [84] [85]. Otros procesos en los que se aplica este tipo de procedimiento complejos para la toma de decisiones son la selección del tipo de plataforma naval que queremos para nuestra flota partiendo de algunas características que consideramos de partida críticas como puede ser el consumo o alguna de sus capacidades [86] [87]. Otros procesos se emplean para elegir el tratamiento superficial de superficies como puede ser el revestimiento interior de tanques de carga cuando se emplean para el transporte de mercancías peligrosas que pueden dañar el material con el que está construida la estructura resistente del buque [88]. Esta herramienta también se emplea en procesos de definición de sistemas de buque y de sus servicios como puede ser el de achique [89] o como procedimiento disruptivo de diseño de servicios de propulsión comparado con los procedimientos tradicionales [90].

A partir de la revisión de la literatura científica expuesta, se evidencia que la idoneidad del método TOPSIS en el ámbito de la ingeniería naval radica en su robustez para gestionar el compromiso técnico-económico (*trade-off*) inherente a la introducción de tecnologías disruptivas. En escenarios donde se evalúa la sustitución de materiales tradicionales como el acero por compuestos avanzados (como el PRFV dopado con nanomateriales), las variables de diseño suelen ser contrapuestas: la mejora en la ligereza y la resistencia a la corrosión suele llevar aparejado un incremento en los costes de adquisición y barreras en la madurez manufacturera. De este modo, la aplicación de la metodología TOPSIS en este ámbito se consolida como una herramienta fundamental, ya que permite procesar simultáneamente criterios de maximización (propiedades mecánicas) y de minimización (costes y pesos), proporcionando

una jerarquización matemática objetiva que aproxima el diseño naval hacia una solución de compromiso óptima e ideal. [91]. El TOPSIS opera directamente sobre la matriz numérica, combina criterios de maximización y minimización, y entrega una ordenación objetiva e inequívoca mediante el coeficiente de cercanía, lo que lo convierte en la herramienta idónea para el problema planteado.

2.10 Comparación estructural: el buque como viga

En ingeniería naval, los cascos de buques se modelan tradicionalmente como vigas ligeras, pero altamente resistentes, aplicando conceptos básicos de mecánica para evaluar su integridad ante fuerzas externas [92]. Se suele definir el buque desde el punto de vista estructural como la viga casco de mínimo peso y máxima resistencia.

En esta simplificación de forma didáctica, las secciones clave del navío equivalen a las de una viga doble T de forma que el ala inferior abarca el fondo y doble fondo, el alma central el forro del casco, y el ala superior las cubiertas altas, optimizando la distribución de masas para minimizar peso mientras se maximiza la inercia resistente [93]. Por otro lado, se puede considerar una viga de sección cuadrangular.

Las olas generan cargas dinámicas variables; los casos más exigentes son el arrufo, donde la proa y la popa se hunden por mayor empuje en el seno de la ola, induciendo compresión en el fondo y tracción en cubierta; y el quebranto, opuesto, con elevación central, en la cresta de la ola, que comprime la cubierta y tensiona el fondo. Estos esfuerzos se representan en las curvas de la [94]. Estos momentos flectores máximos se intensifican cuando la longitud de onda λ es comparable a la eslora L ($0.6L$ a $2.3L$ según la OMI), donde la resonancia amplifica las deformaciones, pudiendo reducir estabilidad y generar fatiga estructural; normas como IACS calculan estos picos para dimensionar el espesor de placas y refuerzos. El análisis de curvas de momento y cortante confirma ceros en fuerza cortante donde la flexión es extrema, guiando diseños seguros [95]. La Figura 2-14 muestra la comparación conceptual del casco como viga doble T entre un buque sometido a quebranto y otro sometido a arrufo.

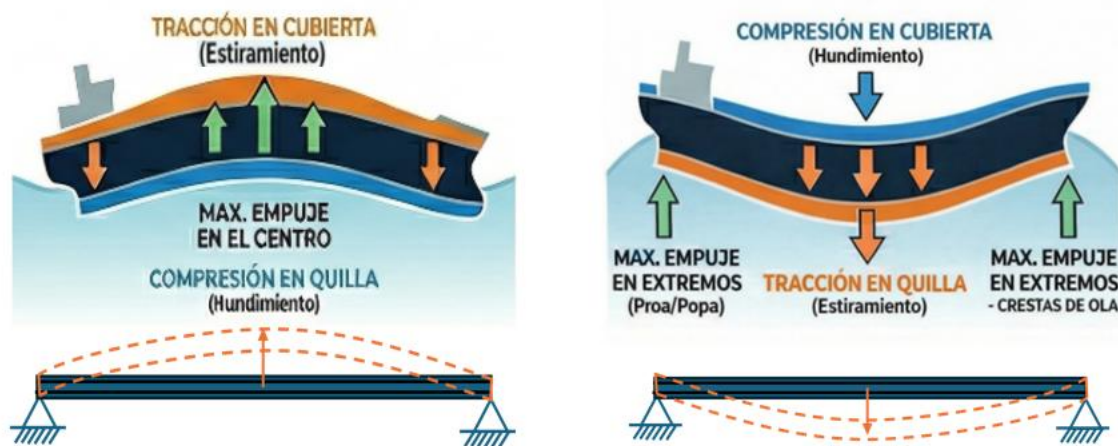


Figura 2-14 Representación de viga casco y doble T sometida a quebranto y arrufo
(Elaboración propia con IA generativa)

Finalizado el marco teórico, se introduce un capítulo fundamental que es el trabajo de campo. En él vamos a presentar las entrevistas a expertos que hemos realizado, así como los resultados más relevantes de las visitas a astilleros, que servirán como elemento objetivo para el análisis posterior mediante metodología de estudio de variables cuantitativas y cualitativas.

3 TRABAJO DE CAMPO Y ENTREVISTAS

Aquí se han analizado dos modelos productivos antagónicos y complementarios. Por un lado, la construcción modular en acero de grandes unidades (Astilleros Armón) y por otro la fabricación seriada en materiales compuestos (Rodman Polyships). Esta dualidad permite situar el análisis del PRFV dopado con grafeno no como una cuestión simplemente teórica, sino como una solución orientada a nichos específicos donde la ratio de eficiencia estructural justifique su implementación. Junto a esto se ha contactado con la empresa de referencia a nivel nacional en el campo del grafeno para aunar uno conjunto de opiniones de experto que nos permitan obtener criterios objetivos sobre la materia.

Con el fin de complementar la revisión bibliográfica, este capítulo articula el trabajo de campo mediante una metodología mixta de observación directa y entrevistas. El objetivo es evaluar la transferencia tecnológica de los nano-compuestos al sector naval desde una perspectiva de ciclo de vida (LCA) y viabilidad técnico-económica.

El objetivo fue adquirir conocimiento global de las ventajas y limitaciones de los nuevos materiales frente al acero tradicional por parte de expertos del sector. De manera análoga, se buscó conocer la realidad de la industria y observar la relación entre la teoría estudiada y la realidad de su implementación en la construcción naval. Dichas entrevistas se pueden consultar su transcripción literal en los Anexos III a VII. En los apartados de este capítulo presentamos las entrevistas y visitas que fueron las siguientes:

1. Entrevistas:
 - a. Director del astillero de Armón (Navia) [96].
 - b. Responsable de desarrollo de negocio de “Avanzare Materials” [97].
 - c. Director del astillero de Armón (Vigo) [98].
 - d. Director técnico del astillero Rodman Polyships (Moaña) [99].
 - e. Directora de laboratorio de Rodman Polyships (Moaña) [100].
2. Visitas:
 - a. Astillero Armón (Vigo).
 - b. Astillero Rodman (Moaña).

La síntesis de estas intervenciones permite identificar un punto crítico de convergencia: la industria demanda materiales que emulen la rigidez del acero pero que mantengan la ligereza y resistencia a la corrosión de los polímeros. Es en este escenario donde la propuesta de este TFG con el uso de un 0,5% de grafeno fija su interés. Buscamos mitigar la principal debilidad señalada por los directores técnicos: la falta de rigidez específica en grandes estructuras de PRFV sin incurrir en los problemas de procesado y coste que invalidarían su uso en un entorno de producción real como los visitados.

3.1 Entrevista al director de Astilleros Armón (Navia)

La entrevista con el Director de Astilleros Armón ofrece una perspectiva pragmática e industrial sobre la selección de materiales en el sector naval. La tesis central de su intervención es que la idoneidad de un material no depende de sus propiedades mecánicas aisladas, sino de su viabilidad sistémica: una ecuación compleja donde interactúan el coste de adquisición, la escalabilidad productiva, la mantenibilidad y el ciclo de vida. Las ideas fundamentales extraídas de la consulta son:

1. **La dicotomía entre coste y escalabilidad estructural.** El entrevistado posiciona el CAPEX (Gasto de Capital) como el filtro primario en la construcción naval privada. En estructuras de gran escala, los márgenes económicos exigen materiales con una cadena de suministro madura. Introduce un concepto clave para este TFG: la escalabilidad bidimensional:
 - a. Escalabilidad geométrica: la dificultad técnica de trasladar las propiedades de un material compuesto a grandes esloras sin comprometer la rigidez global.
 - b. Escalabilidad de proceso: la capacidad de amortizar moldes y utillajes, factor que favorece al PRFV en series cortas o embarcaciones de recreo, pero que penaliza en buques de pasaje o carga personalizados
2. **Hegemonía del acero: el equilibrio entre coste y ductilidad.** El acero permanece como el estándar industrial gracias a su isotropía y madurez normativa. Aunque el entrevistado reconoce la problemática de la corrosión, subraya que la industria ha integrado su gestión mediante planes de mantenimiento preventivo y sistemas de protección catódica, convirtiéndola en un coste operativo (OPEX) predecible y aceptado por las Sociedades de Clasificación.
3. **El peso como variable dependiente del perfil operacional.** Se destaca que la reducción de masa no es un valor absoluto, sino que depende de la misión del buque. Mientras que en buques de alta velocidad o ferris el ahorro de peso tiene un impacto directo en la eficiencia propulsiva y el consumo, en grandes buques de desplazamiento la masa estructural es despreciable frente al peso muerto (carga), restando atractivo económico a materiales más costosos.
4. **Limitaciones intrínsecas del PRFV convencional.** Uno de los puntos más críticos para este trabajo es la advertencia sobre la baja rigidez específica del PRFV en estructuras primarias. En comparación con el acero, el material compuesto presenta desafíos para mantener la integridad longitudinal en grandes esloras, donde el módulo elástico de la matriz suele ser el factor limitante.
5. **El paradigma de la convivencia de materiales.** El director descarta la sustitución total, apostando por la hibridación. El acero para el casco resistente, el aluminio para superestructuras y el PRFV para elementos secundarios o embarcaciones auxiliares. Esta visión refuerza la necesidad de investigar aditivos (como el grafeno) que permitan a los composites asumir roles de mayor responsabilidad estructural.
6. **Criterios de resiliencia industrial: reparación y fallo.** Finalmente, introduce factores de seguridad operativa para las plataformas que se construyen:
 - a. Capacidad de deformación plástica: los metales permiten una absorción de energía post-fluencia que avisa antes de la rotura. El PRFV, por su naturaleza, presenta un fallo frágil que puede ser indetectable a simple vista (daño interno por impacto).
 - b. Infraestructura de reparación: la soldadura es una tecnología universal; la reparación certificada de composites requiere condiciones controladas de humedad y temperatura que no siempre están disponibles en puertos remotos.

3.1.1 Conclusión técnica de la entrevista

El análisis del Director de Armón confirma que el acero es dominante no por falta de innovación, sino por su robustez industrial. Sin embargo, deja abierta una ventana de oportunidad: el PRFV ganará terreno si se logran mejorar sus propiedades de rigidez y fiabilidad sin disparar los costes de procesado. Esta conclusión es la que justifica la investigación de este TFG sobre el uso de nano-partículas de grafeno para “cerrar la brecha” de rigidez entre el composites y el acero.

La entrevista con el director de Astilleros Armón aporta una visión eminentemente industrial sobre la selección de materiales en construcción naval. Su principal conclusión es que la elección de un material no puede realizarse únicamente en función de sus propiedades mecánicas teóricas, sino atendiendo a criterios de viabilidad real: coste, resistencia a la corrosión, escalabilidad, peso, mantenimiento, reparación y reciclaje. La entrevista completa se puede consultar en el Anexo III: entrevista al director del astillero Armón (Navia).

3.2 Entrevista al responsable de desarrollo de negocio de “Avanzare Materials”

La consulta con “Avanzare Materials”, líderes en la producción de grafeno y nanorefuerzos, aporta la base científica necesaria para desmitificar el uso de nanomateriales en la ingeniería naval. Su visión permite aterrizar el grafeno desde la teoría de laboratorio a su rol como aditivo funcional en matrices poliméricas industriales. Las claves técnicas extraídas de la entrevista son:

1. **Naturaleza del material: nanoplaquetas de grafeno (GNP).** Se aclara que, a escala industrial, no se trabaja con grafeno monocapa ideal, sino con productos derivados de la exfoliación del grafito. Técnicamente, hablamos de nanoplaquetas de grafeno (GNP) o grafitos altamente exfoliados. Estas estructuras mantienen una relación de aspecto (ratio diámetro/espesor) excepcional, pero operan bajo las leyes de la mecánica de medios continuos cuando se integran en una resina.
2. **El rol de la matriz en la transferencia de carga.** Un concepto fundamental para el análisis estructural de este TFG es que, en un compuesto PRFV, la fibra de vidrio absorbe los esfuerzos principales (tracción/compresión longitudinal). El grafeno, por tanto, no sustituye a la fibra, sino que optimiza la matriz. Al mejorar las propiedades de la resina (módulo elástico y resistencia al corte), el grafeno facilita una transferencia de carga más eficiente entre los filamentos de vidrio, retrasando la aparición de microfisuras interlaminares.
3. **No linealidad y el umbral de eficiencia (dosis vs. dispersión).** El entrevistado confirma una premisa crítica: más no es mejor. A concentraciones bajas (en torno al 0,5-1%), las nanopartículas actúan como puntos de nucleación, refinando la microestructura del polímero. Sin embargo, al aumentar la carga, la energía superficial de las partículas provoca aglomeración por fuerzas de Van der Waals. Estos aglomerados actúan como defectos estructurales o “puntos de inicio de fractura”, lo que valida la hipótesis de este TFG de trabajar con un 0,5% en peso como el límite superior para garantizar una dispersión homogénea y evitar la caída de las propiedades mecánicas.
4. **Multifuncionalidad más allá de la mecánica.** Se subraya que el grafeno es un material “multipropiedad”. Además del refuerzo estructural, aporta:
 - a. Conductividad eléctrica: fundamental para la disipación de cargas estáticas en tanques de combustible o la creación de sistemas de apantallamiento electromagnético.
 - b. Gestión térmica: mejora la disipación de calor en zonas críticas (salas de máquinas o carcasas de equipos).
5. **El reto de la integración reológica e industrial.** La escalabilidad no es solo una cuestión de coste, sino de reología. La baja densidad aparente del grafeno (su enorme volumen por unidad de masa) dificulta su mezcla en procesos industriales sin equipos de cizalla de alta energía. Una carga del 0,5% permite mantener la viscosidad de la resina en rangos operativos para técnicas como la infusión o el laminado manual, mientras que cargas superiores invalidarían el proceso productivo naval estándar.
6. **Desmitificación y realismo tecnológico.** La entrevista concluye con una advertencia sobre el “hype” del grafeno. Las propiedades extraordinarias citadas en la literatura científica a menudo se refieren a escalas nanométricas. El aporte de este TFG radica en tratar el grafeno como una herramienta de optimización de composites existentes, no como una solución milagrosa e inaccesible.

3.2.1 Conclusión técnica de la entrevista

La aportación de “Avanzare Materials” justifica plenamente el enfoque de este estudio: el uso del grafeno al 0,5% es la decisión más sólida desde el punto de vista de la nanomecánica y la fabricación. Refuerza la matriz para que el PRFV se comporte de manera más rígida ante los esfuerzos de flexión de la viga casco, pero mantiene el sistema dentro de los límites de una producción industrial verosímil. La transcripción completa de la entrevista se puede ver en el Anexo IV: entrevista al director comercial de Avanzare Materials..

3.3 Entrevista al director de Astilleros Armón (Vigo)

La consulta con el representante de Armón Vigo ofrece una visión crítica sobre la transferencia de tecnología en el sector naval de gran eslora. Su discurso se aleja de la sustitución disruptiva para centrarse en la innovación incremental, donde cualquier nuevo material debe superar estrictos filtros de seguridad, normativa y operatividad real. Las claves estratégicas de esta intervención son:

1. **El buque como activo crítico y la prudencia tecnológica.** Se subraya que la construcción naval no trabaja con prototipos, sino con activos de larga vida útil sometidos a entornos dinámicos severos. La innovación, por tanto, está subordinada a la fiabilidad (*reliability*). Un cambio de material estructural implica una responsabilidad civil y técnica que solo se asume tras procesos de validación exhaustivos.
2. **Hegemonía del acero: disponibilidad y certidumbre.** El acero no es solo un material; es un ecosistema industrial completo. El entrevistado destaca que su dominio se basa en la certidumbre de su comportamiento mecánico en condiciones extremas (como buques offshore o de rescate). Esta madurez facilita la estandarización y reduce las incertidumbres en el cálculo de fatiga y vida remanente.
3. **Hacia la hibridación y la optimización focalizada.** Una de las aportaciones más valiosas es la propuesta de la solución híbrida. La innovación no tiene por qué ser total; puede ser localizada. Optimizar espesores, rediseñar nudos estructurales o aplicar nuevos materiales (como el PRFV con grafeno) en zonas de baja responsabilidad estructural o alta necesidad de ligereza (como superestructuras o cubiertas superiores) es el camino más viable hacia la descarbonización.
4. **El marco regulatorio y las Sociedades de Clasificación.** Se identifica la normativa como una barrera de entrada. Las Sociedades de Clasificación (Lloyd's Register, DNV, Bureau Veritas, etc.) poseen reglas muy maduras para el acero. Introducir materiales compuestos con grafeno exige procesos de “*Approval in Principle*” (AiP) que aumentan los tiempos y costes de desarrollo, dificultando la competencia directa con los metales.
5. **Ventajas competitivas: acústica y vibraciones (NVH).** El entrevistado reconoce un nicho claro para los composites: el control de Ruido, Vibración y Dureza (NVH). En buques de investigación oceanográfica o pesqueros avanzados, la capacidad de amortiguamiento acústico del PRFV es superior a la del acero. Aquí, el grafeno podría actuar como un optimizador de la matriz para mejorar aún más la atenuación de vibraciones estructurales.
6. **El reto de la seguridad pasiva: comportamiento ante el fuego.** Un factor limitante crítico es la naturaleza inflamable de las resinas poliméricas frente a la incombustibilidad del acero. Aunque existen aditivos ignífugos, la integridad estructural de un casco de composites bajo temperaturas de incendio sigue siendo una preocupación de seguridad operativa que restringe su uso en determinadas zonas del buque según el convenio SOLAS.
7. **El grafeno: de aditivo funcional a refuerzo estructural.** Para el director de Armón Vigo, el grafeno tiene un futuro prometedor pero inicial en recubrimientos funcionales (pinturas anti-incrustantes o sensores inteligentes). Su uso como refuerzo en el PRFV se ve con interés, pero supeditado a resolver la homogeneidad en la fabricación a gran escala, evitando que las mejoras de laboratorio se pierdan en el taller de laminado.
8. **El factor humano y el acervo técnico del astillero.** Se destaca que el acero es una tecnología “democratizada” en los astilleros. La transición al PRFV con grafeno exige una reprogramación

del capital humano: desde soldadores que deben formarse en técnicas de infusión, hasta inspectores de calidad que deben aprender a detectar delaminaciones invisibles a la vista.

3.3.1 *Conclusión técnica de la entrevista*

La visión de Armón Vigo valida la necesidad de un enfoque realista en este TFG. El grafeno al 0,5% no debe presentarse como el fin de la era del acero, sino como un reforzador de nicho que permite al PRFV ganar la rigidez necesaria para aplicaciones híbridas, permitiendo que el buque sea más ligero y eficiente sin comprometer la seguridad ni alejarse excesivamente de los procesos productivos actuales. La transcripción de la entrevista se encuentra en el Anexo V: entrevista al director de los astilleros Armón (Vigo).

3.4 Entrevista al director técnico de Astilleros Rodman Polyships

La sesión técnica con la dirección técnica de Rodman permite desglosar los desafíos de la ingeniería de producción en materiales compuestos. El enfoque se desplaza desde la mera resistencia del material hacia la integridad del proceso constructivo, subrayando que la calidad de una “viga buque” depende críticamente de la homogeneidad de su fabricación. Destacaremos las siguientes claves de la entrevista a nivel técnico/logístico:

1. **Sincronización logística y cinética de curado.** Se enfatiza que la laminación de grandes estructuras no es solo una reacción química, sino un desafío logístico de tiempo de gel. El control de la proporción resina-catalizador debe ser exacto para evitar gradientes de curado que generen tensiones internas remanentes, especialmente al introducir aditivos que puedan alterar la viscosidad del sistema.
2. **Superioridad mecánica de la infusión por vacío (VARTM).** La transición hacia la infusión al vacío (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) se identifica como el estándar de calidad para buques de alto rendimiento. Este proceso maximiza la fracción volumétrica de fibra y garantiza la ausencia de porosidad, permitiendo que la viga trabaje como un sólido monolítico y no como una sucesión de capas independientes.
3. **Binomio estructural: matriz-refuerzo y transferencia de carga.** Se define con precisión la jerarquía de componentes: el refuerzo (fibra) asume los esfuerzos axiales mientras la matriz (resina) garantiza la estabilidad frente al cortante. Esta distinción justifica técnicamente el uso del grafeno al 0,5% como un refuerzo específico de la fase aglutinante para mejorar la cohesión general del sistema.
4. **Eficiencia operativa y ciclo de vida (LCA).** Desde una perspectiva operativa, el uso de PRFV frente al acero se traduce en un ahorro de masa desplazada, lo que mejora la relación potencia-velocidad y reduce significativamente el consumo. Además, la eliminación de la corrosión estructural reduce drásticamente los costes de mantenimiento a largo plazo (OPEX).
5. **Arquitectura del laminado: gradientes de gramaje.** El diseño del laminado responde a una estrategia de especialización de capas. Se emplean tejidos ligeros en el skin exterior para evitar el marcado de fibra y optimizar la hidrodinámica, mientras que el núcleo estructural se compone de tejidos de alto gramaje para absorber los momentos flectores máximos.
6. **Evolución hacia la unión adhesiva estructural.** Se destaca la tendencia a sustituir la unión mecánica tradicional por adhesivos estructurales de alta tenacidad. Esto permite una transmisión de esfuerzos más fluida, eliminando los concentradores de tensiones (agujeros de pernos) que suelen ser el origen de fallos por fatiga en los materiales compuestos.

3.4.1 *Conclusión técnica de la entrevista*

La aportación de la Dirección Técnica de Rodman es fundamental para validar la verosimilitud de este estudio. Se concluye que la viabilidad del grafeno en el sector naval no depende de su capacidad teórica de refuerzo, sino de su infusionabilidad. La estructura de la viga en Doble T propuesta en este TFG es coherente con la tendencia industrial hacia la optimización de espesores mediante infusión. Sin

embargo, para que el 0,5% de grafeno sea una solución real, debe garantizar que no altera la ventana de procesabilidad de la resina. En definitiva, la ingeniería de materiales debe estar supeditada a la ingeniería de producción: el grafeno al 0,5% representa el límite máximo donde la mejora de la resistencia interlaminar no compromete la fluidez necesaria para impregnar grandes superficies de tejido, asegurando que la viga casco sea fabricable a escala industrial sin generar defectos por falta de compactación o curado heterogéneo. La transcripción de la entrevista se encuentra en el Anexo VI: entrevista al director técnico Rodman Polyships (Moaña).

3.5 Entrevista a la directora de laboratorio de Rodman Polyships

La consulta con la responsable de laboratorio y calidad de Rodman Moaña aporta una dimensión técnica esencial: el reconocimiento de que construir un buque en PRFV es, ante todo, un proceso de síntesis química industrial. En este escenario, el astillero actúa como una planta de transformación donde el material compuesto nace simultáneamente a la geometría del buque. Las aportaciones fundamentales de la dirección de laboratorio son:

1. **El astillero como centro de transformación química.** A diferencia de la construcción en acero, basada en el conformado y soldadura de un material preexistente, la fabricación en PRFV implica la creación de la fase matriz y la interfase in situ. Esta naturaleza química exige un control riguroso de las variables ambientales y de mezcla, ya que cualquier alteración en la polimerización repercute directamente en las propiedades elásticas de la viga casco.
2. **Programación de la anisotropía y refuerzos híbridos.** Se subraya que las propiedades mecánicas del laminado son direccionales. Mediante la orientación de las fibras (0° , $\pm 45^\circ$, 90°), el laboratorio diseña un material anisótropo optimizado para los gradientes de tensión calculados. La inclusión de materiales complementarios, como las aramidas (Kevlar®), permite hibridar el laminado para aumentar la tenacidad ante impactos y la resistencia al punzonamiento en zonas críticas.
3. **Gestión de la exotermia y cinética de polimerización.** El proceso de curado es una reacción exotérmica que debe ser monitorizada para evitar picos térmicos que degraden la resina o provoquen tensiones internas por contracción diferencial. La estrategia de laminado por etapas es vital para garantizar la integridad estructural; este punto es clave para la adición de grafeno, ya que el aditivo no debe alterar la ventana de gelificación ni generar una acumulación de calor que comprometa la homogeneidad de la viga.
4. **El Gelcoat: protección interfacial e hidrólisis.** Se define el gelcoat no como una pintura, sino como una barrera química integrada. Su función principal es proteger la estructura por ósmosis (degradación por absorción de agua) y del ambiente salino. Al ser parte del propio laminado, garantiza una cohesión molecular superior a la de cualquier recubrimiento añadido en materiales metálicos.
5. **Durabilidad estructural y diagnóstico de reparación.** El laboratorio destaca la superioridad del PRFV en el mantenimiento estructural, al ser inmune a la corrosión galvánica y por picaduras (*pitting*), típicas en metales como el aluminio. Además, la reparación del compuesto es directa: se basa en la restitución de la continuidad del laminado mediante parches que restablecen la transferencia de carga original, una operación que, bien ejecutada, devuelve a la viga su capacidad portante nominal.

3.5.1 Conclusión técnica de la entrevista

La visión del laboratorio de Rodman ratifica la viabilidad de la propuesta de este TFG: si el grafeno al 0,5% se integra correctamente en el protocolo químico del astillero, actuará reforzando la matriz sin interferir en la cinética de curado ni en el empape de las fibras. Esta entrevista cierra el círculo del trabajo de campo, confirmando que la mejora de la resina es el camino más directo para elevar las prestaciones de los buques de materiales compuestos sin renunciar a sus ventajas intrínsecas de mantenimiento y ligereza. Permitió una visión realista y práctica del proceso de conformado de composites. Se puede ver

la transcripción de la entrevista en el Anexo VII: entrevista a la directora del laboratorio de Rodman Polyships.

3.6 Visita a Astilleros Armón (Vigo)

La visita a las instalaciones de Armón Vigo permitió contrastar el análisis teórico con la realidad de un sistema productivo de alta complejidad y paradigma de la construcción modular. La observación in situ demuestra que la viabilidad de una solución estructural no reside únicamente en su eficiencia mecánica, sino en su convergencia con un ecosistema industrial optimizado durante décadas para el acero y las líneas de producción en bloques. En esta visita comprobamos:

1. **La lógica de producción modular y su inercia tecnológica.** Se constató que la construcción naval contemporánea se basa en la fabricación modular por bloques. Este enfoque permite el trabajo en paralelo y optimiza la trazabilidad, pero genera una fuerte inercia técnica: cualquier cambio en el material base (del acero a los composites) no es una sustitución directa, sino que exigiría el rediseño completo de la cadena de suministro, los tiempos de grada y los protocolos de ensamblaje.
2. **El acero como eje vertebrador del flujo productivo.** El astillero opera como una "máquina sincronizada" para el procesamiento de aleaciones ferrosas. El flujo productivo se sustenta en tres pilares de mecanizado automático que garantizan la precisión dimensional:
 - a. Corte CNC: sistemas de pórtico por plasma/oxicorte que minimizan el desperdicio de material.
 - b. Conformado en frío: prensas hidráulicas y Curvadora de rodillos que aprovechan la ductilidad y maleabilidad del acero para generar formas de doble curvatura.
 - c. Unión por soldadura: el proceso de ensamblaje es casi exclusivamente metálico, lo que otorga una continuidad estructural y estanqueidad inmediatas, difíciles de emular con los tiempos de curado de los materiales compuestos.
3. **Logística de grandes pesos y rigidez de manipulación.** Un aspecto crítico observado es la manipulación de bloques de gran tonelaje mediante grúas de alta capacidad. El acero ofrece una rigidez estructural intrínseca que permite el izado y transporte de estas secciones sin riesgo de deformaciones permanentes o delaminaciones, un desafío logístico que el PRFV debería resolver mediante complejos sistemas de apoyo y utillajes específicos.
4. **Design for Manufacturing (DFM) y el factor normativo.** La visita evidenció que el diseño estructural está supeditado a la fabricación (DFM). No se proyectan estructuras ideales, sino estructuras soldables, accesibles y reparables. El acero permite una versatilidad de reparación en cualquier fase de la construcción que el PRFV, dependiente de condiciones ambientales controladas para su laminado, no puede ofrecer actualmente en una grada abierta.
5. **Desafíos para la integración de composites con grafeno.** Se deduce que la introducción de PRFV dopado con grafeno en este entorno presenta una barrera de entrada cultural y técnica. La falta de compatibilidad con los procesos de soldadura y la necesidad de procesos de curado fuera del flujo principal sugieren que, hoy por hoy, su aplicación es más viable en estructuras híbridas o secundarias (superestructuras, mamparos internos o polines) que en el casco resistente de grandes unidades modulares.

En la Figura 3-1 se presenta una composición de la maquinaria de conformado y corte observada (Prensa hidráulica, Curvadoras de perfiles y CNC), subrayando la robustez de los procesos metálicos frente a la delicadeza requerida en el procesamiento de polímeros. El resto de imágenes obtenidas durante las visitas se pueden consultar en el Anexo X: imágenes obtenidas durante las visitas técnicas, de este trabajo.

3.6.1 Conclusión técnica de la visita

La experiencia en Armón Vigo confirma que el acero es el material dominante no solo por su coste, sino por su simbiosis con el método productivo. Para que el PRFV reforzado con grafeno sea una

alternativa real, debe presentarse como un material capaz de integrarse en esta lógica modular. La mejora de la rigidez que aporta el grafeno, objeto de este estudio, es un paso necesario para que los bloques de composites puedan ser manipulados y ensamblados con la misma confianza estructural que los bloques de acero, reduciendo la necesidad de refuerzos temporales durante la construcción. La maquinaria típica de los astilleros de buques de acero (Figura 3-1) requiere de máquinas de corte de elementos a), curvadora de chapas para producir las zonas de formas del buque como los elementos longitudinales con forma b) y las chapas curvas para elementos como los pantoques c) y prensas para conformado de otros elementos como pasos de cables, portillos o groeras de desagüe d).



Figura 3-1 Composición de maquinaria típica de astillero de construcción en acero.

(Fotos del autor en Astilleros Armón)/

Máquina de corte CNC tipo pórtico en Armón Vigo a). Curvadora de perfiles en el astillero Armón Vigo b). Curvadora de chapas de rodillos en el astillero Armón c). Prensa de conformado en el astillero Armón d).

3.7 Visita a Astilleros Rodman Polyships (Moaña)

La visita a Rodman Polyships permite analizar un modelo productivo donde el material compuesto no es una alternativa, sino el núcleo tecnológico del astillero. A diferencia de la construcción en acero, aquí la competitividad radica en la repetibilidad, el control químico del proceso y la optimización de pesos para embarcaciones de alta velocidad. Podemos sacar las siguientes ideas relevantes de la visita:

1. **Economía de escala y utillaje de moldeo.** La viabilidad económica en el PRFV está condicionada por la inversión en utillajes. Se observó la coexistencia de dos estrategias:
 - a. Moldes provisionales: fabricados en madera para unidades *one-off* o series cortas, priorizando el bajo coste inicial.
 - b. Moldes definitivos: estructuras reforzadas para producción seriada que permiten amortizar el coste del utillaje mediante la alta cadencia de unidades.

2. **Carácter semiartesanal y variabilidad del proceso.** A pesar de la industrialización, el factor humano sigue siendo crítico. La disposición manual de los tejidos (*hand lay-up*) y la gestión de los tiempos de impregnación introducen una variabilidad que exige un control de calidad riguroso para asegurar la homogeneidad de la viga casco.
3. **Sinergia de componentes y técnicas de conformado.** Se identificó la jerarquía mecánica del composites: la fibra como elemento portador de tensiones y la resina como matriz de transferencia. La adopción de técnicas de infusión al vacío frente al laminado manual demuestra una tendencia hacia la reducción de la fracción de vacíos y la optimización de la relación resistencia-peso.
4. **Modularidad estructural y seguridad operativa.** La capacidad de fabricar estructuras monolíticas de gran tamaño (hasta 60 metros) reduce drásticamente el número de uniones críticas. No obstante, se constató que el comportamiento frente al fuego sigue siendo el principal limitante, obligando al uso de sistemas de protección pasiva (espumas ignífugas y resinas con aditivos) en espacios de alto riesgo como la cámara de máquinas.

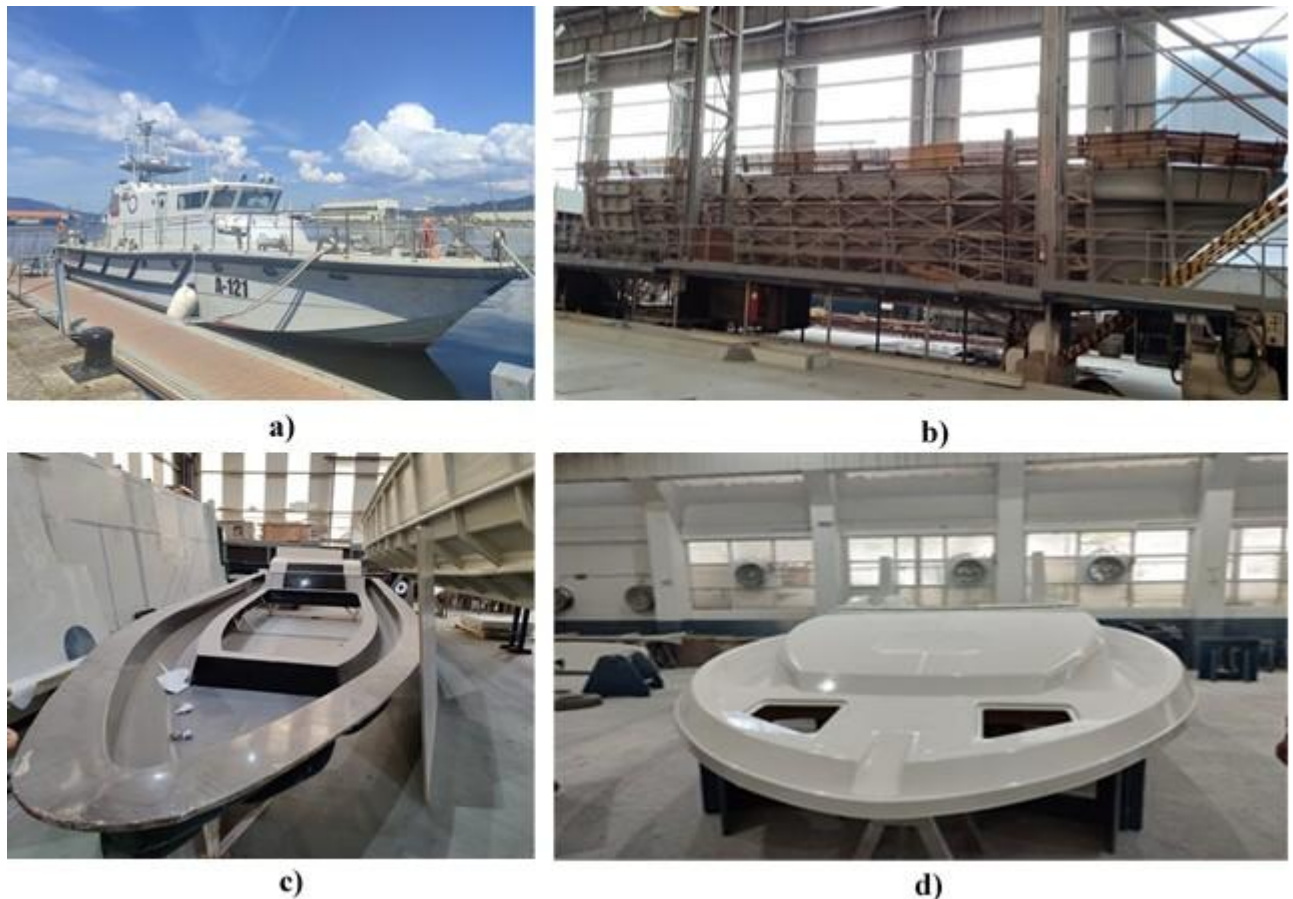


Figura 3-2 Proceso de conformado de estructuras PRFV en Rodman Polyships (I).
(Imágenes del autoría propia obtenidas en los Astilleros Rodman Polyships en Moaña)

En las composiciones de la Figura 3-2 podemos ver: a) una patrullera de serie larga de la Armada Rodman 66; b) Molde de patrullero de gran eslora (45m); c) Prototipo en moldes de madera para series cortas; d) Molde de cubierta de alta resistencia y para producción seriada larga.

La Figura 3-3 presenta: a) Sección modular para yate de gran eslora; b) Aplicación de revestimientos ignífugos en compartimentos críticos como la cámara de máquinas; c) Refuerzos de fibra de vidrio para pre-impregnación; d) Fase de matriz polimérica (resina) que junto a las fibras constituirá el material estructural.

Estas composiciones evidencian la versatilidad del PRFV para adaptarse a diferentes exigencias de diseño y escalas de producción. Mientras que el uso de moldes de madera (Fig. 3-2c) permite una respuesta ágil para prototipos y series limitadas, la estandarización en moldes de alta resistencia (Fig. 3-2d) es la que garantiza la repetibilidad dimensional, un factor crítico para asegurar que los perfiles estructurales (como los de doble T analizados en este trabajo o cuadrados) mantengan sus propiedades mecánicas constantes en toda la eslora.

Por otro lado, la integración de secciones modulares (Fig. 3-3a) y el control de la fase matriz (Fig. 3-3d y c) subrayan la importancia de la cohesión interfacial. La aplicación de revestimientos ignífugos (Fig. 3-3b) demuestra que la viabilidad de los composites en el sector naval no solo depende de su rigidez específica, sino de su capacidad para conformar un sistema estructural híbrido que cumpla con los estándares de seguridad contra incendios en espacios de alta criticidad, como la cámara de máquinas.

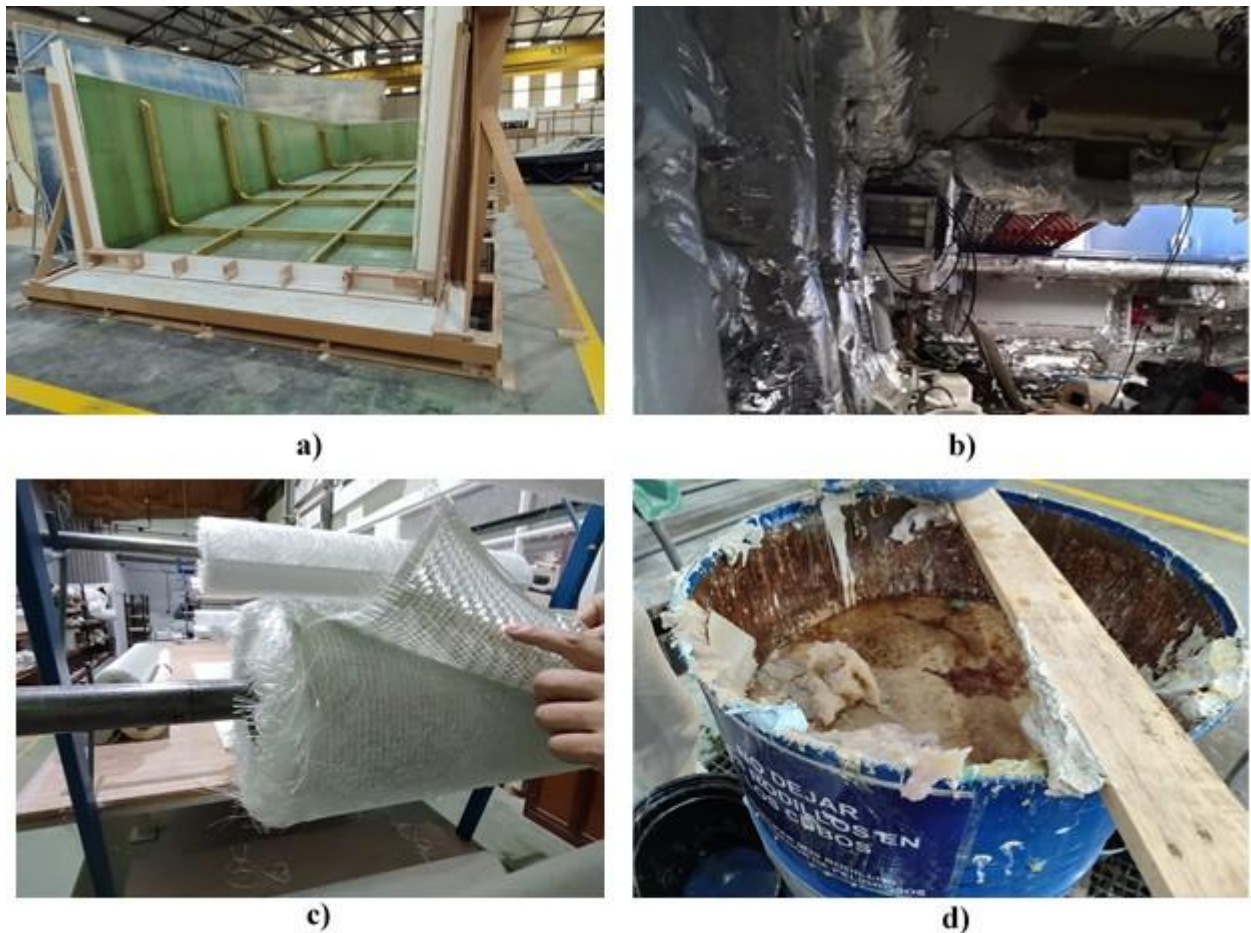


Figura 3-3 Proceso de conformado de estructuras PRFV en Rodman Polyships (II).
(Imágenes de autoría propia obtenidas en los Astilleros Rodman Polyships en Moaña)

3.7.1 Conclusión técnica de la visita a Rodman Polyships

La observación directa del modelo productivo de Rodman Moaña permite concluir que la construcción naval en PRFV ha superado la etapa artesanal para convertirse en una industria de transformación química de alta precisión. A diferencia del acero, donde la calidad es intrínseca al material suministrado, en el composite la integridad estructural de la viga se fabrica en el propio molde.

Finalizada la presentación del trabajo de campo procedemos a introducir la cuarta parte de este TFG que se corresponde con el desarrollo, se centra en el análisis mecánico comparativo del acero naval, el PRFV y este mismo compuesto dopado con grafeno. Mediante cálculos analíticos y simulación FEM, se evaluará el comportamiento de elementos estructurales estudiados. Este estudio práctico permitirá

cuantificar parámetros estructurales y contrastar las prestaciones de cada material. Con estos resultados, se fundamentará la valoración crítica sobre la viabilidad técnica de integrar estas innovaciones en el diseño y construcción de buques de guerra modernos.

4 DESARROLLO

En este capítulo se desarrolla el núcleo del trabajo, centrado en la comparación de distintos materiales aplicados a elementos representativos de un buque. Para alcanzar los fines reseñados en el apartado los objetivos, y analizar el comportamiento y las propiedades de los distintos materiales frente a esfuerzos, someteremos a estudio tres materiales: acero naval, PRFV y PRFV cargado con grafeno al en distintas proporciones. En primer lugar, se realiza un análisis mecánico clásico de la viga, empleando expresiones tradicionales para el cálculo de flechas y tensiones máximas, con el objetivo de disponer de una referencia teórica que permita contrastar el comportamiento de cada material. Este procedimiento permite evaluar y comparar la rigidez, la distribución de esfuerzos y las deformaciones obtenidas en el acero de grado A, el PRFV y el PRFV cargado con grafeno. Se examinan las posibles implicaciones de la utilización de estos materiales en el diseño estructural de un buque de guerra, teniendo en cuenta factores como la disminución de peso, el incremento de rigidez y su viabilidad técnica.

4.1 Cálculo mecánico de la viga casco de un buque

Dado que el buque puede idealizarse, a efectos de un primer análisis estructural, como una viga simplemente apoyada sometida a flexión longitudinal, se adopta en este trabajo un modelo de viga biapoyada (Figura 2-14) de longitud L , cargada en el centro por una fuerza puntual P . Esta idealización permite estudiar la respuesta estructural comparativa de los distintos materiales considerados, tanto en términos de resistencia a la rotura, como de rigidez y masa lineal.

El objetivo de este apartado es determinar, en primer lugar, la carga de límite elástico que soportaría la sección de acero de referencia y, a partir de ahí, comparar el comportamiento del PRFV base y del PRFV dopado con grafeno bajo dos hipótesis de cálculo: geometría fija y carga límite fija.

4.1.1 Secciones representativas en construcción naval

La elección del modelo de viga-casco responde a la necesidad de abstraer el comportamiento global del buque sin recurrir todavía a un modelo completo de estructura. En ingeniería naval es habitual representar el casco como una viga sometida a esfuerzos de arrufo y quebranto, identificando la cubierta y el fondo como las zonas más solicitadas y el alma como representación simplificada de los costados y elementos resistentes longitudinales, simplificaciones que se emplean en la literatura [101] [102] [103].

En este trabajo se emplean dos secciones simplificadas de uso habitual en el ámbito didáctico y proyectual: una sección cuadrada hueca y una sección doble T. Ambas permiten comparar la distribución del material, la inercia resistente y la relación resistencia-peso, ofreciendo una base adecuada para extrapolar conclusiones a elementos estructurales reales del buque.

4.1.2 Justificación de los perfiles escogidos

El modelado del casco mediante vigas sometidas a flexión longitudinal no constituye únicamente una simplificación didáctica, sino una aproximación clásica en ingeniería naval para evaluar la integridad estructural frente a los esfuerzos de arrufo y quebranto como ya hemos comentado. En esta analogía, las alas de la viga representan la cubierta y el fondo, zonas sometidas a las tensiones máximas, mientras que el alma simula el forro lateral, lo que permite identificar el comportamiento estructural primario del buque sin la complejidad computacional de un modelo completo en las fases preliminares de diseño.

La representatividad de las secciones elegidas para la viga-casco y para un perfil naval de grandes dimensiones responde a su proximidad a un casco real, al tratarse de una sección hueca de pared delgada. Del mismo modo, la sección doble T se justifica como una geometría de transición que permite comparar de forma directa la distribución de material y la inercia resistente entre el acero y los compuestos. Estas tipologías facilitan la extrapolación de resultados a elementos estructurales reales, como refuerzos longitudinales o secciones del casco, tal y como se analiza habitualmente en los proyectos de escantillonado en ingeniería naval.

El uso de modelos de viga está respaldado por la normativa de las Sociedades de Clasificación. En particular, el Reglamento NR546 de Bureau Veritas, en su Sección 2, apartado [5.2.3], establece explícitamente que determinados elementos del buque, como los flotadores en catamaranes o el casco, pueden modelarse como vigas, calculando su inercia de flexión y cortante mediante métodos analíticos. Por tanto, el enfoque adoptado es coherente con el alcance del presente TFG.

Asimismo, en la definición de los refuerzos estructurales para buques construidos bajo esta normativa, Bureau Veritas emplea secciones tipo doble T y formas cuadradas u omega, como puede comprobarse en las figuras esquemáticas utilizadas para distintos cálculos de escantillonado en el propio reglamento NR546, por ejemplo, la figura 1 de la Sección 7 [2.2.4] sobre características de los refuerzos o la figura 8 de la Sección 7 [10.1.2] sobre tensión y rigidez. En este contexto, la elección de estas secciones permite obtener conclusiones de carácter general sobre la eficiencia estructural, entendida como la relación entre carga de rotura y peso propio.

Además, los estudios técnicos realizados en este trabajo muestran que el modelo de viga-casco idealizada puede alcanzar, para el PRFV dopado con grafeno, una reducción de masa lineal del 70,8% respecto al acero, manteniendo la capacidad resistente. Esta simplificación resulta útil para valorar, como primera aproximación, si el material constituye una alternativa viable antes de pasar a diseños de detalle más complejos. De forma coherente con esta aproximación, el escantillonado completo de la viga-casco de un buque suele verificarse también considerando esta estructura como una viga simplemente apoyada [77].

4.1.3 Parámetros de diseño y metodología de cálculo

Se considera una viga biapoyada de longitud $L = 6$ m, sometida a una carga puntual centrada P , de modo que el momento flector máximo se produce en la sección media del vano. Bajo esta hipótesis, el momento flector máximo viene dado por la ecuación (4.1), es constante e igual a su valor máximo.

$$M_{\max} = P \cdot \frac{L}{4} = \quad (4.1)$$

La tensión normal máxima en la fibra más alejada del eje neutro se obtiene mediante la expresión de Navier, cuya expresión se reseña en (4.2), donde I es el momento de inercia de la sección, y la distancia desde el eje neutro hasta la fibra extrema y W el módulo resistente definido en (4.3).

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot y}{I} = \frac{M_{\max}}{W} \quad (4.2)$$

$$W = \frac{I}{y} \quad (4.3)$$

La carga límite correspondiente a la rotura por flexión se determina imponiendo que la tensión máxima iguale la tensión límite del material (límite elástico S_y en el acero dúctil; tensión de rotura σ_u en el composite frágil):(4.4).

$$\sigma_{lim} = \frac{M_{lim}}{W} \quad (4.4)$$

De donde se obtiene que el momento límite es la expresión $\sigma_{lim} \cdot W = M_{lim}$ y, en consecuencia, la carga límite aplicada en el centro del vano viene dada por la expresión (4.5).

$$P_{lim} = \frac{4 \cdot M_{lim}}{L} \quad (4.5)$$

Para cada material se realizan dos análisis complementarios para nuestro trabajo que son:

1. **Análisis A: geometría fija.** Se mantiene la misma sección transversal de referencia y se calcula la carga límite que puede soportar cada material.
2. **Análisis B: carga límite fija.** Se exige que cada material alcance la misma carga límite que el acero, determinando el espesor equivalente necesario y, a partir de él, la masa lineal resultante.

De igual forma emplearemos las propiedades mecánicas del laminado de referencia, facilitadas por Rodman Polyships y que es completamente coherente con los valores genéricos empleados por Bureau Veritas, estos valores son:

- $E = 12\,500\text{MPa}$;
- $\sigma_u = 203\text{MPa}$;
- $G_{12} = 2\,602\text{MPa}$;
- $\nu_{12} = 0,163$;
- $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$

Para cuantificar el efecto de las nanoplaquetas de grafeno (en adelante GNP) que se exponen en la Tabla 4-1 se recogen los valores que se han contrastado en la literatura consultada.

Tabla 4-1 Propiedades obtenidas en la literatura.

Material	GNP (%)	E (GPa)	σ_{lim} (MPa)	ρ (kg/m ³)	Fuente
Acero naval gradoA	—	210,00	360	7850	[104]
PRFV Rovimat 0 % GNP	0 %	12,50	203	1800	[82]
PRFV Rovimat 0,1 % GNP	0,1 %	13,43	276	1800	[105]
PRFV Rovimat 0,4 % GNP	0,4 %	13,50	276	1800	[106]
PRFV Rovimat 0,5 % GNP	0,5 %	11,03	285	1800	[105]
PRFV Rovimat 0,8 % GNP	0,8 %	10,00	248	1800	[106]
PRFV Rovimat 4,0 % GNP	4,0 %	n.d.	214	1800	[22]

Convención de cálculo: se emplea σ_{lim} como tensión de referencia. Para el acero, $\sigma_{lim} = S_y = R_e$ corresponde al límite elástico; para los materiales compuestos, $\sigma_{lim} = \sigma_u$ corresponde a la resistencia última o al inicio de fallo adoptado.

4.1.4 Viga casco sección cuadrada. (Caso I)

En este caso se considera una sección cuadrada hueca de lado exterior $b = 500\text{mm}$ y espesor de pared $t = 6\text{mm}$. Esta geometría representa una tipología simplificada pero representativa de múltiples elementos estructurales navales, tales como baos, refuerzos longitudinales, elementos de unión entre secciones o estructuras secundarias de casco. Los espesores más empleados en aceros de grado A van de 5 a 12,5 mm y las características mecánicas de la tabla se recogen de [107] [102].

La selección de un espesor de 6 mm no solo responde a su uso común en elementos secundarios y superestructuras de acero de calidad A [107], sino que representa el espesor crítico de transición en laminados de PRFV. En materiales compuestos, un espesor de 6 mm permite un curado isotérmico controlado [108], evitando picos de temperatura exérgica que podrían degradar las propiedades del grafeno al 0,5% [109]. Asimismo, mecánicamente, este espesor garantiza una relación de esbeltez local ($\frac{b}{t} \sim 83$) que asegura que el fallo de la sección se produzca por flexión global y no por abolladura local prematura de las paredes del perfil, permitiendo una comparación nítida con respecto al aporte del grafeno al módulo de elasticidad.

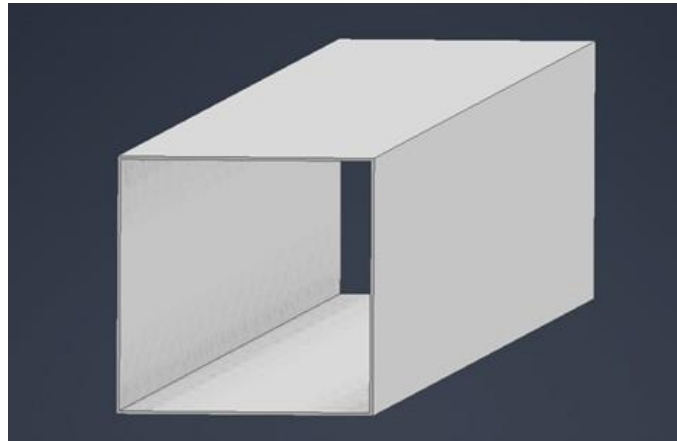


Figura 4-1 Viga-casco con forma cuadrada de 500 x 500 mm y 6 mm de espesor.
(Elaborado en Autodesk Inventor)

Usando el principio de superposición lineal, donde las propiedades de la sección hueca se obtienen restando el vacío interno del sólido externo. Comenzaremos el cálculo aplicando la expresión (4.6) para calcular la inercia de la viga previo conocimiento del área de la sección que es $A = b^2 - (b - 2t)^2$.

$$I = \frac{b^4 - (b - 2t)^4}{12} \quad (4.6)$$

El módulo resistente será por tanto $W = \frac{I}{b/2}$ y la masa lineal se calculará como $m' = A \cdot \rho$. Gráficamente podemos ver el caso planteado en la Figura 4-2

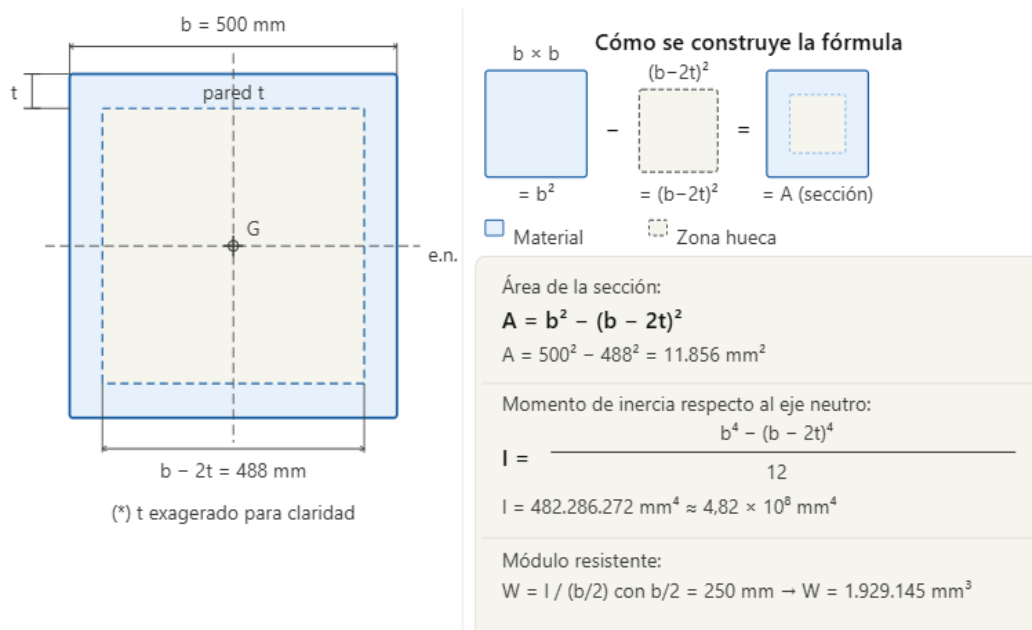


Figura 4-2 Sección cuadrada, fundamento de las fórmulas de I y A
(Elaboración propia)

Se detallan las expresiones analíticas para el cálculo del área, momento de inercia y módulo resistente, elementos base para el modelo de flexión de Navier-Bernoulli empleado en este estudio. (Elaboración propia)

Análisis A. Geometría fija: carga límite por material

Manteniendo la geometría de referencia, se calcula la carga límite asociada a cada material. En este caso, el módulo resistente es idéntico para todos los materiales y la diferencia proviene exclusivamente de la tensión última. La Tabla 4-2 recoge la carga límite, el peso y el porcentaje respecto al acero, aplicando el mismo procedimiento para cada material.

Tabla 4-2 Viga cuadrada. Análisis A: carga límite geometría fija

Material	σ_{lim} (MPa)	Mlim (kN·m)	Plim (kN)	Plim (Tn)	% peso vs Acero
Acero naval grado A	360	694,49	462,99	47,20	100,0 %
PRFV Rovimat 0 % GNP	203	391,62	261,08	26,61	56,4 %
PRFV Rovimat 0,1 % GNP	276	532,44	354,96	36,18	76,7 %
PRFV Rovimat 0,4 % GNP	276	532,44	354,96	36,18	76,7 %
PRFV Rovimat 0,5 % GNP	285	549,81	366,54	37,36	79,2 %
PRFV Rovimat 0,8 % GNP	248	478,43	318,95	32,51	68,9 %
PRFV Rovimat 4,0 % GNP	214	412,84	275,22	28,06	59,4 %

El PRFV base soporta el 56,4% de la carga del acero con un peso lineal muy inferior, mientras que el mejor resultado en resistencia se obtiene con el 0,5% de GNP. No obstante, incluso en ese caso no se alcanza la capacidad portante del acero con la misma geometría.

Análisis B. Carga límite fija: sección equivalente

En este segundo enfoque se impone que todos los materiales alcancen misma carga límite que el acero. Para ello, se determina el espesor equivalente necesario para cada material. En este caso, se busca el espesor equivalente t_{eq} tal que cumpla el momento límite del acero. El factor de escala es la relación $\alpha = \frac{\sigma_{u,acero}}{\sigma_{u,PRFV}}$. La búsqueda se realiza numéricamente mediante bisección sobre la función de inercia del material con respecto al espesor: $I(t)$ Los valores de espesor equivalente se exponen en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Viga cuadrada. Análisis B: espesor equivalente para igual carga.

Material	σ_{lim} (MPa)	t_{eq} (mm)	Área (mm ²)	Peso (kg/m)	% reducción en peso	Factor de espesor kt
Acero naval Clase A	360	6,00	11856	93,07	—	1,000
PRFV Rovimat 0 % GNP	203	10,96	21447	38,60	-58,5 %	1,773
PRFV Rovimat 0,1 % GNP	276	7,92	15583	28,05	-69,9 %	1,304
PRFV Rovimat 0,4 % GNP	276	7,92	15583	28,05	-69,9 %	1,304
PRFV Rovimat 0,5 % GNP	285	7,65	15075	27,14	-70,8 %	1,263
PRFV Rovimat 0,8 % GNP	248	8,86	17408	31,33	-66,3 %	1,452
PRFV Rovimat 4,0 % GNP	214	10,36	20296	36,53	-60,7 %	1,682

El PRFV base necesita un espesor casi doble que el del acero para igualar la carga límite, aunque su densidad menor sigue proporcionando una reducción de masa significativa. La adición de grafeno reduce

el espesor requerido, destacando el caso del 0.5% GNP como la alternativa más favorable en este conjunto de datos.

4.1.5 Viga en Doble T: caso didáctico tradicional. (Caso II)

Se analiza ahora una viga de sección doble T, adoptando una geometría típica de $H = 500\text{mm}$, $B = 300\text{mm}$, $t_f = 6\text{ mm}$ para las alas y $t_w = 12\text{ mm}$ para el alma. Se mantiene la proporción $t_w = 2t_f$ en las secciones equivalentes, con el fin de conservar la coherencia geométrica del perfil.

En la sección doble T se adopta $B=300\text{ mm}$ para mantener una proporción geométrica coherente con un perfil abierto naval de eficiencia estructural representativa. A diferencia de la sección cuadrada, donde B define directamente el ancho total de la sección, en la doble T este parámetro debe ajustarse a una geometría realista de alas y alma, evitando un sobredimensionamiento que alteraría la relación inercia y masa y desvirtuaría la comparación con el resto de alternativas analizadas en este TFG. La Figura 4-3 ilustra los parámetros y la fórmula del área de la sección.

El área de la sección en este caso vendrá dada por la expresión $A = 2Bt_f + (H - 2t_f)t_w$ de esta forma, el momento de inercia respecto del eje neutro horizontal se obtiene aplicando la expresión (4.7)

$$I = 2 \left[\frac{Bt_f^3}{12} + Bt_f \left(\frac{H}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_w (H - 2t_f)^3}{12} \quad (4.7)$$

De igual forma el módulo resistente viene de la expresión $W = \frac{I}{H/2}$ y la masa lineal se calcula nuevamente con la expresión $m' = A \cdot \rho$.

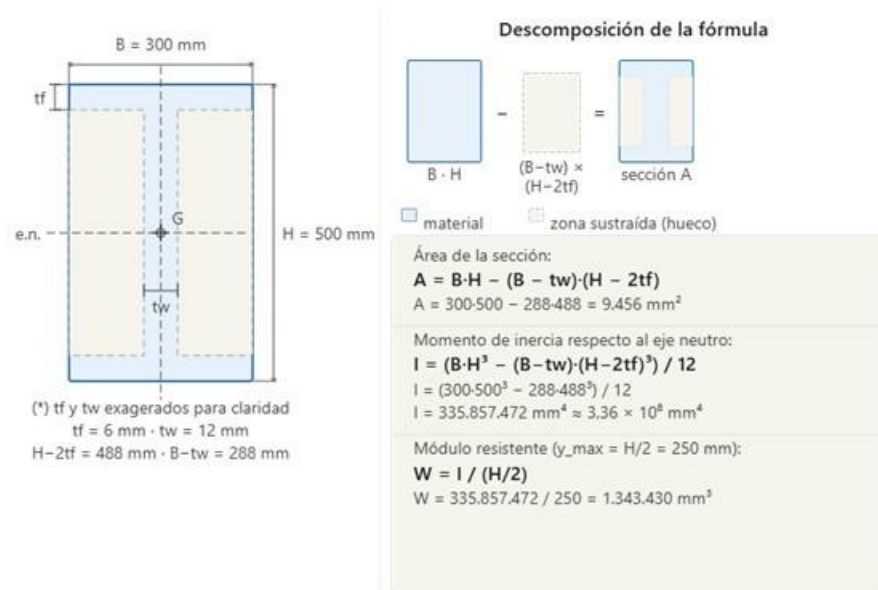


Figura 4-3 Sección doble T, fundamento de las fórmulas de I y A
(Elaboración propia)

Se detallan las expresiones analíticas para el cálculo del área, momento de inercia y módulo resistente, elementos base para el modelo de flexión de Navier-Bernoulli empleado en este estudio. (Elaboración propia)

Análisis A. Geometría fija: carga límite por material

Con la geometría de referencia constante, se obtiene la carga límite correspondiente a cada material. El comportamiento es análogo al observado en la sección cuadrada: el PRFV base alcanza aproximadamente el 56.4% de la capacidad del acero, mientras que el mejor resultado en el conjunto analizado se obtiene nuevamente con el 0.5% de GNP.

Tabla 4-4 Viga doble T. Análisis A: carga límite con geometría fija para cada material

Material	σ_{lim} (MPa)	M_{lim} (kN·m)	P_{lim} (kN)	P_{lim} (Tn)	%vs . Acero	Peso (kg/m)
Acero naval clase A	360	483,63	322,42	32,87	100,0 %	74,23
PRFV Rovimat 0% GNP	203	272,72	181,81	18,53	56,4 %	17,02
PRFV Rovimat 0,1 % GNP	276	370,79	247,19	25,20	76,7 %	17,02
PRFV Rovimat 0,4 % GNP	276	370,79	247,19	25,20	76,7 %	17,02
PRFV Rovimat 0,5 % GNP	285	382,88	255,25	26,02	79,2 %	17,02
PRFV Rovimat 0,8 % GNP	248	333,17	222,11	22,64	68,9 %	17,02
PRFV Rovimat 4,0 % GNP	214	287,49	191,66	19,54	59,4 %	17,02

Análisis B. Carga límite fija: sección equivalente

En este caso, se mantiene fija la geometría global $H = 500$ mm y $B = 300$ mm, y se ajustan los espesores t_f y $t_w = 2t_f$ para que todos los materiales alcancen la misma capacidad resistente que el acero que podemos ver en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Doble T. Análisis B: Esp. equivalente para igual carga límite

Material	σ_{lim} (MPa)	T_{feq} (mm)	T_{weq} (mm)	Área (mm ²)	Peso (kg/m)	Ahorro vs. acero	Factor de espesor kt
Acero naval clase A	360	6,00	12,00	9456	74.23	—	1,00
PRFV Rovimat 0% GNP	203	11,02	22,03	17139	30,85	-58,4 %	1,77
PRFV Rovimat 0,1 % GNP	276	7,93	15,86	12438	22,39	-69,8 %	1,30
PRFV Rovimat 0,4 % GNP	276	7,93	15,86	12438	22,39	-69,8 %	1,30
PRFV Rovimat 0,5 % GNP	285	7,67	15,33	12031	21,66	-70,8 %	1,26
PRFV Rovimat 0,8 % GNP	248	8,88	17,77	13900	25,02	-66,3 %	1,45
PRFV Rovimat 4,0 % GNP	214	10,41	20,81	16215	29,19	-60,7 %	1,68

La tendencia observada es coherente con la obtenida en la sección cuadrada. El menor espesor equivalente se alcanza de nuevo para el 0.5% de GNP, mientras que el PRFV base exige un espesor notablemente superior para igualar la carga de límite elástico del acero.

4.1.6 Interpretación técnica

Los resultados muestran que la incorporación de grafeno al PRFV mejora la capacidad resistente del material respecto al PRFV base, aunque dicha mejora no es lineal con el contenido añadido. En ambos perfiles analizados se observa que la formulación con 0.5% de GNP presenta el mejor compromiso entre resistencia de rotura y peso, mientras que contenidos superiores de grafeno no producen necesariamente mejoras adicionales. Desde el punto de vista estructural, el acero sigue ofreciendo la mayor capacidad resistente absoluta con la misma geometría, pero los composites presentan una ventaja significativa en masa. Por ello, su interés técnico no debe evaluarse únicamente términos de carga límite, sino también, en función de la reducción de peso, la resistencia a la corrosión y la posibilidad de optimizar el diseño estructural del buque. En consecuencia, este análisis permite concluir que el PRFV dopado con grafeno constituye una alternativa prometedora para aplicaciones navales en las que la ligereza y la durabilidad sean prioritarias, aunque todavía requiere una optimización geométrica y una validación experimental más extensa antes de su implantación estructural a gran escala.

4.2 Análisis comparado de los resultados FEM

La inclusión de un análisis mediante FEM en este TFG se justifica por la necesidad de realizar una validación cruzada entre los métodos analíticos tradicionales (fórmulas de Navier-Bernoulli) y una simulación numérica sencilla de los elementos considerados. Mientras que las aproximaciones analíticas son útiles para cálculos rápidos preliminares, presentan limitaciones ante geometrías complejas o materiales no homogéneos como es el caso del PRFV. El FEM permite:

1. Evaluar estados de tensión y deformación (flechas) con mayor precisión bajo cargas de escala real.
2. Modelar la heterogeneidad y anisotropía intrínseca de los materiales compuestos (PRFV), algo que el cálculo clásico simplifica en exceso.
3. Identificar zonas de concentración de esfuerzos y modos de falla específicos que podrían comprometer la integridad estructural antes de alcanzar la carga de rotura teórica.

4.2.1 Modelado de elementos en Autodesk Inventor (acero naval)

El proceso de modelado de los elementos estructurales sencillos se ha efectuado siguiendo los siguientes pasos de forma resumida para cada uno de ellos:

- A. Para el modelado de las vigas de acero naval grado A con límite elástico aproximado de 350-360 MPa, se sigue el procedimiento de creación de piezas sólidas (.ipt):
 1. Viga Cuadrada (6000 x 500 x 500 mm, espesor 6 mm)
 - a. Entorno de boceto: se inicia un archivo Normal (.ipt) y se selecciona un plano de trabajo.
 - b. Se utiliza la herramienta rectángulo por dos puntos para dibujar el perfil exterior de 500x500 mm.
 - c. Acotación: se aplica la herramienta cota general para fijar las dimensiones exactas. Se proyecta un desfase (offset) interno de 6 mm para definir el espesor de la pared.
 - d. Extrusión: Se selecciona el perfil anular resultante y se utiliza la operación Extrusión con una distancia de 6000 mm.
 - e. Material: se asignan las propiedades del acero naval al sólido para que el módulo de elasticidad y la densidad sean coherentes con el estándar industrial.
 2. Viga en Doble T (Longitud 6000 mm, alma 500 mm, alas 300 mm):
 - a. Dibujo del perfil: en un nuevo boceto, se utiliza la herramienta línea para trazar la geometría de la sección en doble T o I. El alma se define con una altura de 500 mm y las alas con un ancho de 300 mm.
 - b. Restricciones y dimensionado: se asegura la simetría del perfil y se aplican los espesores definidos (habitualmente el doble en el alma respecto a las alas para mantener la eficiencia estructural).
 - c. Generación del sólido: se aplica una extrusión de 6000 mm para completar la viga.
- B. Modelado de Vigas en PRFV (Considerando Anisotropía). El modelado del Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) es más complejo debido a que sus propiedades mecánicas son direccionales (anisótropas) y dependen de la orientación de las fibras. Debemos:
 1. Definición del material: en Inventor, no se puede tratar como un sólido isótropo simple. Es necesario definir las constantes de ingeniería (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12}) obtenidas de los ensayos o de las especificaciones del fabricante (como Rodman Polyships).
 2. Orientación de fibras: el modelo debe reflejar la disposición de las capas (laminado). Las propiedades son máximas en la dirección de la fibra, por lo que se deben configurar las orientaciones (0° , $\pm 45^\circ$, 90°) según los gradientes de tensión calculados para flexión longitudinal (arrufo y quebranto). Enfoque de modelado: se recomienda el uso de elementos tipo lámina (shell) en lugar de sólidos macizos, definiendo en cada sección el espesor equivalente necesario para igualar la rigidez del acero (por ejemplo, el PRFV base requiere ~11 mm para igualar la resistencia de 6 mm de acero).

4.2.2 *Implicaciones a nivel normativo para el modelado FEM de laminados*

El diseño y modelado FEM deben cumplir con las exigencias de las Sociedades de Clasificación, principalmente las normas IACS y reglamentos específicos como el NR546 de Bureau Veritas para cascos de materiales compuestos. Las implicaciones clave son:

1. Factores de seguridad: las normas exigen coeficientes de seguridad más elevados para compuestos que para el acero (a veces superiores a 4.0 en uniones) debido a la naturaleza de su rotura (frágil y sin aviso de fluencia).
2. Validación de resultados: sociedades como Bureau Veritas permiten explícitamente el uso de modelos de viga y análisis FEM para verificar la inercia de flexión y cortante, siempre que se basen en resultados de paneles de prueba certificados.
3. Homologación: los materiales (resinas y fibras) deben pasar por un proceso de homologación que asegure su estabilidad en ambiente marino y resistencia a la hidrólisis.
4. Criterios de fallo: a diferencia del criterio de Von Mises para metales, para los compuestos se deben aplicar criterios específicos como el de Tsai-Wu, que considera el comportamiento anisótropo del material y la interacción entre los distintos estados tensionales para predecir el inicio del fallo.

4.2.3 *Consideraciones sobre el modelado FEM*

El análisis por elementos finitos se ha planteado como herramienta de contraste respecto al cálculo analítico simplificado, con el objetivo de verificar tendencias de comportamiento estructural entre materiales y no de reproducir un dimensionamiento reglamentario completo de un buque real. Para ello, se ha modelado el elemento estructural representativo seleccionado mediante elementos de lámina, adecuados para capturar el comportamiento de estructuras de pared delgada.

En el caso del acero naval, el material se ha definido mediante un modelo elástico lineal isótropo. Para el PRFV y el PRFV dopado con grafeno, el comportamiento se ha representado mediante un laminado ortótropo equivalente, incorporando propiedades diferenciadas en las direcciones principales del material y una secuencia de apilado representativa del proceso de fabricación considerado. De este modo, se evita tratar el composite como un sólido homogéneo e isótropo, lo cual constituiría un error conceptual.

Las condiciones de contorno, el mallado y la aplicación de cargas se han definido de forma coherente con el caso estructural analizado, manteniendo el mismo escenario de sollicitación en las comparaciones entre materiales. La validación del modelo se ha realizado mediante comparación cualitativa y cuantitativa con el cálculo analítico, centrando la discusión en flecha, capacidad resistente y relación resistencia/peso.

Debe señalarse que este modelo FEM tiene carácter comparativo y preliminar. Aunque mejora la representatividad del análisis respecto a una formulación puramente isótropa, no sustituye un estudio de detalle reglamentario con laminados certificados, ensayos experimentales y validación completa frente a criterios de daño, fatiga, impacto y comportamiento al fuego.

4.2.4 *Modelado de la viga-casco de sección cuadrada*

Se procede en este apartado a modelar las vigas de sección cuadrada tanto en acero como en PRFV y PRFV cargado con grafeno. La geometría consiste en las cuatro paredes de la sección cajón, con sección transversal exterior de 500×500 mm, extruidas a lo largo de 6 000 mm de eslora.

Los paneles de los extremos longitudinales se dejan abiertos, ya que el análisis de flexión longitudinal no requiere cerrarlos para reproducir el comportamiento de viga. Se puede ver esquemáticamente en el modelo de la Figura 4-1

Se calcula el caso de la viga de acero naval de 6 mm y los casos de esa misma viga-casco en PRFV de 6 mm que permite comparar resultados a igualdad de espesor, la viga de espesor resistente equivalente con 10,9 mm de espesor y los casos de la viga cargada con grafeno.

4.2.4.1 Modelo FEM de la viga-casco sección cuadrada acero naval (6 mm)

El análisis FEM de la viga-casco de acero naval de sección cuadrada constituye la primera fase de la validación numérica. Su objetivo es doble: verificar que el modelo reproduce correctamente el comportamiento analítico de referencia, y demostrar que la carga de 463 kN calculada analíticamente corresponde al límite elástico de la sección. Los resultados de este modelo servirán de referencia para el análisis comparativo del laminado de PRFV, que se desarrollará en el apartado siguiente.

Al tratarse de un material isótropo y homogéneo, la definición del modelo es considerablemente más sencilla que la del PRFV, donde la naturaleza anisótropa del compuesto exige una caracterización capa a capa del laminado. Para el acero isótropo el modelado como sólido es perfectamente válido, a diferencia del modelo de PRFV donde será imprescindible modelar como superficie para poder definir el apilamiento de capas del laminado. Nastran malla el sólido con elementos tetraédricos parabólicos TET10 (Figura 4-4), estándar para sólidos isótropos en análisis estático lineal, con tamaño de elemento de 50 mm, resultando en 7 512 nodos y 3 875 elementos.

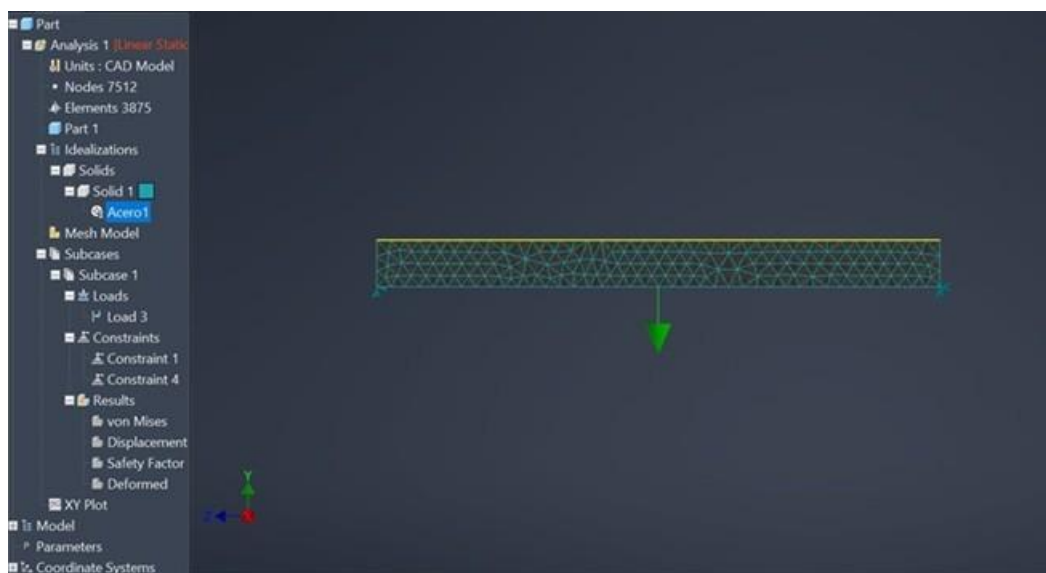


Figura 4-4 Mallado TET10 de la viga-casco de acero en Nastran In-CAD

El material se definió como isótropo (MAT1) con las propiedades del acero naval de grado A reseñados en la Tabla 4-1 (con coeficiente de Poisson de 0,3), coherentes con los valores empleados en el análisis analítico. El criterio de fallo configurado es el de Von Mises, que es el apropiado para materiales metálicos dúctiles:

Las condiciones de contorno reproducen el esquema de viga biapoyada del análisis analítico: apoyo de rodillo en el extremo A ($x = 0$ mm, translaciones UY y UZ fijas, UX libre) y apoyo de articulación en el extremo B ($x = 6\,000$ mm, las tres translaciones fijas), con todas las rotaciones libres en ambos extremos. La carga aplicada es una fuerza puntual de 463 kN en dirección vertical descendente sobre la sección central de la viga ($x = 3\,000$ mm), valor que corresponde exactamente a la carga de límite elástico calculada analíticamente.

4.2.4.2 Resistencia de la viga de acero naval de sección cuadrada (6 mm)

Se realizó un análisis estático lineal (SOL 101) con criterio de fallo de Von Mises. Los resultados se comparan con los valores analíticos evaluando la flecha máxima y el Safety Factor en la zona crítica.

Flecha máxima

El desplazamiento vertical máximo obtenido en el nodo central de la viga fue de 21,07 mm (Figura 4-5). Teniendo en cuenta los parámetros base de la Tabla 4-1 y la inercia obtenida en la ecuación (4.6), la expresión analítica para viga biapoyada con carga puntual central es el valor que sale de la expresión:

$$\delta = P \cdot L^3 / (48 \cdot E \cdot I) = 463\,000 \times 6\,000^3 / (48 \times 210\,000 \times 4,82 \times 10^8) = 20,60 \text{ mm}$$

La concordancia entre el valor FEM 21,07 mm y el analítico 20,6 mm es ajustada, con una desviación menos del 2,3% validando la correcta definición de la geometría, el material y las condiciones de contorno del modelo.

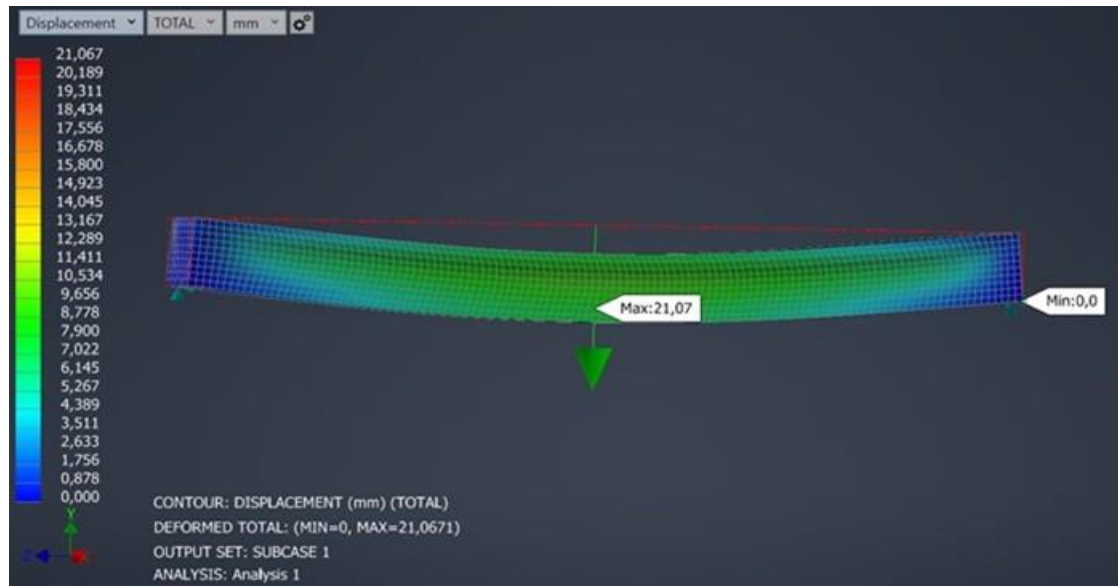


Figura 4-5 Desplazamientos (mm) en la viga-casco acero con 463 kN (sección cuadrada)

Factor de seguridad (*Safety Factor*) y tensión de Von Mises

Nastran calcula el Safety Factor (SF) como cociente entre el límite elástico (S_y) y la tensión de Von Mises en cada punto del modelo:

$$SF = S_y / \sigma_{VM} = 360 / \sigma_{VM}$$

El mapeado de SF muestra una distribución coherente con la física de la flexión pura: valores próximos a 1,0 en la fibra superior de la sección central —donde el momento flector y por tanto la tensión son máximos— y valores progresivamente mayores hacia los apoyos, donde el momento flector es nulo. Esta distribución confirma que la sección trabaja en el límite de su capacidad elástica exactamente en la zona de máxima sollicitación, validando el valor de carga de límite elástico de 463 kN.

En un modelo más detallado, estos efectos se eliminarían modelando explícitamente las superficies de apoyo. Para los fines de esta validación, dichas zonas se descartan y el análisis se centra en la región central de la viga, que es la estructuralmente relevante. En esa región, el SF (Figura 4-6) en la fibra exterior oscila entre 0,933 y 1,299 lo que corresponde a una tensión de Von Mises calculada igual a :

$$\sigma_{VM} = 360 / SF \approx 327 - 364 \text{ MPa} \approx S_y = 360 \text{ MPa}$$

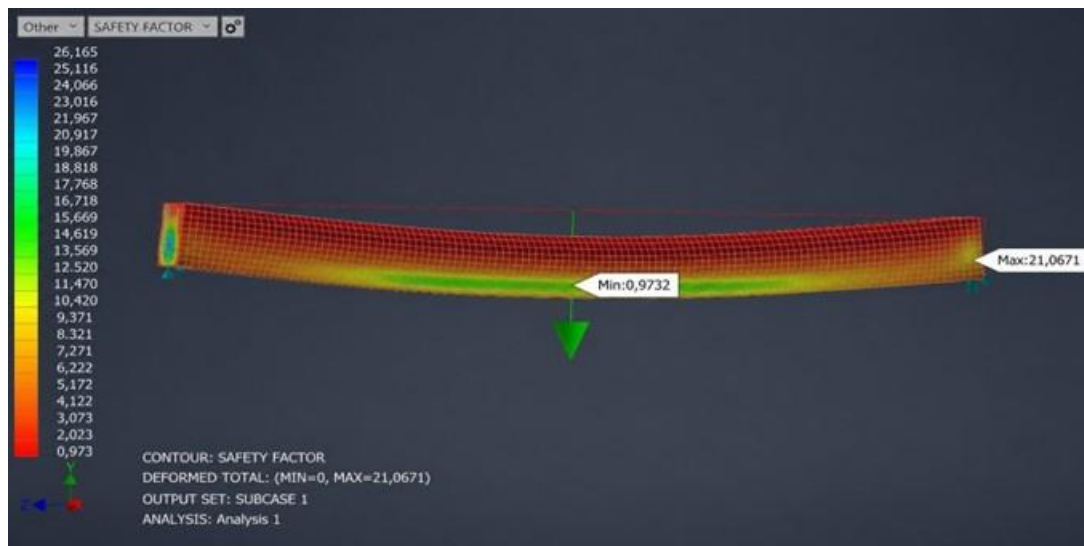


Figura 4-6 Distribución del SF $\approx 1,0$ en la fibra de máxima tracción (sección cuadrada).

La Tabla 4-6 recoge los resultados obtenidos en los dos cálculos considerados y tal y como se puede ver, los resultados del modelo FEM son coherentes con las predicciones analíticas en todos los indicadores. La flecha presenta un error del 2,3 % y el Safety Factor en la zona central ($\approx 1,0$) confirma que la sección trabaja en el límite de su capacidad elástica bajo la carga de 463 kN. Queda así validado numéricamente el valor de carga de límite elástico calculado analíticamente para la sección cajón de acero naval de grado A con espesor de 6 mm, estableciendo la referencia a partir de la cual se analiza el comportamiento del laminado de PRFV bajo las mismas condiciones.

Tabla 4-6 Comparación de resultados analíticos y FEM viga-casco acero cuadrada

Magnitud	Analítico	FEM
Flecha máxima (mm)	20,6	21,07
SF zona central (ZC)	1,0	0,97
σ_{VM} ZC (MPa)	360	371
Carga referencia (kN)	462,99	463

4.2.4.3 Modelo FEM de la viga-casco sección cuadrada en PRFV (6 mm)

La primera decisión de modelado de la viga-casco de PRFV fue considerar la viga-casco como un conjunto de superficies en lugar de como un sólido extruido. Esta elección no es arbitraria. En Nastran, las superficies se mallan con elementos tipo shell CQUAD4, que son los únicos compatibles con la tarjeta de propiedad PCOMP (apilamiento de capas de material compuesto). Si se modela la pieza como sólido, el programa genera elementos tetraédricos que tratan el material como isótropo y homogéneo, perdiendo por completo la capacidad de definir las propiedades individuales de cada capa del laminado. El modelado superficial es, por tanto, un requisito imprescindible para el análisis de estructuras de PRFV.

En cuanto a la definición del material, se crearon tres tipos con la tarjeta MAT8 (Ortotrópico 2D), que es el formato correcto para elementos shell y el único compatible con el laminado PCOMP. La tarjeta MAT9 (Ortotrópico 3D), disponible también en Nastran, está reservada para elementos sólidos y resultaría incompatible con la geometría de superficies adoptada. Las propiedades asignadas son coherentes con los valores de referencia del fabricante Rodman Polyships empleados en el análisis analítico y se expresan en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7 Propiedades mecánicas de los materiales definidos en Nastran (MAT8)

Material	$E_1=E_2$ (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	X_t/X_c (MPa)	ρ (t/mm ³)
Gelcoat	3 500	1 300	0,38	50/50	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Mat 300 g/m ²	7 000	2 800	0,32	120/120	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Tejido biaxial 0°/90° 600 g/m ²	20 000	4 500	0,13	280/200	$1,8 \cdot 10^{-9}$

La densidad se expresa en t/mm³, unidad natural del sistema mm/N/MPa de Nastran, donde 1 g/cm³ equivale a 1×10^{-9} t/mm³. Las resistencias últimas (X_t , X_c , Y_t , Y_c , S) se introdujeron como *Allowables* para habilitar el criterio de fallo de Tsai-Wu en el postproceso.

Configuración del laminado

La secuencia de apilamiento se configuró en el editor PCOMP, que permite definir orden, espesor y ángulo de orientación de cada capa de forma independiente. La secuencia adoptada para la viga-casco (correspondiente al laminado de 6 mm especificado por Rodman Polyships) es la siguiente se puede ver en Tabla 4-8.

La lógica de la secuencia responde a criterios técnicos consolidados en laminación naval. Las capas de Mat, al estar formadas por fibras cortas distribuidas aleatoriamente, presentan comportamiento en la práctica isótropo y actúan como elemento de transición entre las capas de tejido mejorando la adhesión interlaminar.

Las capas de tejido biaxial 0°/90° aportan la mayor parte de la resistencia estructural; al introducirse en Nastran (Figura 4-7) con ángulo 90°, la dirección 2 del tejido queda alineada con el eje longitudinal de la viga, que es la dirección de mayor sollicitación en flexión. La disposición alternada Mat/Biaxial produce un laminado equilibrado que minimiza los acoplamientos flexión-extensión.

Tabla 4-8 Secuencia de apilamiento del laminado PCOMP

Ply ID	Material	Espesor (mm)	Ángulo (°)	Función
1	Gelcoat	0,80	0°	Protección exterior e impermeabilidad
2	Mat 300 g/m ²	0,70	0°	Barrera anti-print-through
3	Biaxial 0°/90°	0,60	90°	Resistencia estructural
4	Mat 300 g/m ²	0,70	0°	Unión y rigidez interlaminar
5	Biaxial 0°/90°	0,60	90°	Resistencia estructural
6	Mat 300 g/m ²	0,70	0°	Unión y rigidez interlaminar
7	Biaxial 0°/90°	0,60	90°	Resistencia estructural
8	Mat 300 g/m ²	0,70	0°	Sello interior
9	Biaxial 0°/90°	0,60	90°	Resistencia estructural
TOTAL		6,00		



Figura 4-7 Configuración del laminado PCOMP en Nastran In-CAD.

Desde el punto de vista naval, esta secuencia es representativa de la práctica habitual en astilleros como Rodman Polyships para elementos estructurales de casco y superestructura. En la construcción en PRFV, el empleo de capas alternas de Mat y tejido biaxial es un estándar consolidado que permite combinar la facilidad de conformado del Mat con la eficiencia estructural del tejido, adaptándose a superficies de doble curvatura y garantizando resistencia a la degradación en ambiente marino.

Para reproducir el esquema de viga biapoyada (Figura 4-8) del análisis analítico, se definieron dos condiciones de contorno sobre las aristas transversales de cada extremo. En el extremo A ($x = 0$ mm) se restringieron los grados de libertad TY y TZ, dejando libre el desplazamiento axial TX y todas las rotaciones, reproduciendo un apoyo de rodillo. En el extremo B ($x = 6000$ mm) se restringieron los tres desplazamientos de traslación (TX, TY, TZ), reproduciendo un apoyo de articulación. Esta configuración impide el movimiento de cuerpo rígido sin introducir restricciones artificiales a la deformación axial generada por la flexión. La carga aplicada es una fuerza puntual de 463 kN en dirección vertical descendente, aplicada en la arista central de la viga ($x = 3000$ mm), valor que corresponde exactamente a la carga de límite elástico calculada analíticamente para la sección de acero de referencia reseñada en la Tabla 4-2. Cabe destacar que se toman como buenos los valores tensionales que no se ven afectados por singularidades numéricas en los apoyos.

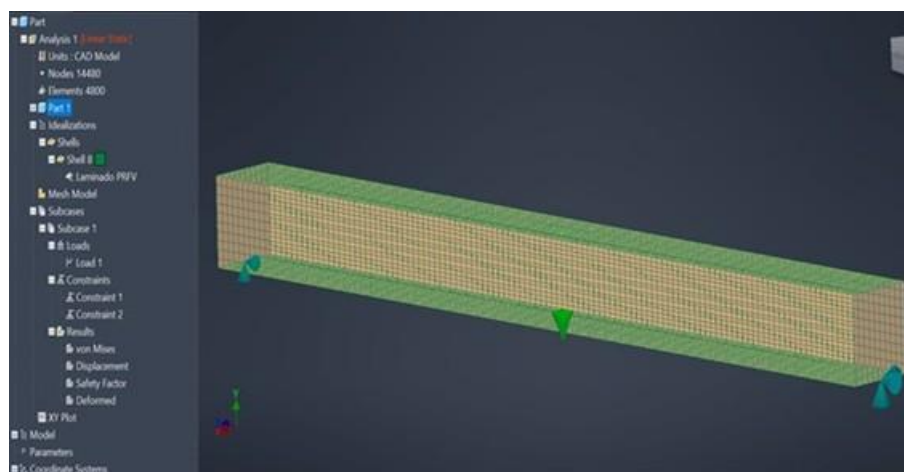


Figura 4-8 Condiciones de contorno y carga del modelo Nastran In-CAD para viga laminada.

Se realizó un análisis estático lineal con el criterio de fallo de Tsai-Wu activado en el laminado PCOMP. Los resultados se comparan a continuación con las predicciones analíticas, evaluando tres magnitudes: flecha máxima, tensión axial en fibra exterior y razón de resistencia de Tsai-Wu.

4.2.4.4 Resistencia de la viga-casco sección cuadrada de PRFV (6 mm)

Se recogen los cálculos de flecha máxima, tensión máxima axial y el criterio de fallo de Tsai-Wu propios de este tipo de estructuras en materiales compuestos.

Flecha máxima

El desplazamiento vertical máximo obtenido en el nodo central de la viga fue de 1065,18 mm. Este valor no constituye un resultado físicamente significativo, sino un artefacto del análisis estático lineal (SOL 101), que asume pequeñas deformaciones y continúa calculando desplazamientos y tensiones incluso cuando el material ya ha superado su límite de rotura.

Con una flecha equivalente a L/5,6 de la longitud total de la viga, se está claramente en régimen de grandes deformaciones, para el cual el análisis lineal no es válido. Lo que sucede es que el laminado habría colapsado estructuralmente a una fracción de la carga aplicada, mucho antes de alcanzar esa deformación. Esta limitación es inherente al tipo de análisis empleado y no invalida los resultados de tensión y de criterio de fallo, que sí son significativos en el régimen lineal previo al colapso.

Tensión axial máxima

La tensión normal máxima en dirección 2 (COMP MAX NORMAL-2 STRESS) fue de 544,6 MPa en tracción (Figura 4-9), localizada en las caras superiores de la viga. La tensión de compresión máxima (COMP MIN NORMAL-2 STRESS) resultó de -463,7 MPa (Figura 4-9), en el ala inferior central. Ambos valores superan ampliamente las resistencias últimas del material ($X_t = 280$ MPa, $X_c = 200$ MPa), lo que confirma el fallo del laminado. Al igual que la flecha, estas tensiones son consecuencia del comportamiento post-fallo de la resolución lineal y no son alcanzables físicamente; su significado es cualitativo: indican de forma inequívoca que el laminado de 6 mm es insuficiente para soportar la carga de referencia del acero. El valor analítico de referencia para la tensión máxima en la fibra exterior es:

$$\sigma_{max} = M \cdot c / I = (463000 \times 6000 / 4) \times 250 / 4,82 \times 10^8 \approx 361 \text{ MPa}$$

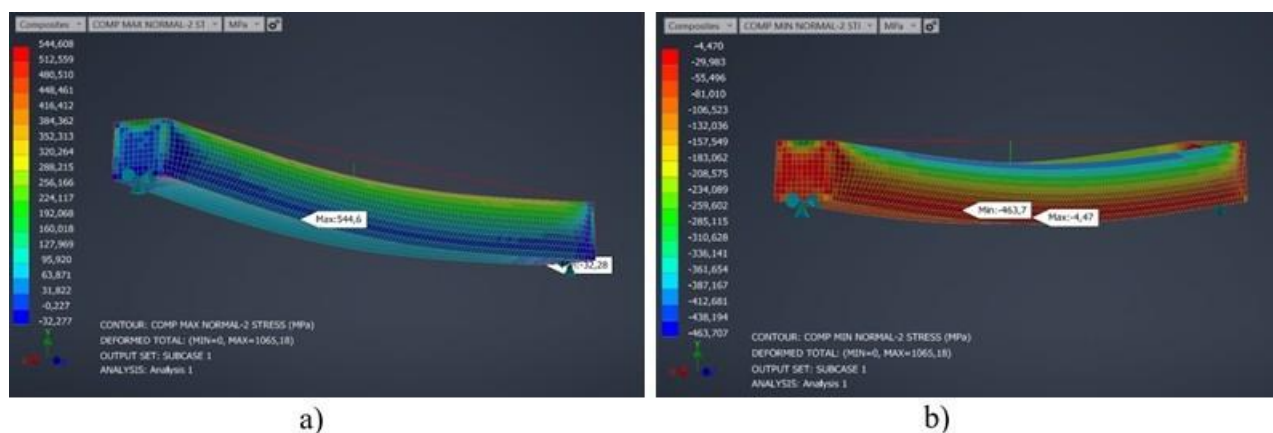


Figura 4-9 Distribución tensión normal máxima a) y mínima b) en MPa

Las tensiones FEM son superiores a este valor, lo cual es consistente. En el análisis lineal post-fallo las tensiones se magnifican artificialmente, pero el orden de magnitud confirma que la sollicitación es muy superior a la capacidad resistente del material.

Criterio de fallo de Tsai-Wu (*Strength Ratio*)

El resultado más relevante del análisis es el mapa de razón de resistencia mínima (COMP MIN STRENGTH RATIO), que muestra un valor mínimo de $SR = 0,115$ en la zona del ala inferior, con un máximo de $SR = 2,818$ en las zonas menos solicitadas. Dado que $SR < 1$ en toda la zona central de la viga, el criterio de Tsai-Wu confirma el fallo del laminado bajo la carga de 463 kN. El índice de fallo equivalente es:

$$FI = 1 / SR = 1 / 0,116 \approx 8,7$$

Este valor indica que, en el régimen lineal, la tensión aplicada es 8,7 veces la que el material puede soportar según Tsai-Wu. Aunque el valor exacto del FI no es cuantitativamente fiable más allá del inicio de fallo —dado que el análisis lineal no modela la progresiva degradación del laminado—, su significado cualitativo es claro: el PRFV de 6 mm falla bajo la carga de límite elástico del acero, validando la conclusión del análisis analítico. La distribución espacial del SR es igualmente coherente: el mínimo se localiza en el ala inferior comprimida, que es la zona de mayor sollicitación en quebranto, mientras que las zonas próximas a los apoyos presentan ratios superiores a 1,0. En la Figura 4-10 se presenta el resultado gráfico donde el $SR < 1$ confirma el fallo en el laminado de 6 mm bajo una carga de 463 kN.

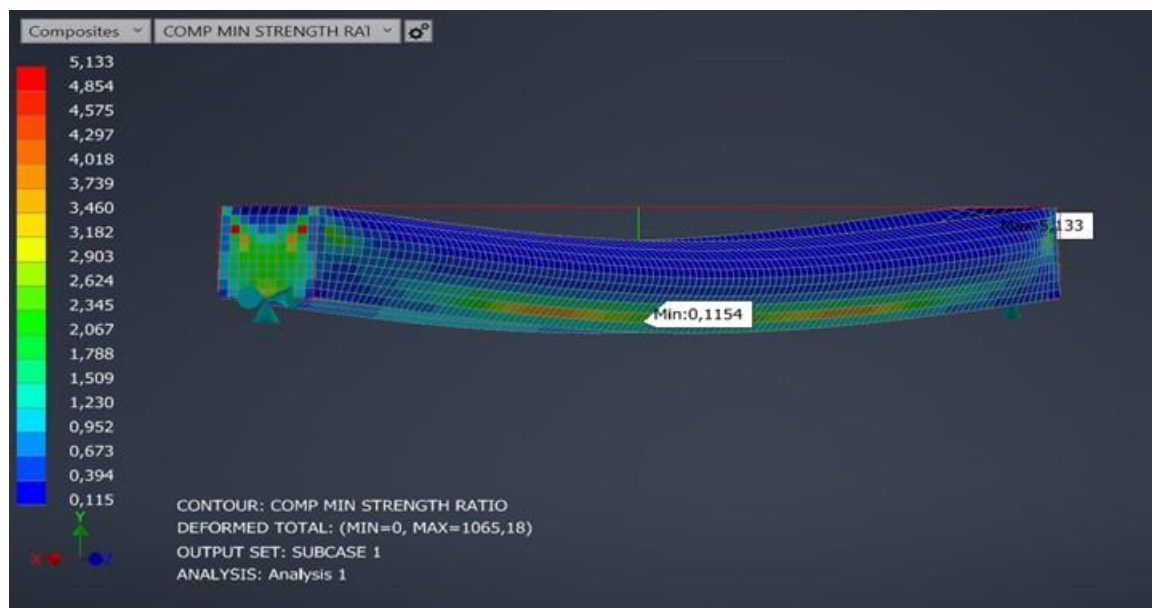


Figura 4-10 Distribución del *Strength Ratio* (SR) mínimo por capa.

El conjunto de resultados (Tabla 4-9) permite extraer una conclusión clara: el laminado de PRFV de 6 mm de espesor —idéntico al espesor de la sección de acero de referencia— no es capaz de soportar la carga de límite elástico del acero (463 kN).

El criterio de Tsai-Wu lo confirma con $SR = 0,115$, y los valores de tensión superan con amplitud los límites del material. Este resultado es plenamente coherente con el análisis analítico, que establecía la necesidad de un espesor equivalente de 10,96 mm para igualar la capacidad resistente del acero de grado A.

Tabla 4-9 Comparación de resultados analíticos y FEM para la viga de PRFV

Magnitud	Analítico	FEM	Valoración
Flecha máxima	N/A	1065,18	Fallo confirmado
Tensión tracción máxima	361 MPa	544,6	Supera $X_t = 280$ MPa → fallo
Tensión compresión máxima	-361 MPa	-463,7	Supera $X_c = 200$ MPa → fallo
SR mín. (Tsai-Wu)	Esperado <1	0,115	Fallo confirmado
Carga límite (elástica) acero	462,99 kN	463(*)	Carga de referencia

(*) Carga aplicada

4.2.4.5 Modelado FEM de la viga-casco sección cuadrada de PRFV (10,96 mm)

El análisis analítico estableció que el espesor equivalente necesario para igualar la carga de referencia definida por el límite elástico del acero es de 10,96 mm. Este apartado valida numéricamente ese resultado, comprobando que el laminado de 10,96 mm alcanza su condición de fallo bajo la misma carga de referencia. Es importante señalar que la equivalencia se establece en términos de resistencia, no de rigidez. Al ser el módulo de elasticidad del PRFV ($E = 12\,500$ MPa) muy inferior al del acero ($E = 210\,000$ MPa), la flecha bajo la misma carga será necesariamente mayor, aunque la capacidad resistente de referencia sea equivalente.

Configuración del laminado

Se emplea la misma geometría superficial y condiciones de contorno que en el análisis de 6 mm: viga-casco de 500×500 mm y 6 000 mm de eslora, con apoyo de rodillo en el extremo A, articulación en el extremo B y carga puntual de 463 kN en el centro. El único cambio respecto al modelo anterior es el laminado PCOMP (Figura 4-11), cuyo espesor total se amplía a 10,96 mm manteniendo la misma secuencia alternada de Mat y Biaxial, escalando el espesor de cada capa proporcionalmente (Tabla 4-10).

Tabla 4-10 Apilamiento del laminado equivalente PCOMP ($t = 10,96$ mm)

Ply ID	Material	Espesor (mm)	Ángulo (°)	Función
1	Gelcoat	0,80	0°	Protección exterior
2	Mat 300 g/m ²	1,26	0°	Transición/unión
3	Biaxial 0°/90°	1,08	90°	Resistencia estructural
4	Mat 300 g/m ²	1,26	0°	Transición/unión
5	Biaxial 0°/90°	1,08	90°	Resistencia estructural
6	Mat 300 g/m ²	1,26	0°	Transición/unión
7	Biaxial 0°/90°	1,08	90°	Resistencia estructural
8	Mat 300 g/m ²	1,26	0°	Transición/unión
9	Biaxial 0°/90°	1,08	90°	Resistencia estructural
10	Mat 300 g/m ²	0,80	0°	Sello interior
TOTAL		10,96	—	—

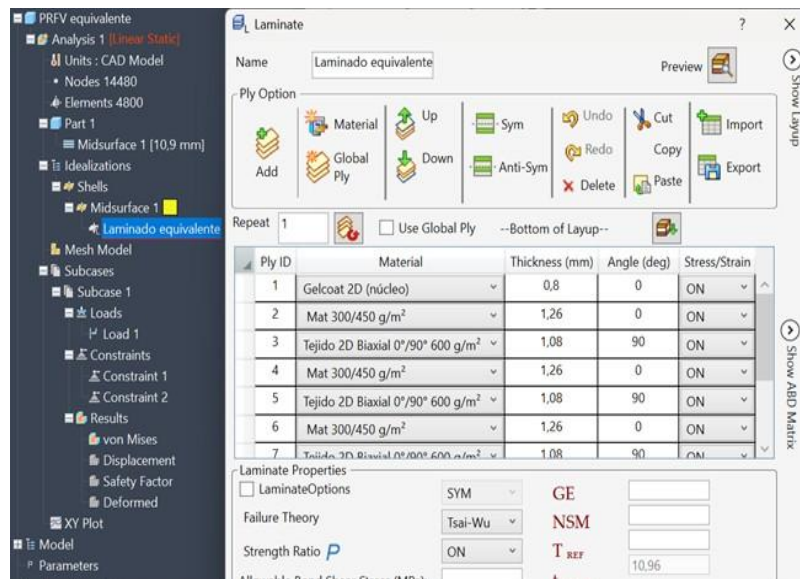


Figura 4-11 Configuración del laminado PCOMP equivalente en Nastran In-CAD

4.2.4.6 Resistencia de la viga-casco de sección cuadrada de PRFV (10,96 mm)

Se recogen los cálculos de flecha máxima, tensión máxima axial y el criterio de fallo de Tsai-Wu propios de este tipo de estructuras en materiales compuestos.

Flecha máxima

El desplazamiento vertical máximo obtenido fue de 206,3 mm. El valor analítico esperado para esta configuración es $\delta \approx 193$ mm. La desviación entre FEM (206,3 mm) y análisis analítico (193 mm) es del 6,9 %, aceptable para una validación preliminar de un modelo laminado simplificado. Como era de esperar, la flecha es muy superior a la del acero (21,07 mm), lo que refleja la menor rigidez del PRFV respecto al acero incluso con el espesor equivalente, dado que la equivalencia se estableció en términos de resistencia y no de rigidez EI. En la Figura 4-12 se reflejan las distribuciones de desplazamientos sobre la viga.

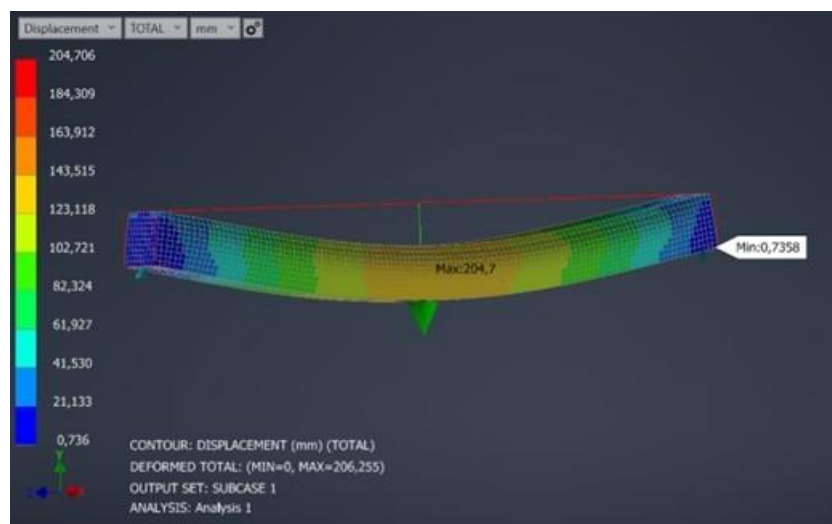


Figura 4-12 Distribución de desplazamientos PRFV con $t = 10,96$ mm. (463 kN).

Tensión máxima axial

La tensión normal máxima de tracción (COMP MAX NORMAL-2 STRESS) fue de 218,5 MPa, y la tensión de compresión máxima (COMP MIN NORMAL-2 STRESS) de -188,8 MPa. Ambos valores

son inferiores a los obtenidos con el laminado de 6 mm en régimen post-fallo (549,2 MPa y -462,7MPa respectivamente), y son del orden de la resistencia de rotura del laminado de referencia ($\sigma \approx 203$ MPa) y concuerdan con el valor analítico de flexión ($\sigma = M \cdot c / I \approx 200,7$ MPa), lo que indica que la sección trabaja justo en el entorno de su tensión de rotura. En la Figura 4-13 podemos ver la distribución de tensión normal máxima en dirección 2 (MPa) con el máximo en 218,5 MPa a) y la distribución de tensión normal mínima en dirección 2 (MPa) mínimo en -188,8 MPa, obviando las singularidades de los apoyos b).

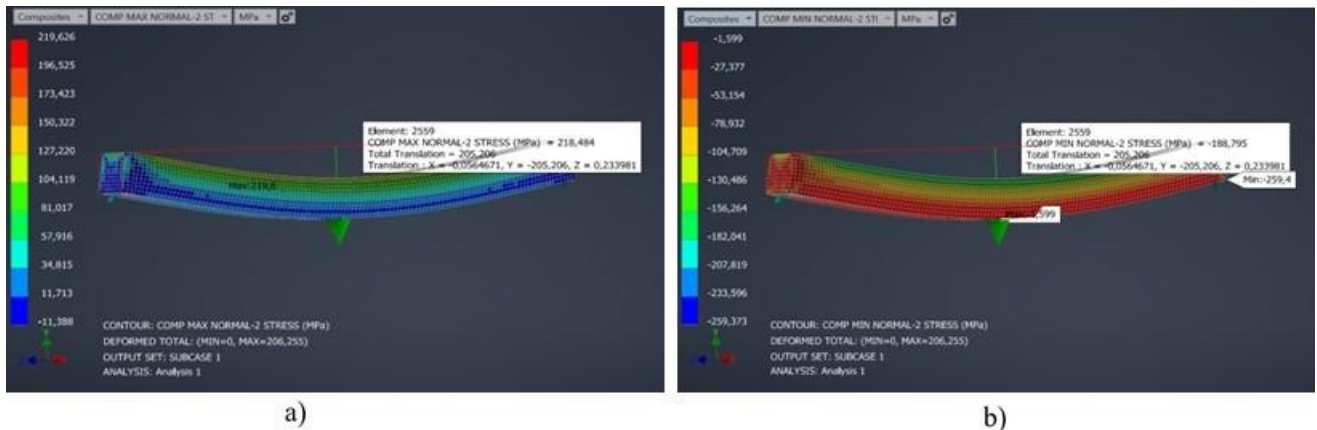


Figura 4-13 Distribución de tensión máxima a) y distribución de tensión mínima b).

Criterio de fallo de Tsai-Wu (Strength Ratio)

El mapa de razón de resistencia mínima por capa (COMP MIN STRENGTH RATIO) muestra un valor mínimo de $SR = 1,0$ en prácticamente toda la viga, con pequeñas zonas de singularidad en los apoyos que se descartan por las razones ya expuestas en apartados anteriores. $SR = 1,0$ indica que el laminado está exactamente en el límite de rotura bajo la carga de 463 kN, validando numéricamente el espesor equivalente calculado analíticamente (Figura 4-14).

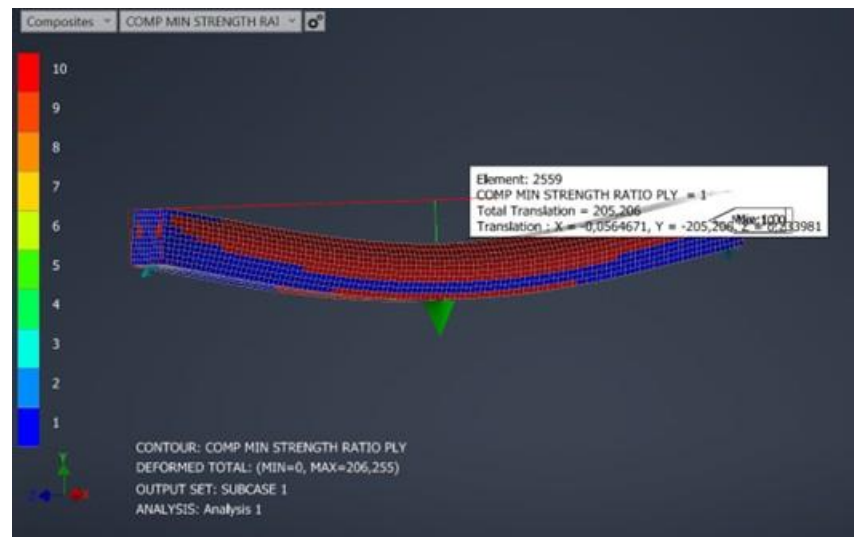


Figura 4-14 Distribución del SR mínimo por capa (criterio Tsai-Wu)

La Tabla 4-11 Comparación de resultados FEM para los tres modelos analizados recoge los datos de comportamiento de los tres modelos analizados hasta el momento. Comprobamos que el criterio de Tsai-Wu se cumple en los casos de la viga de PRFV de 10,96 mm lo que significa que el cálculo equivalente comparado con el acero es correcto.

Tabla 4-11 Comparación de resultados FEM para los tres modelos analizados

Magnitud	t = 6 mm	t = 10,96 mm	Acero (ref.)
Flecha máxima (mm)	1 065*	206,3	21,07
SR mínimo (Tsai-Wu PLY)	0,115	1,0	SF $\approx$ 1,0
σ tracción máx. (MPa)	544,6*	218,5	$\sim$ 360
σ compresión máx. (MPa)	-463,7*	-188,8	$\sim$ -360
Carga de referencia (kN)	463	463	463

*Valores no representativos que confirman el fallo

Los resultados confirman las conclusiones del análisis analítico. Con el espesor equivalente de 10,96 mm, el laminado de PRFV alcanza el límite de rotura bajo la misma carga que lleva el acero a su límite elástico, validando el valor calculado analíticamente mediante bisección numérica.

La flecha significativamente mayor (206,3 mm frente a 21,07 mm del acero) refleja la menor rigidez intrínseca del material compuesto, aspecto que el diseño estructural naval debe considerar independientemente de la capacidad resistente, y que justifica la necesidad de estudiar no solo la resistencia de rotura sino también la rigidez equivalente en cualquier sustitución de acero por PRFV en elementos estructurales del buque.

4.2.4.7 Modelado FEM de la viga-casco sección cuadrada de PRFV dopada (10,96 mm)

Se presenta a continuación el estudio de la viga de sección cuadra con el espesor equivalente del PRFV base (10,96 mm) al que se añadirá el grafeno, para cuantificar directamente la aportación intrínseca del grafeno como mejora del material.

Efecto del grafeno sobre la rigidez

Se establece que la adición de GNP al 0,5 % incrementa la resistencia de rotura del laminado de $\sigma_u = 203$ MPa a $\sigma_u = 285$ MPa (+40,4 %), pero su efecto sobre el módulo de elasticidad es marginal. Los datos de referencia muestran una ligera reducción de $E = 12,50$ GPa a $E = 11,03$ GPa para esta concentración de dopado como se ha reflejado anteriormente en la Tabla 4-14.

La ligera reducción del módulo de elasticidad con el 0,5 % de GNP es coherente con la literatura técnica en la que se refleja que en concentraciones moderadas de grafeno, las nanoplaquetas pueden generar aglomeraciones locales en la matriz que actúan como defectos, reduciendo marginalmente la rigidez, aunque mejoren notablemente la resistencia de rotura.

Este comportamiento es característico del dopado con GNP en laminados de fibra de vidrio y constituye uno de los límites prácticos del uso del grafeno como aditivo estructural. La mejora en resistencia no va acompañada de una mejora equivalente en rigidez.

El desplazamiento máximo obtenido fue de 207,1 mm, prácticamente idéntico al del PRFV base equivalente (206,3 mm). Esta coincidencia confirma cuantitativamente que, a nivel de laminado, la variación de módulo asociada al GNP es despreciable: el grafeno no modifica la rigidez del perfil, solo su margen de resistencia.

Configuración del laminado

La geometría, condiciones de contorno y carga son idénticas a las del modelo de PRFV base de 10,96 mm (Tabla 4-10). La única diferencia es la asignación del material Mat con GNP 0,5 % a las capas de Mat del laminado PCOMP, manteniendo sin cambios el Gelcoat y el tejido Biaxial. El Mat con GNP se define con $E1 = E2 = 6.900$ MPa, frente a 7.000 MPa del Mat base, por lo que su contribución a la rigidez global cambia de forma marginal; la contribución dominante continúa correspondiendo al tejido biaxial. La Tabla 4-12 recoge las propiedades empleadas para la simulación FEM bajo un modelo elástico ortótropo bidimensional.

Por su parte, los parámetros de resistencia de rotura a tracción y compresión ($X_t=X_c$) establecen los límites de tensión máxima admisibles antes de que se produzca el fallo estructural por rotura de la lámina, detallando en el tejido biaxial la pérdida de capacidad ante la compresión debida al pandeo microscópico de los filamentos. Finalmente, la resistencia al cortante (S_{12}) actúa como el indicador crítico para predecir el fallo por delaminación en el plano, determinando el umbral físico en el cual las fuerzas tangenciales superan la cohesión de la resina y provocan la separación de las capas del composite. Dichos valores (Tabla 4-12) son facilitados por Avanzare materials.

Tabla 4-12 Propiedades de los materiales para PRFV

Material	$E_1=E_2$ (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	$X_t=X_c$ (MPa)	S_{12} (MPa)
Gelcoat	3 500	1 300	0,38	50	90
Mat base	7 000	2 800	0,32	203	90
Mat GNP 0,5%	6 900	2 800	0,32	285	95
Tejido biaxial 0°/90° 600 g/m²	20 000	4 500	0,13	280/200	25

4.2.4.8 Resistencia de la viga-casco de sección cuadrada de PRFV 0.5% grafeno

Se recogen en este apartado los cálculos de flecha máxima, tensión máxima axial y el criterio de fallo de Tsai-Wu propios de este tipo de estructuras en materiales compuestos en este caso la viga cargada con grafeno al 0,5%.

Tensión máxima

La tensión normal de tracción (eje 2) fue de 218,4 MPa y la de compresión de -205,1 MPa, leídas en el centro del vano. La tensión de tracción es prácticamente coincidente con la del PRFV base de 10,96 mm (218,5 MPa); la compresión resulta algo más desfavorable por la distinta distribución de propiedades en las capas. A igual geometría y carga, la tensión de flexión permanece del mismo orden de magnitud, tal como muestra la Figura 4-15.

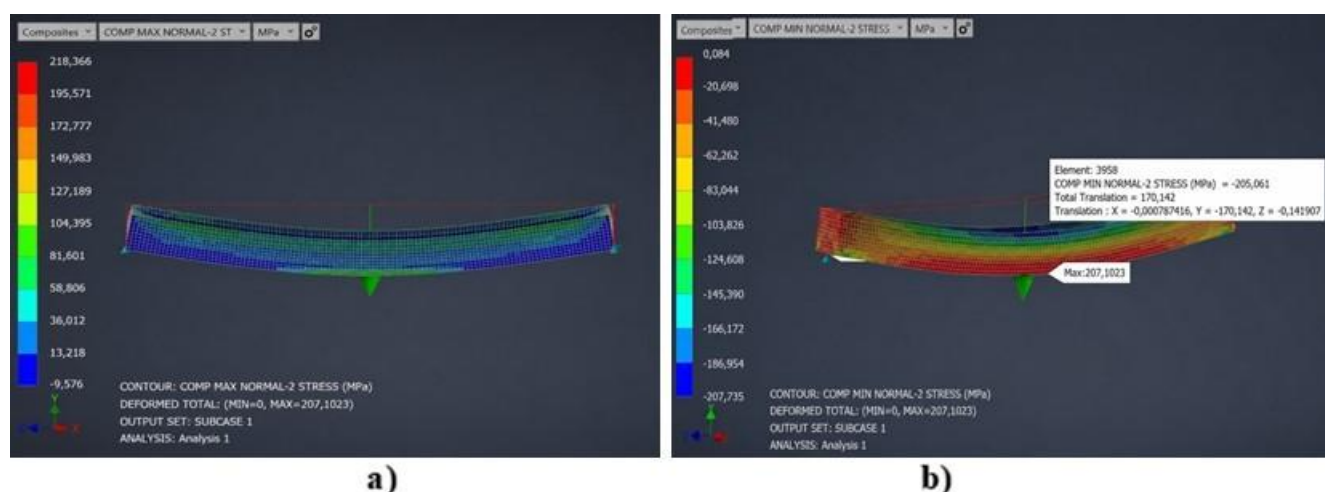


Figura 4-15 Distribución tensión máxima tracción a); distribución tensión mínima b)

Criterio de fallo de Tsai-Wu (Strength Ratio)

El resultado más significativo es el mapa de Strength Ratio mínimo por capa (COMP MIN STRENGTH RATIO PLY), que permite la comparación directa más clara entre ambos laminados. En el PRFV base de 10,96 mm, el SR PLY era igual a 1,0 en prácticamente toda la sección (todo el laminado en el límite de rotura bajo 463 kN). En el laminado con GNP, la distribución es radicalmente diferente.

La mayor parte de la sección presenta $SR \approx 10$, indicando un amplísimo margen de seguridad. Solo la franja inferior —la fibra más comprimida— muestra el valor mínimo del laminado, $SR \approx 1,4$. Esta distribución confirma que la adición de GNP desplaza el inicio de fallo hacia la zona de máxima sollicitación, dejando el 90 % restante del laminado con margen muy holgado frente a la rotura. El elemento que controla el fallo en compresión es el tejido Biaxial ($X_c = 200$ MPa), cuya resistencia no mejora con el GNP al estar dominada por la fibra de vidrio y no por la resina (Figura 4-16).

Físicamente, esto significa que bajo 463 kN el laminado dopado podría absorber una carga significativamente mayor antes de que el fallo se propagase al conjunto, estimando linealmente a partir del SR mínimo: $P \approx 1,4 \cdot 463 \text{ kN} \approx 649 \text{ kN}$.

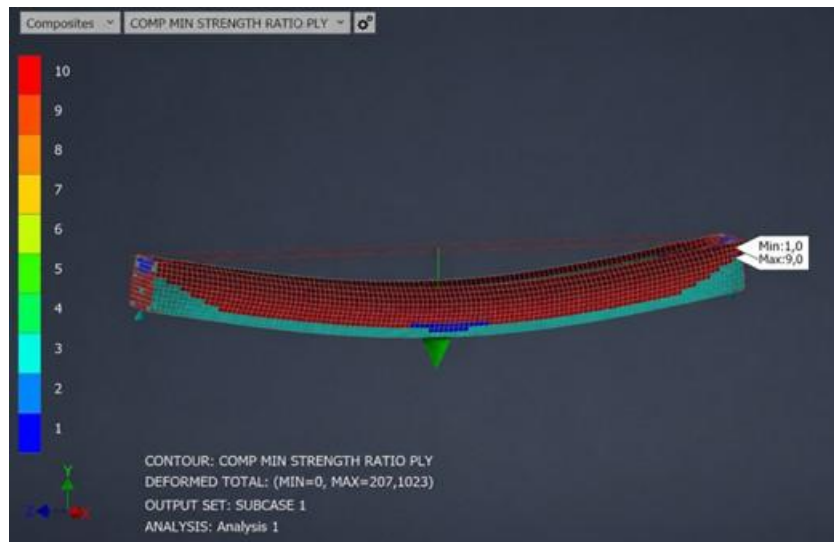


Figura 4-16 Distribución del SR mínimo por capa. PRFV+GNP, $t=10,96$ mm y 463 kN

En la Tabla 4-13 podemos ver comparativamente los resultados de la viga-casco de PRFV sin carga de grafeno y con carga de grafeno, lo cual consolida los resultados del análisis numérico comparativo entre el material compuesto convencional (PRFV base) y el modificado con nanomateriales (PRFV + 0,5% GNP), evaluados bajo un espesor constante de 10,96 mm

Tabla 4-13 Comparación directa PRFV base vs PRFV+GNP 0,5 % ($t=10,96$ mm)

* Capacidad teórica matriz

Magnitud	PRFV base	PRFV+GNP 0,5%
σ_u laminado (MPa)	203	285
E laminado (GPa)	12,50	11,03
Flecha de referencia (mm)	206,3	207, 1
SR PLY zona central	1,0	> 1
SR PLY fibra comprimida	1,0	1,4
Carga de rotura estimada	463 kN	$\approx 649 \text{ kN}^*$
Masa lineal (kg/m)	38,60	38,60

Los datos reflejan que, aunque el módulo del Mat con GNP es ligeramente inferior al del Mat base, la flecha FEM de la configuración de 10,96 mm permanece prácticamente inalterada: 207,1 mm frente a 206,3 mm del PRFV base. La principal mejora es resistente: el Mat con GNP alcanza $X_t = X_c = 285$ MPa. En esta configuración, las tensiones FEM son 218,4 MPa a tracción y $-205,1$ MPa a compresión, de modo que el dopado aporta reserva resistente en las capas de matriz sin producir una mejora apreciable de rigidez global.

Por otra parte, los índices de reserva de resistencia por capa (SR PLY) evidencian un cambio drástico en el mecanismo de fallo del perfil; mientras que el PRFV base agota de forma homogénea todo el laminado de manera simultánea ($SR = 1,0$), el dopaje con grafeno incrementa la reserva estructural hasta un factor aproximado de 10 en el 90% de la zona central, desplazando el límite crítico de fallo estrictamente hacia el tejido biaxial en la fibra comprimida ($SR = 1,4$). Como resultado directo de esta redistribución de esfuerzos, la capacidad de carga de rotura estimada de la viga-cajón se eleva de los 463 kN originales hasta alcanzar los 649 kN (un incremento neto del 40%). Todo ello se logra manteniendo una masa lineal idéntica de 38,60 kg/m en ambas alternativas, lo que valida la viabilidad del grafeno para maximizar la resistencia específica de la estructura naval sin penalizar el peso del buque

4.2.4.9 Modelo FEM de viga-casco de sección cuadrada de PRFV dopada (7,65 mm)

La hipótesis de partida se apoya en los resultados del estudio analítico que consideran que el PRFV dopado con GNP al 0,5 % presenta una resistencia de rotura significativamente mayor ($\sigma_u = 285$ MPa frente a 203 MPa del PRFV base), lo que reduce el espesor equivalente necesario a 7,65 mm. El objetivo de este análisis FEM es validar numéricamente ese resultado y evaluar el comportamiento real del laminado tanto en términos de resistencia como de rigidez y masa, aspectos que determinan su viabilidad como alternativa estructural en construcción naval. P

Dado que la resina controla la resistencia a compresión, el cortante y la tenacidad interlaminar, su mejora se traduce directamente en un aumento de la resistencia del laminado. Sin embargo, la rigidez a flexión de un laminado de fibra de vidrio está dominada casi exclusivamente por las fibras (que no cambian con la adición de grafeno) y no por la resina. Esto explica que los datos de la literatura muestren una mejora muy notable en σ_u (+40 %) con una variación marginal, o incluso ligera reducción, en el módulo de elasticidad. En la Tabla 4-14 se ven las características mecánicas, los espesores considerados, la masa lineal de cada una de las vigas modeladas que superan la sollicitación de carga de límite elástico del acero con los datos de la tabla Tabla 4-1, complementados con los datos facilitados por Avanzare Materials (Anexo IX: informe de Avanzare Materials).

Tabla 4-14 Propiedades mecánicas, espesor y masa lineal para cada material.

Material	E (GPa)	σ_{lim} (MPa)	t_{eq} (mm)	m' (kg/m)	$\Delta m'$ vs. acero
Acero naval grado A	210,0	360	6,00	93,07	—
PRFV base (0 % GNP)	12,50	203	10,96	38,60	-58,5 %
PRFV 0,5 % GNP	11,03	285	7,65	27,14	-70,8 %

La ligera reducción del módulo E con el 0,5 % de GNP respecto al PRFV base (de 12,50 a 11,03 GPa) es coherente con la literatura sobre concentraciones moderadas de GNP pueden generar aglomeraciones locales en la matriz que reducen marginalmente su rigidez, siendo la mejora en resistencia el efecto predominante a ese nivel de dopado. Esta diferencia entre resistencia y rigidez tiene consecuencias directas sobre el comportamiento estructural del laminado, como se analiza a continuación.

Reducción de peso respecto al PRFV base y al acero

Una de las ventajas más significativas del PRFV dopado con GNP al 0,5 % es la reducción de peso que permite respecto a las alternativas con igual capacidad resistente. La masa lineal de cada sección se calcula a partir del área de la sección transversal y la densidad del material $m' = A\rho$. Para la viga-casco de 500×500 mm con cada espesor equivalente, se puede consultar la masa lineal de la viga-casco para cada material con igual capacidad resistente en la Tabla 4-14.

La adición de GNP al 0,5 % permite reducir la masa lineal de 38,60 kg/m (PRFV base equivalente) a 27,14 kg/m, lo que representa una reducción adicional del 29,7 % respecto al PRFV base y del 70,8 % respecto al acero, ambos en términos de kg/m. Este valor corresponde exclusivamente al elemento estructural idealizado. Este resultado no puede trasladarse íntegramente al conjunto de una plataforma

naval, ya que una estructura real incorpora uniones, refuerzos locales, cimentaciones, zonas sometidas a requisitos de fuego, interfaces con maquinaria, elementos de rigidez global y condicionantes de fabricación que no conservan necesariamente la misma eficiencia másica. Para su extrapolación al conjunto del buque se adopta una reducción estructural global conservadora del 39%, equivalente a un factor de transferencia aproximado ligeramente superior a la mitad (0,55) sobre el potencial local, que contempla uniones, refuerzos locales, zonas no sustituidas, requisitos de rigidez global y condicionantes de fabricación y normativa y que es plenamente coherente con la literatura consultada y el trabajo de campo realizado y que responde también a las directrices de la Organización Marítima Internacional para la aprobación de soluciones equivalentes, dónde establece que la reducción de masa obtenida en un elemento idealizado no puede trasladarse automáticamente al conjunto de la plataforma sin considerar las particularidades de cada zona estructural, y propone la aplicación de un coeficiente conservador, similar al aplicado en este TFG. [28] [6] [110].

Configuración del laminado

Se emplea la misma geometría superficial, condiciones de contorno y carga (463 kN puntual en el centro) que en los modelos anteriores. El único cambio respecto al modelo de PRFV base es la definición del material de las capas de Mat, al que se asignan las propiedades del Mat dopado con GNP al 0,5 %, y el espesor total del laminado, reducido a 7,65 mm manteniendo idéntica la secuencia de apilamiento y los ángulos de orientación de las fibras. Las capas de Biaxial y el Gelcoat se mantienen sin cambios, garantizando la comparabilidad directa con el modelo de PRFV base (Tabla 4-15).

Tabla 4-15 Laminado PRFV + GNP 0,5 % (t = 7,65 mm)

Ply ID	Material	Espesor (mm)	Ángulo (°)	Función
1	Gelcoat	0,80	0°	Protección exterior
2	Mat con GNP 0,5 %	0,85	0°	Transición/unión
3	Biaxial 0°/90°	0,73	90°	Resistencia estructural
4	Mat con GNP 0,5 %	0,85	0°	Transición/unión
5	Biaxial 0°/90°	0,73	90°	Resistencia estructural
6	Mat con GNP 0,5 %	0,85	0°	Transición/unión
7	Biaxial 0°/90°	0,73	90°	Resistencia estructural
8	Mat con GNP 0,5 %	0,85	0°	Transición/unión
9	Biaxial 0°/90°	0,73	90°	Resistencia estructural
10	Mat con GNP 0,5 %	0,54	0°	Sello interior
TOTAL		7,65		

4.2.4.10 Resistencia de la viga-casco de sección cuadrada de PRFV (7,65 mm)

Se recogen en este apartado los cálculos de flecha máxima, tensión máxima axial y el criterio de fallo de Tsai-Wu propios de este tipo de estructuras en materiales compuestos.

Flecha máxima

El desplazamiento vertical máximo obtenido fue de 551,6 mm, significativamente superior al del laminado de PRFV base con espesor equivalente (206,3 mm con t = 10,96 mm). Este resultado es una consecuencia directa y físicamente correcta de dos factores que actúan simultáneamente en el mismo sentido. El menor espesor de pared (7,65 mm frente a 10,96 mm) reduce el momento de inercia de la sección, y el menor módulo de elasticidad del laminado dopado ($E = 11,03$ GPa frente a 12,50 GPa del PRFV base) reduce adicionalmente la rigidez.

Tensión máxima

La tensión normal máxima de tracción (COMP MAX NORMAL-2 STRESS) fue de 281,3 MPa y la tensión de compresión máxima (COMP MIN NORMAL-2 STRESS) de -283,3MPa, leídas en el

centro del vano. Estos valores son superiores a los del laminado de PRFV base con espesor equivalente, lo que es coherente: con menor espesor e igual carga, la tensión en la fibra exterior es mayor. Los valores obtenidos se aproximan al allowable de capa ($X_t = X_c = 285$ MPa del Mat con GNP), y al valor analítico de flexión ($\sigma = M \cdot c / I \approx 285$ MPa), lo que nos da una idea de que el laminado opera en el entorno de su tensión de rotura, siendo el criterio global de Tsai-Wu el que determina el estado de fallo del conjunto (Figura 4-17).

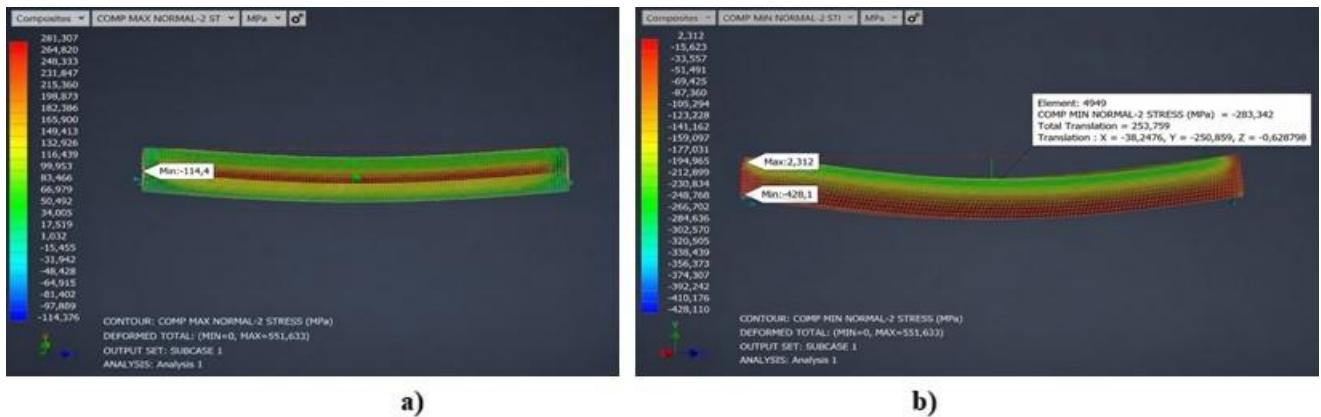


Figura 4-17 Tensión normal máxima a). Tensión normal mínima b)

Criterio de fallo de Tsai-Wu (Strength Ratio)

El mapa de razón de resistencia mínima por capa (COMP MIN STRENGTH RATIO PLY) muestra un valor mínimo de $SR = 1,0$ en toda la viga (Figura 4-18), con las singularidades habituales en apoyos descartadas por las razones ya expuestas.

Este resultado valida numéricamente que el espesor de 7,65 mm es el equivalente correcto para el laminado PRFV dopado con GNP al 0,5 %: bajo la carga de referencia definida por el límite elástico del acero (463 kN), el laminado alcanza su condición de fallo, confirmando el valor calculado analíticamente y demostrando que la adición de grafeno permite igualar la capacidad resistente de referencia con un espesor un 30,2 % menor que el PRFV base y un peso lineal un 29,7 % inferior.

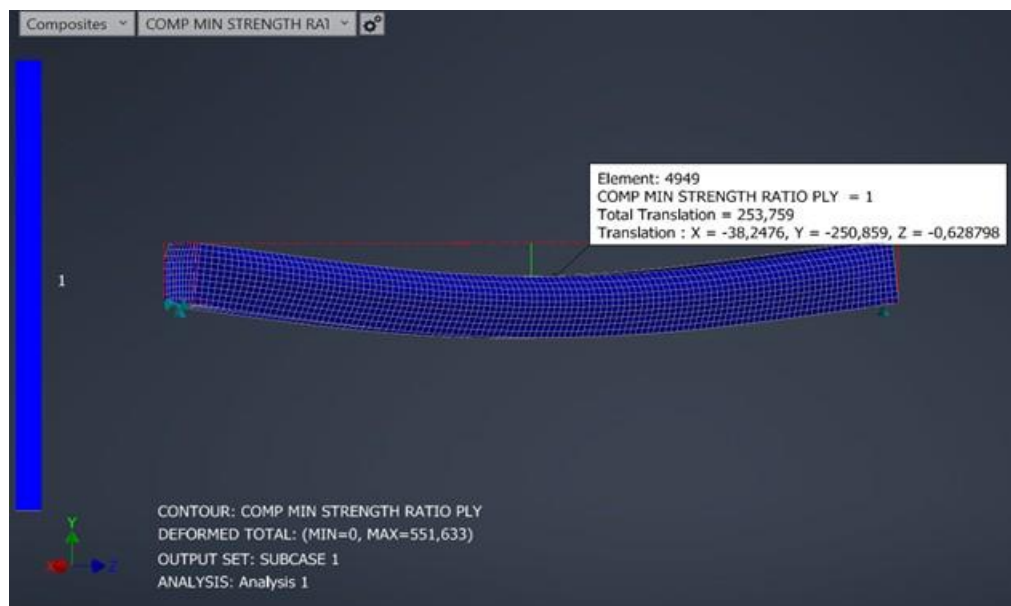


Figura 4-18 Distribución del SR mínimo por capa con carga de 0,5% de grafeno

El conjunto de estudios efectuados en 4.2.4 se resume en la Tabla 4-16 se recoge la comparación completa de los FEM analizados, incluyendo la reducción de masa respecto a cada referencia.

Tabla 4-16 Comparación de los resultados del estudio de sección cuadrada

Magnitud	Acero	PRFV	PRFV	PRFV	PRFV
		(1) *	(2)	GNP (1)	GNP (2)
Espesor (mm)	6,00	6,00	10,96	7,65	10,96
Flecha (mm)	21,07	1 065*	206,3	551,6	207,1
σ_2 tracción máx. (MPa)	~+360	+544,6*	+218,5	+281,3	+218,4
σ_2 compresión máx. (MPa)	~-360	-463,7*	-188,8	-283,3	-205,1
SR mínimo (Tsai-Wu)	0,97	0,115	1,00	1,00	1,4
Masa lineal (kg/m)	93,07	21,34	38,60	27,14	38,60
Reducción vs. acero (%)	—	-77,1	-58,5	-70,8	-58,5

* Los valores del PRFV (1) corresponden al régimen post-fallo del análisis lineal (SR = 0,116): no son físicamente alcanzables, solo indican que la sección de 6 mm es insuficiente.

Para proceder a la validación y análisis numérico global de la viga-casco de sección cuadrada, se han recopilado y estructurado los datos de partida y los resultados de las simulaciones (Tabla 4-16) que enseñan el Acero Naval frente a cuatro configuraciones diferenciadas de materiales compuestos: un primer escenario geoméricamente idéntico en composite convencional PRFV₍₁₎, un segundo escenario optimizado en espesor para cumplir criterios de seguridad elástica PRFV₍₂₎, y dos variantes adicionales dopadas con un 0,5% de nanoplaquetas de grafeno enfocadas en la optimización por espesor PRFV GNP₍₁₎ y en la optimización por rigidez estructural PRFV GNP₍₂₎.

El desglose de los datos recopilados en el desarrollo del modelo abarca magnitudes fundamentales de diseño como la deflexión máxima (flecha) en milímetros, el coeficiente de reserva mínimo calculado mediante el criterio de fallo de Tsai-Wu (*Strength Ratio*), y las tensiones máximas de tracción y compresión (σ) registradas en el software FEM. Asimismo, la tabla describe las variables físicas de la sección estructural, detallando el espesor necesario en cada configuración, la masa lineal resultante en kilogramos por metro y el porcentaje de reducción de peso tanto respecto al acero naval de referencia como respecto al composite equivalente, sirviendo como base de datos cuantitativa para la posterior discusión técnica del proyecto.

4.2.5 Modelado de la viga-casco de sección en doble T

Una vez validado el comportamiento de la viga-casco de sección cuadrada, se procede a analizar la sección en doble T definida en el apartado 4.1.5, con el objetivo de contrastar el modelo numérico frente al cálculo analítico para el caso del acero naval. Este apartado documenta el procedimiento de construcción geométrica adoptado en Autodesk Inventor Nastran In-CAD, las condiciones de contorno y carga aplicadas, y la verificación de la carga de límite elástico analítica mediante el criterio de SF.

Por conveniencia de modelado, la sección en doble T se derivó directamente de la viga-casco cuadrada del apartado 4.2.4, en lugar de crearse desde un boceto independiente. El procedimiento consistió en seccionar la viga-casco por su plano medio vertical para obtener dos perfiles en U 250 x 500 mm; al enfrenar y unir sus bordes de corte, las paredes horizontales formaron las alas de la doble T y las verticales se superpusieron para crear un alma de espesor doble (Figura 4-19).

Aunque este proceso inicial mantuvo el ancho original de $B = 500$ mm, el cálculo analítico de referencia (4.1.5) exige un ancho de ala de $B = 300$ mm para asegurar una proporción geométrica coherente con un perfil abierto naval eficiente y evitar un sobredimensionamiento. Por ello, se recortaron simétricamente ambas alas hasta los 300 mm, logrando que el modelo FEM final coincidiera exactamente con la hipótesis geométrica del cálculo analítico.

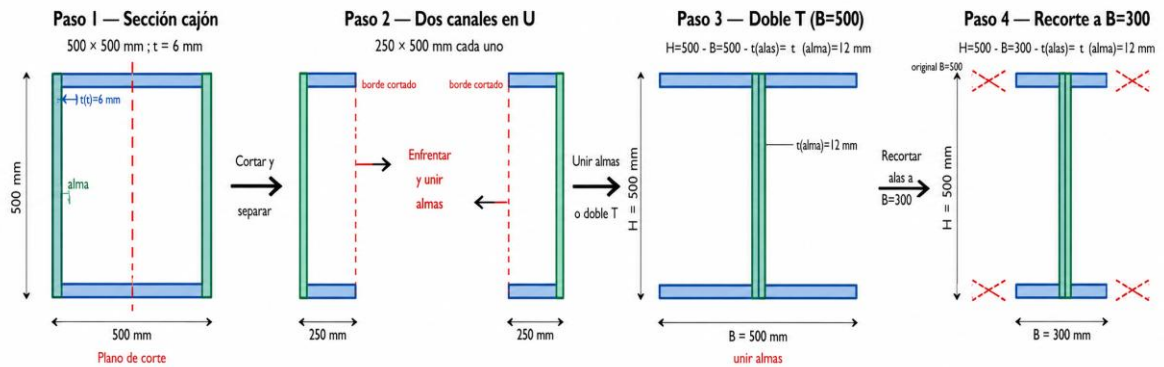


Figura 4-19 Obtención de la sección doble T a partir de la viga-casco cuadrada
(Elaboración propia)

4.2.5.1 Modelado FEM de la viga-casco en acero naval doble T

De forma análoga al modelo de la sección cuadrada, la viga de acero naval se ha modelado mediante superficies (elementos shell CQUAD4), con material isótropo lineal MAT1 (acero A, $E = 210\,000\text{ MPa}$, $\nu = 0,30$, $S_y = 360\text{ MPa}$) y criterio de fallo de Von Mises. La eslora modelada es de 6 000 mm, con condiciones de contorno de viga biapoyada: apoyo de rodillo en el extremo A (traslaciones U_Y , U_Z fijas) y apoyo de articulación en el extremo B (traslaciones U_X , U_Y , U_Z fijas), permaneciendo libres todas las rotaciones en ambos extremos.

Se aplicó una carga puntual de 322,42 kN en dirección vertical descendente sobre la sección central de la viga ($x = 3\,000\text{ mm}$), valor correspondiente a la carga de límite elástico calculada analíticamente para esta geometría en la Tabla 4-4. El análisis se resolvió mediante el solver estático lineal SOL 101.

Verificación de la carga de rotura mediante Safety Factor

El objetivo de este análisis es verificar que la carga de 322,42 kN corresponde efectivamente al límite elástico de la sección, es decir, que el Safety Factor (SF) en la zona central de la viga (donde el momento flector es máximo) es próximo a la unidad. El desplazamiento vertical máximo obtenido es de 20,8974 mm, valor de magnitud coherente con el esperado para una viga de estas características, y que se muestra en la (Figura 4-20).

Para la verificación del Safety Factor se ha consultado puntualmente el valor en un elemento situado en las fibras extremas de la sección central de la viga, lejos de las singularidades numéricas que aparecen en los apoyos y en el punto de aplicación de la carga, descartadas por las razones expuestas en el apartado 4.2.4.3. El valor obtenido en la fibra superior es $SF = 1,00466$ (Figura 4-20), prácticamente idéntico a la unidad, y en la inferior $SF = 1,3592$. El límite de rotura para la carga se confirma para 322,42 kN en la fibra superior.

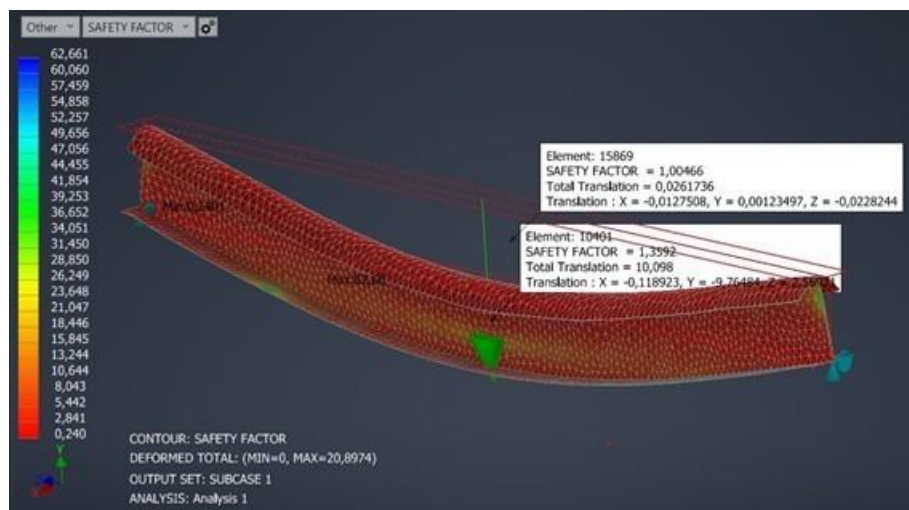


Figura 4-20 SF y flecha en la viga-casco de acero en sección doble T; SF aprox. 1 zona central

El resultado de $SF = 1,00466$ confirma, con un error inferior al 0,5 %, que la carga de 322,42 kN constituye efectivamente el límite elástico de la sección doble T de acero naval, validando numéricamente el valor obtenido por vía analítica en el apartado 4.1.5. Queda así establecida la referencia de carga límite para esta geometría,, a partir de la cual se analizará en los apartados siguientes el comportamiento de los laminados de PRFV y PRFV con grafeno bajo las mismas condiciones de contorno y carga.

Cabe destacar, como observación metodológica, que la validación solo resultó satisfactoria una vez ajustado el ancho de ala a $B = 300$ mm. Un primer modelo construido con el ancho heredado del cajón ($B = 500$ mm) arrojó un SF sensiblemente superior a la unidad en la misma carga, lo que pone de manifiesto la sensibilidad del modelo frente a este parámetro geométrico y refuerza la necesidad de mantener una correspondencia estricta entre la geometría analítica y la geometría modelada en FEM al comparar ambos métodos.

4.2.5.2 Modelado FEM de la viga-casco en PRFV (0,5 % GNP) sección doble T

Una vez validada la viga-casco de acero en sección doble T (apartado 4.2.5), se analiza el laminado de PRFV con un 0,5 % de GNP, adoptando el espesor equivalente calculado en el Análisis B (apartado 4.1.5, Tabla 4-5): $t_f = 7,67$ mm para las alas y $t_w = 15,33$ mm para el alma, conservando la geometría $H = 500$ mm, $B = 300$ mm ya validada con el acero.

A diferencia del modelo de la viga-casco (4.2.4), donde las cuatro paredes de la sección se laminaron con una secuencia única y uniforme, en la sección doble T se ha optado por definir dos laminados PCOMP independientes: uno para las alas y otro para el alma. Esta distinción introduce un criterio de diseño más refinado que el empleado en el cajón, y conviene justificar por qué se considera apropiado en este caso.

En la viga-casco, las cuatro paredes se encuentran a una distancia similar del eje neutro y la sección cerrada favorece una redistribución del esfuerzo cortante entre las cuatro caras, por lo que un laminado uniforme constituye una simplificación razonable. En la sección doble T, en cambio, la distinción entre ala y alma es estructuralmente mucho más marcada y es, de hecho, la razón de ser de este tipo de perfil: las alas, al situarse en las fibras extremas, concentran la práctica totalidad de la resistencia a flexión, mientras que el alma, próxima al eje neutro, resiste fundamentalmente el esfuerzo cortante, sin la redistribución que permite una sección cerrada. Esta diferencia de sollicitación ya se reconoce

implícitamente en la propia hipótesis analítica $t_w = 2t_f$, por lo que mantener un laminado idéntico en ambas zonas sería, en este caso, menos riguroso que distinguirlos.

Se asume, por tanto, una asimetría metodológica deliberada entre el apartado del cajón y el de la doble T: en el primero se prioriza la simplicidad de un laminado único, mientras que en el segundo se introduce el refinamiento adicional que la propia geometría abierta del perfil hace necesario.

Consecuentemente, la orientación de las capas de tejido Biaxial $0^\circ/90^\circ$ se ha definido de forma distinta en cada zona: 90° en las alas, para alinear la dirección resistente del tejido con el eje longitudinal de la viga y maximizar la resistencia a flexión; y 45° en el alma, orientación reconocida como óptima para un tejido biaxial sometido a cortante puro, al alinear las fibras con las direcciones principales de tracción y compresión que genera dicho estado tensional. La Tabla 4-17 recoge la secuencia completa de ambos laminados. El desarrollo estructural del perfil se define mediante un código de estratificación simétrico y alternado compuesto por 10 capas (*plies*), diferenciando de forma geométrica el espesor del ala y del alma. Se constata que la sección del alma duplica el espesor de cada una de las capas respecto a las alas, acumulando un espesor total de 15,33 mm frente a los 7,67 mm del ala. Este incremento responde a criterios de diseño naval para rigidizar la zona central del perfil y evitar fallos por pandeo local o cortante en el alma bajo cargas combinadas de flexión.

Tabla 4-17 Laminado de la viga PRF GNP 0,5% doble T (Esp.: espesor)

Ply	Material	Espe. ala (mm)	Esp. alma (mm)	Ángulo ala/alma
1	Gelcoat	0,80	1,60	0 / 0
2	Mat con grafeno 0,5 % GNP	0,85	1,70	0 / 0
3	Biaxial $0^\circ/90^\circ$	0,73	1,46	90 / 45
4	Mat con grafeno 0,5 % GNP	0,85	1,70	0 / 0
5	Biaxial $0^\circ/90^\circ$	0,73	1,46	90 / 45
6	Mat con grafeno 0,5 % GNP	0,85	1,70	0 / 0
7	Biaxial $0^\circ/90^\circ$	0,73	1,46	90 / 45
8	Mat con grafeno 0,5 % GNP	0,85	1,70	0 / 0
9	Biaxial $0^\circ/90^\circ$	0,73	1,46	90 / 45
10	Mat con grafeno 0,5 % GNP	0,54	1,08	0 / 0
TOTAL		7,67	15,33	—

Condiciones de contorno, carga y resultados de desplazamiento

Se mantienen las mismas condiciones de contorno y carga que en el modelo de acero: apoyo de rodillo en el extremo A, articulación en el extremo B, y carga puntual de 322,42 kN en el centro de la viga ($x = 3\,000$ mm). El análisis se resuelve mediante SOL 101, con criterio de fallo Tsai-Wu y Strength Ratio activado por capa.

El desplazamiento total máximo obtenido es de 136,398 mm, con una distribución continua y simétrica respecto al centro de la viga, coherente con el comportamiento esperado de una viga biapoyada con carga puntual centrada (Figura 4-21).

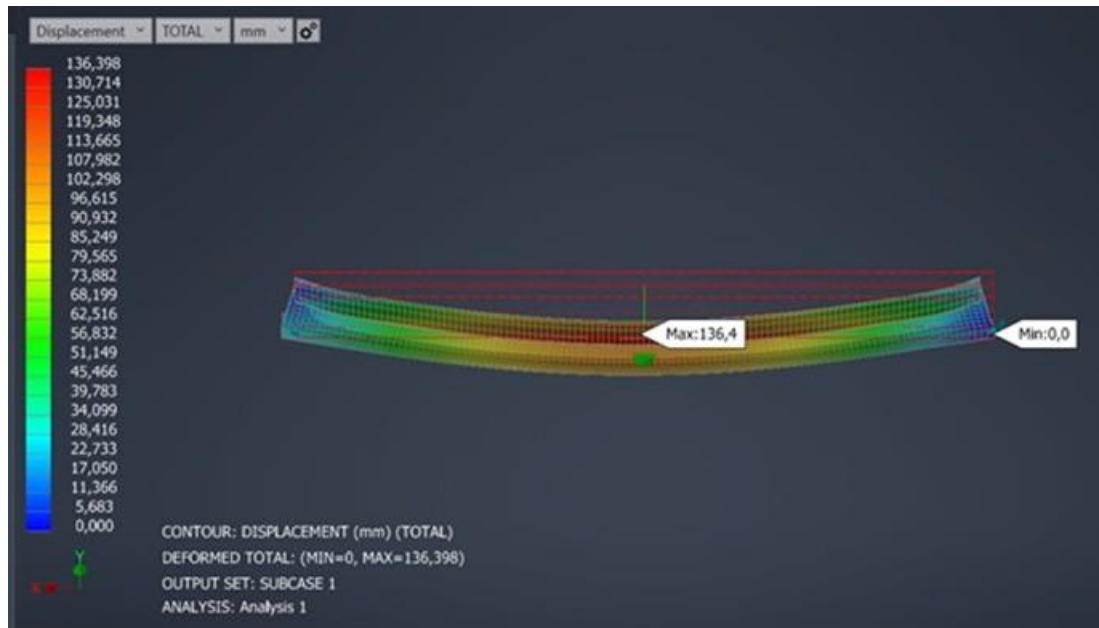


Figura 4-21 Desplazamientos en mm PRFV 0,5% GNP de doble T

Verificación del SR y mecanismo de fallo

El SR mínimo global del laminado, evaluado en la zona central de la viga y descartando las singularidades de apoyos, es $SR = 0,649$ (Figura 4-22), valor inferior a la unidad que indicaría, en una lectura estricta, el fallo del laminado completo bajo la carga de 322,42 kN — un resultado más conservador que la predicción analítica, que por construcción establece $SR = 1,0$ para esta misma carga.

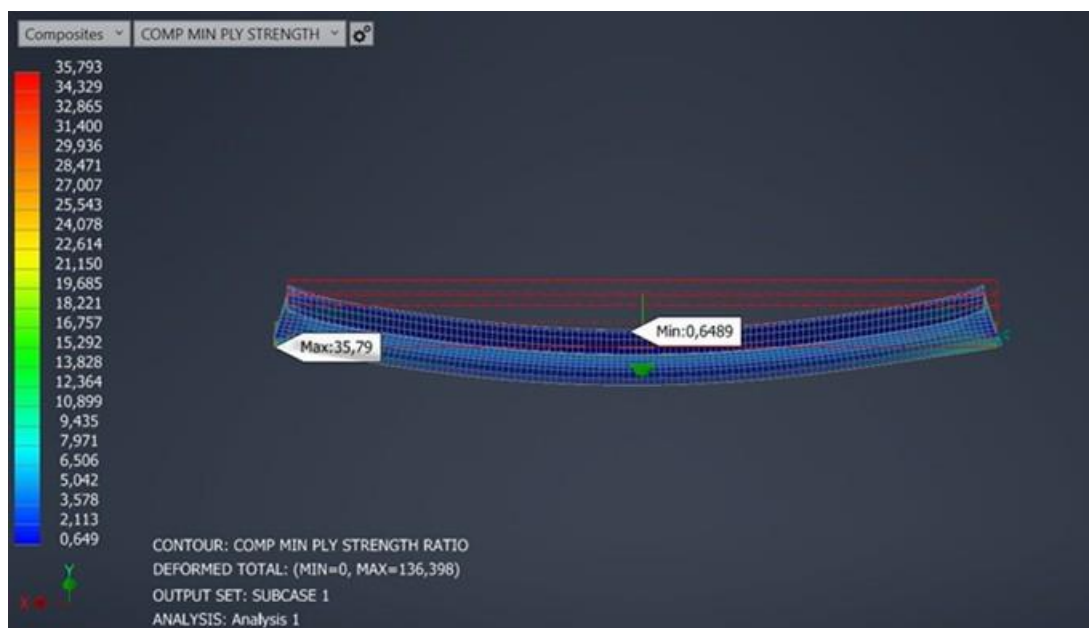


Figura 4-22 SR mínimo del laminado completo de la viga en PRFV 0,5 % GNP de doble T

Para identificar el mecanismo de fallo dominante, se ha inspeccionado el SR capa a capa en la misma zona central. Los resultados de las tres primeras se recogen en la Tabla 4-18. En conjunto, el modelo confirma que el espesor equivalente calculado analíticamente para igualar la carga de límite elástico del acero resulta insuficiente si se exige que también el Gelcoat permanezca por debajo de su límite resistente, pero resulta ampliamente suficiente (e incluso más holgado que para el acero) si el criterio de fallo se restringe, como es práctica habitual, a las capas estructurales del laminado. Esta distinción se documenta como una observación relevante para el análisis comparativo entre materiales, sin que se

haya recalculado el espesor equivalente para forzar $SR = 1,0$ en el Gelcoat, en coherencia con el tratamiento dado a discrepancias análogas en apartados anteriores de este TFG.

En consecuencia, si se adopta el criterio ingenieril que excluye el Gelcoat del análisis de fallo —por tratarse de una capa de acabado sin función estructural prevista—, el laminado de PRFV con 0,5 % de GNP resiste sobradamente la carga de 322,42 kN que define carga de límite elástico del acero en esta misma geometría, con un SR mínimo de 2,395 en las capas resistentes. Esto significa que, bajo una carga idéntica a la que agota la capacidad del acero, la sección doble T en PRFV+GNP no solo no falla, sino que conserva un margen de seguridad notablemente superior, lo que pone de manifiesto el buen comportamiento estructural de este material frente al acero naval de referencia, en línea con los resultados ya observados en la viga-casco.

Tabla 4-18 SR de cada elemento estructural del al viga PRFV-0,5% GNP, doble T

Ply	Material	SR mínimo	Valoración
1	Gelcoat	0,649	$SR < 1$ — fallo según criterio
2	Mat con grafeno 0,5 % GNP	2,395	Amplio margen de seguridad
3	Biaxial 0°/90°	$\gg 1$ (no limitante)	Sin riesgo de fallo en esta capa

4.3 Estudio económico

Con objeto de evaluar la viabilidad de la integración de materiales compuestos dopados con grafeno en plataformas navales militares, se ha desarrollado un modelo comparativo de primer orden para tres escalas representativas: una plataforma flotadora de 6 m utilizada como referencia de pequeña eslora (y paradigma de cálculos FEM), un patrullero ligero de la Guardia Civil y un Buque de Acción Marítima (BAM).

El objetivo de este análisis no es establecer una certificación industrial definitiva, sino realizar una aproximación de ingeniería preliminar que permita estudiar tendencias estructurales, energéticas y económicas derivadas de la reducción de peso estructural. Esta evaluación se encuadra en la fase de definición conceptual y viabilidad preliminar del buque, ya que permite verificar tempranamente la compatibilidad de las alternativas de diseño con las condiciones previstas de operación. Este enfoque resulta coherente con el NATO Naval Ship Code (ANEP-77), que establece un marco de aseguramiento de la seguridad aplicable al diseño, construcción y operación de buques navales, partiendo de la definición del Concept of Operations Statement (ConOpS) y de las condiciones operativas previsibles [111].

4.3.1 Definición de los casos de estudio y parámetros de diseño

El objetivo de este análisis es determinar si el sobrecoste inicial (CAPEX) derivado del empleo de PRFV dopado con grafeno se amortiza mediante el ahorro operativo (OPEX) generado por la reducción del desplazamiento y la eliminación de parte de los mantenimientos anticorrosivos durante la vida útil del buque.

Para evaluar el impacto de la nanotecnología en la Armada, no basta con analizar una sola plataforma. Siguiendo las recomendaciones de los expertos consultados, se realiza una comparativa entre un buque medio de desplazamiento como el Buque de Acción Marítima (BAM) [106], una embarcación ligera de la Guardia Civil, el Patrullero “Río Luna” [107] y una estructura tipo batea o pontón como la analizada en este TFG (4.1.4) demostrando cómo la rentabilidad del grafeno varía según la escala y la misión del buque.

El Buque de Acción Marítima (BAM) se adopta en este estudio como plataforma de referencia para el análisis de escalabilidad estructural y económica. No obstante, debe señalarse que las reglas actuales

de las principales Sociedades de Clasificación para estructuras construidas en materiales compuestos presentan limitaciones prácticas en torno a los 60 metros de eslora. Por ello, el caso del BAM se emplea como una extrapolación teórica de ingeniería preliminar, bajo la hipótesis de que la incorporación total o parcial de materiales compuestos reforzados con grafeno permita superar parcialmente las restricciones históricas asociadas a rigidez y resistencia estructural en grandes esloras.

Con objeto de facilitar el discurso matemático y la lógica del método empleados para esta valoración económica preeliminar, se explicitan los cálculos numéricos para la alternativa del BAM. Los valores de las otras dos alternativas se obtienen de manera análoga, por lo que no se reproduce íntegramente el mismo desarrollo.

4.3.2 Masa estructural y ahorro de combustible

Se calcula primeramente la reducción estructural α asociada a cada plataforma. Dicha reducción estructural surge de considerar que no todo el desplazamiento del buque corresponde al peso del casco. Este factor α , por lo general, suele disminuir a medida que aumenta la eslora, siguiendo la tendencia reseñada en la Figura 4-23 construida a partir de datos de fracción estructural/eslora, proporcionados por Astilleros Armón para buques de acero, de donde se obtienen los valores α para cada plataforma.

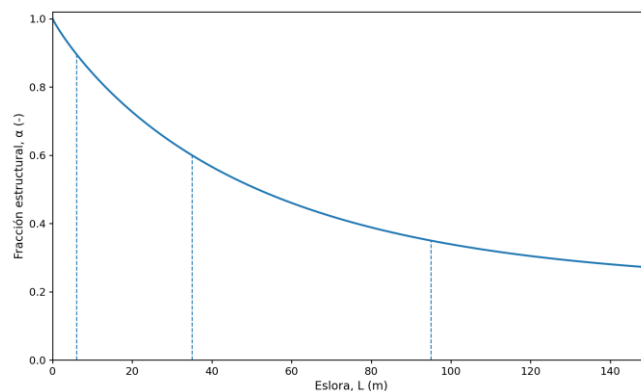


Figura 4-23 Gráfica de fracción estructural según eslora

(Imagen de elaboración propia a partir de datos discretos proporcionados por Astilleros Armón)

En la Tabla 4-19, podemos ver los parámetros dimensionales de las plataformas que vamos a contrastar, comparamos la eslora, los desplazamientos y las masas de acero con las reducciones en peso de las estructuras construidas en PRFV con grafeno tomada del estudio previo de comparación de las estructuras consideradas como ejemplo en este TFG.

Tabla 4-19 Tabla de parámetros de las plataformas consideradas

<i>Parámetro</i>	<i>Flotador</i>	<i>Patrullero</i>	<i>BAM</i>
<i>Eslora L</i>	6 m	35 m	94 m
<i>Desplazamiento Δ</i>	0,6 t	130 t	2.623 t
<i>Fracción estructural α</i>	1,00	0,60	0,35

Para aplicar el ahorro en materiales de las alternativas, es preciso tener en cuenta la reducción de peso de las plataformas de PRFV+GNP frente al acero. Se aplica el factor s obtenido en los cálculos del apartado 4.2.4, donde calculamos que la viga-casco de PRFV +0,5% reduce su masa efectiva en un 39% respecto a la viga-casco de acero. La masa estructural del casco en acero (W_{acero}) y la masa equivalente en PRFV+GNP ($W_{PRFV+GNP}$) se obtienen entonces aplicando las dos reducciones con las expresiones siguientes:

$$W_{acero} = \alpha \cdot \Delta \quad (4.8)$$

$$W_{PRFV+GNP} = \alpha \cdot \Delta \cdot (1 - s) \quad (4.9)$$

Para el BAM, la sustitución se calcula con los valores numéricos siguientes:

$$W_s = 0,35 \cdot 2.623 \text{ t} = 918,05 \text{ t}$$

$$W_{PRFV+GNP} = 918,05 \text{ t} \cdot (1 - 0,39) = 560,01 \text{ t}$$

El desplazamiento nuevo de la alternativa de PRFV con grafeno se obtiene restando la masa ahorrada al desplazamiento de referencia. Esta reducción de desplazamiento se usará para estimar el efecto propulsivo.

$$\Delta_{nuevo} = 2.623 \text{ t} - (918,05 \text{ t} - 560,01 \text{ t}) = 2.264,96 \text{ t}$$

Para relacionar el cambio de desplazamiento con el ahorro propulsivo consecuente, se emplea la Ley del Almirantazgo, en su forma de comparación a velocidad constante [112]. El resultado se interpreta como una referencia teórica y se redondea a un valor aplicado conservador.

$$r_{Alm} = 1 - \left(\frac{\Delta_{nuevo}}{\Delta} \right)^{2/3} \quad (4.10)$$

El valor r_{Alm} , dará cuenta del porcentaje de ahorro de combustible de un buque de menor desplazamiento (PRFV+GNP) frente al mismo buque con el desplazamiento original (buque de acero). En todos los casos, se redondeará a un valor conservador de ahorro de combustible a partir del valor obtenido por la fórmula del almirantazgo.

Para el BAM se mantiene un 8 % de ahorro aplicado, menor que el 9,32 % estimado por la misma expresión, con el fin de no trasladar íntegramente al ahorro de combustible el resultado de una correlación simplificada:

$$r_{Alm_{BAM}} = 1 - \left(\frac{2.264,96 \text{ t}}{2.623 \text{ t}} \right)^{2/3} = 0,0932 = 9,32 \% \rightarrow 8 \% \text{ aplicado}$$

Tabla 4-20 . Resultado estructural y ahorro propulsivo adoptado

Plataforma	Masa acero	Masa PRFV+GNP	Masa ahorrada	Δ nuevo	r_{Alm}	Ahorro conservador aplicado (r)
Flotador de 6 m	0,60 t	0,37 t	0,23 t	0,37 t	28,07 %	15 %
Patrullero de 35 m	78,00 t	47,58 t	30,42 t	99,58 t	16,28 %	15 %
BAM de 94 m	918,05 t	560,01 t	358,04 t	2.264,9 t	9,32 %	8 %

4.3.3 Consumo de combustible y superficie mojada

La Tabla 4-21 recoge las horas de navegación, así como los consumos medios de las plataformas a analizar. Estos valores fueron obtenidos por el autor en los cuadernos de bitácoras del Río Luna (basado en la ENM) y del BAM Tornado (basado en las Palmas de Gran Canaria) [113] [114]. Se tratan de valores de tiempo de navegación medios en el último año y valores de consumo a velocidad de crucero. Para el valor del flotador, se hace una estimación de orden de magnitud basada en los otros dos valores conocidos.

Tabla 4-21 Consumos y horas de navegación de las plataformas

Plataforma	q adoptado	h adoptadas
Flotador de 6 m	0,004 t/h	400 h/año
Patrullero de 35 m	0,200 t/h	2.000 h/año
BAM de 94 m	0,600 t/h	3.500 h/año

El ahorro anticorrosivo se calcula sobre la superficie mojada de la plataforma (WSA). Para el patrullero y el BAM se aplica la fórmula empírica de Froude, que requiere el volumen desplazado ∇ y la eslora en flotación [115]. Al no disponer de dicha eslora, se adopta eslora de flotación $\approx$ eslora máxima. El volumen se aproxima como $\nabla = \Delta/1,025$, tomando $1,025 \text{ t/m}^3$ como densidad de agua de mar

$$WSA = \nabla^{2/3} \cdot \left(3,4 + \frac{LWL}{2 \cdot \nabla^{1/3}}\right) \quad (4.11)$$

Para el BAM:

$$\begin{aligned} \nabla &= 2.623 \text{ t} / 1,025 \text{ t/m}^3 = 2.559,02 \text{ m}^3 \\ WSA &= 2.559,02 \text{ m}^{2/3} \cdot \left(3,4 + \frac{94 \text{ m}}{2 \cdot 2.559,02 \text{ m}^{1/3}}\right) = 1.278,97 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Para el flotador auxiliar se adopta $WSA = 12,5 \text{ m}^2$, en lugar de emplearse la fórmula de Froude porque una plataforma de 6 m puede operar en régimen semiplaneador y el resultado sería poco representativo. El valor se adopta como estimación conservadora a partir de los datos publicados de WSA para embarcaciones ligeras de 4-6 m en el informe neerlandés citado sobre superficies mojadas. [115].

Tabla 4-22 Areas mojadas (WSA) de cada plataforma

Plataforma	WSA empleada
Flotador auxiliar de 6 m	12,50 m ²
Patrullero de 35 m	173,75 m ²
BAM de 94 m	1.278,97 m ²

4.3.4 Modelo económico simplificado

Para calcular los periodos de retorno que garantizan la amortización de las alternativas, es preciso obtener dos valores económicos: el sobre coste inicial en euros que conlleva la alternativa de PRFV con grafeno frente al acero, que será la diferencia de gastos de capital de las dos alternativas o ΔCAPEX (Diferencia de *Capital Expenditure*) y el ahorro anual en euros/año que conllevan esas mismas alternativas respecto a la opción referencia de acero, que es la diferencia entre los gastos operativos a lo largo de la vida útil de la plataforma o ΔOPEX (Diferencia de *Operational Expenditure*).

Con estos dos valores económicos se puede calcular el periodo de retorno o *payback* aplicando la ecuación (4.12).

$$PB = \frac{\Delta CAPEX(\text{€})}{\Delta OPEX(\frac{\text{€}}{\text{año}})} \quad (4.12)$$

Sobrecoste inicial

El coste inicial se calcula únicamente para la parte estructural que cambia de material. Por esta razón, aunque se trate realmente del sobrecoste directo de sustitución estructural, se denomina CAPEX a efectos de este estudio. Los precios unitarios de cada material se establecen en 0,65 €/kg para acero naval, 1,90 €/kg para PRFV y 2,30 €/kg para PRFV+GNP. Son valores de P.V.P (Precio de Venta al Público) reales y actualizados para 2026, obtenidos de las entrevistas técnicas y de referencias de la cadena de suministro recogidas en el trabajo de campo [99] [98] [97]. Se aporta el valor del precio unitario del PRFV base, a pesar de que no va a ser utilizado en este estudio, porque será aplicado en el posterior análisis TOPSIS. Los costes de material del buque de acero se calculan según (4.13) y los del buque de PRFV y grafeno con la expresión (4.15), resultando en el sobrecoste CAPEX (4.14).

$$C_{acero} = W_s(t) \cdot 1.000 \text{ kg/t} \cdot 0,65 \text{ €/kg} \quad (4.13)$$

$$C_{PRFV+GNP} = W_{PRFV+GNP} \cdot 1.000 \text{ kg/t} \cdot 2,30 \text{ €/kg} \quad (4.14)$$

$$\Delta CAPEX = C_{PRFV+GNP} - C_{acero} \quad (4.15)$$

Para el BAM, el sobrecoste se obtiene aplicando los valores numéricos de manera que:

$$C_{acero} = 918,05 \text{ t} \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \cdot 0,65 \text{ €/kg} = 596.732,50 \text{ €}$$

$$C_{PRFV+GNP} = 560,01 \text{ t} \cdot 1.000 \text{ kg/t} \cdot 2,30 \text{ €/kg} = 1.288.024,15 \text{ €}$$

$$\Delta CAPEX = 1.288.024,15 \text{ €} - 596.732,50 \text{ €} = 691.291,65 \text{ €}$$

Ahorro operativo

El ahorro operativo anual $\Delta OPEX$ (*Operational Expenditure*) se compone de dos elementos: ahorro de combustible (A_c) y ahorro de pinturas de mantenimiento anticorrosivo (A_p), de tal manera que se cumple la ecuación (4.16).

$$\Delta OPEX(\frac{\text{€}}{\text{año}}) = A_c + A_p \quad (4.16)$$

Ambos ahorros se obtienen de las expresiones (4.17) y (4.18).

El ahorro de combustible (A_c), reseñado en la ecuación (4.17) depende del coste del mismo ($p_{comb}=1,705 \text{ €/t}$ (precio del gasóleo marino a mayo de 2026)), del consumo de la plataforma (q) y sus horas de navegación anuales (h) reseñadas en la Tabla 4-21 y del coeficiente de ahorro (r) obtenido mediante la fórmula del almirantazgo reseñado en la Tabla 4-20.

$$A_c = q \cdot h \cdot r \cdot p_{comb} \quad (4.17)$$

Para el BAM, se tiene que el ahorro de combustible sería;

$$A_c = 0,600 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 3.500 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 0,08 \cdot 1.705 \text{ €/t} = 286.440,00 \text{ €/año}$$

El ahorro de pinturas anticorrosivas de la ecuación (4.18) se calcula conociendo la superficie susceptible de corrosión (WSA, valores calculados en la Tabla 4-22), los costes de mantenimiento promedios por metro cuadrado de casco de acero (c_{mant}), dividido entre el tiempo medio de ciclo de carena, conociendo que en los barcos de la Armada se hace una varada a mitad de vida para repintado ($T_{mant} = \frac{\text{Vida operativa}}{2} = \frac{30 \text{ años}}{2} = 15 \text{ años}$), todo ello multiplicado por el factor η al que se le otorga un valor de 0,9, reducción de costes de mantenimiento aportada por el laboratorio de composites de Rodman Polyships. Este valor estimado surge de eliminar los gastos derivados de recubrimientos anticorrosivos, no necesarios en buques de PRFV y conservar los costes asociados a mantenimientos de *biofouling*.

Para el precio de costes de mantenimiento de casco de acero (c_{mant}), previo a aplicar el ahorro del 90%, se adopta el pintado típico de buques que consiste en un primer pintado exterior general al que se añaden 3 capas de pintura de anticorrosivo específico. Para obtener estos precios, se estudia un contrato real con tarifas para pintura del casco exterior con precio aproximado de 14,32 €/m² y coste por capa dentro de un rango de 1,23 €/m²–1,64 €/m² [116]. Por lo que se tiene que:

$$c_{\text{mant}} = 14,32 \text{ €/m}^2 + 3 \text{ capas} \times 1,40 \text{ €/m}^2 \Rightarrow 18,52 \text{ €/m}^2$$

De esta manera, conocemos todos los datos para aplicar la ecuación (4.18)

$$A_p = \frac{\eta \cdot WSA \cdot c_{\text{mant}}}{T_{\text{mant}}} \quad (4.18)$$

Que para el BAM se particulariza de la manera:

$$A_p = \frac{0,90 \cdot 1.278,97 \text{ m}^3 \cdot 18,52 \text{ €/m}^2}{15 \text{ años}} = 1.421,20 \text{ €/año}$$

Por tanto, el ahorro anual $\Delta OPEX$, para el caso del BAM se calcularía de forma que:

$$\Delta OPEX = A_c + A_p = 286.440,00 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 1.421,20 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 287.861,20 \text{ €/año}$$

De esta forma, se obtiene la Tabla 4-23, donde se reseñan los sobrecostes y ahorros anuales de las alternativas de PRFV+Grafeno para cada plataforma.

Tabla 4-23 Coste inicial y ahorro operativo anual

Plataforma	$\Delta CAPEX$ (€)	Consumo anual (t/año)	Ahorro combustible (€/año)	Ahorro anticorrosivo (€/año)
Flotador de 6 m	451,80	1,60	409,20	13,89
Patrullero de 35 m	58.734,00	400,00	102.300,00	193,07
BAM de 94 m	691.291,65	2.100,00	286.440,00	1.421,20

4.3.5 Periodo de retorno y VAN

El periodo de retorno simple se calcula dividiendo el sobrecoste directo de sustitución estructural entre el ahorro operativo anual. El Valor Actual Neto (VAN) se calcula a diez años con una tasa de descuento del 4 %, siguiendo la formulación habitual de ingeniería económica [117].

$$PB = \frac{\Delta CAPEX}{\Delta OPEX} \quad (4.19)$$

$$VAN = -\Delta CAPEX + \sum_{t=1}^{10} \frac{\Delta OPEX}{(1 + 0,04)^t} \quad (4.20)$$

Para el BAM:

$$PB = \frac{691.291,65}{287.861,20} = 2,40 \text{ años}$$

$$VAN = -691.291,65 + \sum_{t=1}^{10} \frac{287.861,20}{(1 + 0,04)^t} = 1.643.520,54 \text{ €}$$

Este resultado sugiere que, bajo las hipótesis económicas adoptadas, la alternativa generaría un retorno económico actualizado a los diez años superior a 1,6 millones de euros respecto de la inversión inicial. Los valores de retorno y de VAN se resumen en la Tabla 4-24.

Tabla 4-24 Periodos de retorno y VAN a los 10 años

Plataforma	$\Delta CAPEX$ (€)	$\Delta OPEX$ anual (€/año)	Payback directo (años)	VAN a 10 años, 4 % (€)	Viabilidad financiera
Flotador de 6 m	451,80	423,09	1,07	2.979,84	Excelente
Patrullero de 35 m	58.734,00	102.493,07	0,57	772.576,64	Máxima viabilidad
BAM de 94 m	691.291,65	287.861,20	2,40	1.643.520,54	Viable

Sin embargo, para dotar al modelo del realismo industrial exigido en la construcción naval militar, es imperativo someter estos indicadores a un análisis de sensibilidad multivariable. Como se recoge en las referencias [118] [117] [119].

4.3.6 Modelo de sensibilidad multivariable

La formulación del modelo de sensibilidad (4.21) parte de los indicadores deterministas de la Tabla 4-24 y aplica penalizaciones de complejidad industrial y certificación sobre el CAPEX. La variación de precio del combustible se aplica exclusivamente a A_c , mientras que A_p permanece constante. Expresa las contingencias para compensar la incertidumbre de las estimaciones de coste asociada al grado de madurez y definición tecnológica

$$Payback_{escenario} = \frac{\Delta CAPEX \cdot (1 + \omega_{ind} + \omega_{cert})}{A_c \cdot (1 \pm \gamma_{comb}) + A_p} \quad (4.21)$$

Donde los coeficientes de ponderación y penalización se definen y justifican de la siguiente manera según la escala de la plataforma estudiada:

- Factor de Complejidad Industrial y Dispersión (ω_{ind}): modela el coste indirecto asociado al procesado del nanomaterial (infusión, control de calidad, homogeneidad de las nanopartículas de grafeno y mermas estructurales).
 - Flotador / Patrullero: se fija en 0,10 y 0,15 respectivamente, debido a la facilidad de manufactura en moldes abiertos o cerrados de dimensiones contenidas.
 - BAM: Se penaliza con un $\omega_{ind} = 0,45$ para absorber la necesidad de infraestructuras con atmósfera controlada y utillajes críticos para el curado de grandes esloras.
- Factor de Certificación e ingeniería de detalle (ω_{cert}): que contempla el desarrollo de ensayos de colapso, fatiga y uniones híbridas (acero-composite) exigidos por las Sociedades de Clasificación (IACS).
 - Flotador / Patrullero: = 0,05 y 0,10 respectivamente, que es asimilable a normativas existentes de embarcaciones de recreo o profesionales ligeras.
 - BAM: se establece en $\omega_{cert} = 0,30$ debido al vacío normativo actual en buques militares de composites superiores a 60 metros de eslora, lo que exigiría un proceso intensivo de validación mediante primeros principios sin tener en cuenta el encorsetamiento de normativas y procedimientos perfectamente definido e implantados en ingeniería.
- Volatilidad del Combustible (γ_{comb}): se corresponde con el diferencial de volatilidad de $\pm 21\%$ adoptada deliberadamente, justificado según el comportamiento histórico del mercado de destilados Brent [120] [121].

Unido a esto, consideraremos los tres escenarios marcados según la Tabla 4-25 en la que vemos representados los tres escenarios posibles. El escenario conservador con bajada de combustible, el base de cálculo que es el medio y el optimista en el que se espera una subida continua de los combustibles.

Tabla 4-25 Matriz de Ponderación de Escenarios

<i>Factor de entrada</i>	<i>Plataforma</i>	<i>Conservador</i>	<i>Medio</i>	<i>Optimista</i>
(γ_{comb})	Todas	(-21%)	0%	+21%
	Flotador	+15% (0,15)	+10% (0,10)	+5% (0,05)
(ω_{ind})	Patrullero	+25% (0,25)	+15% (0,15)	+5% (0,05)
	BAM	+60% (0,60)	+45% (0,45)	+30% (0,30)
(ω_{cert})	Flotador	+10% (0,10)	+5% (0,05)	+0% (0,00)
	Patrullero	+15% (0,15)	+10% (0,10)	+5% (0,05)
	BAM	+40% (0,40)	+30% (0,30)	+15% (0,15)

Esta transición metodológica se consolida en la Tabla 4-26, donde los plazos de recuperación se reevalúan bajo tres escenarios doctrinales (Conservador, Medio y Optimista) que internalizan variables cualitativas y costes indirectos críticos, tales como la complejidad de la dispersión nanotecnológica del grafeno, la necesidad de mano de obra altamente especializada para el proceso de infusión, las mermas de material durante el curado y la volatilidad histórica del combustible.

Como resultado, las plataformas ligeras y medias mantienen periodos de retorno reducidos debido a su menor sobre coste inicial y a una relación favorable entre ahorro operativo y CAPEX. Para el BAM, el escenario medio arroja un periodo de retorno de 4,20 años, dentro de una horquilla de 2,88 a 6,07 años. Este incremento de escala no invalida la propuesta, pero refleja los desafíos de habilitación de astilleros y certificación estructural para grandes esloras en composite. Incluso en el escenario más conservador, la inversión queda amortizada dentro del horizonte económico de 10 años.

Los resultados finales (Tabla 4-26) por tanto, muestran ahora que la rentabilidad económica del grafeno es especialmente favorable en embarcaciones de pequeña y media eslora, donde la fracción estructural posee mayor influencia relativa sobre el desplazamiento total y sobre el consumo energético. En grandes plataformas, aunque el periodo de amortización aumenta, la integración sigue siendo potencialmente viable dentro del ciclo de vida operativo del buque.

Tabla 4-26 Rangos estimados de amortización según escenario

<i>Plataforma</i>	<i>Conservador</i>	<i>Medio</i>	<i>Optimista</i>
<i>Flotador 6 m</i>	1,68 años	1,23 años	0,93 años
<i>Patrullero 35 m</i>	1,02 años	0,72 años	0,52 años
<i>BAM 94 m</i>	6,07 años	4,20 años	2,88 años

4.3.7 Consideraciones sobre los resultados

El análisis realizado permite identificar una tendencia favorable hacia la integración progresiva de materiales compuestos avanzados dopados con grafeno en plataformas navales ligeras y medias. Desde el punto de vista técnico, la mejora de resistencia específica y de funcionalidad, junto con la reducción de masa, puede mitigar parcialmente algunas limitaciones históricas del PRFV convencional.

Desde el punto de vista económico, el sobre coste inicial asociado al grafeno presenta una influencia limitada sobre el coste total de plataformas militares, donde los sistemas de armas, sensores y propulsión representan la mayor parte del CAPEX total. Asimismo, el ahorro operativo asociado a reducción de

consumo y potencial disminución de mantenimiento estructural permite alcanzar periodos de retorno compatibles con la vida útil estándar de las unidades navales.

No obstante, debe destacarse que los resultados obtenidos constituyen una aproximación preliminar basada en hipótesis simplificadas. La validación industrial requeriría:

- Ensayos mecánicos certificados.
- Modelos FEM de flexión longitudinal.
- Estudios hidrodinámicos CFD.
- Validación experimental de consumo energético.
- Evaluación de envejecimiento y fatiga.

4.3.8 Conclusión técnica

El modelo comparativo desarrollado permite concluir que el empleo de PRFV dopado con grafeno presenta un elevado potencial de mejora técnico-operativa en plataformas navales ligeras y medias, especialmente en aplicaciones donde la reducción de peso estructural tenga impacto directo sobre consumo, autonomía y mantenimiento.

La viabilidad económica preliminar obtenida sugiere que la incorporación progresiva de nanomateriales avanzados podría representar una línea tecnológica de interés estratégico para futuras plataformas navales de baja y media eslora.

4.4 Metodología TOPSIS para la toma de decisiones aplicada

Con el fin de integrar en una única evaluación los resultados estructurales, económicos y cualitativos obtenidos en este trabajo, se ha empleado la metodología TOPSIS, un método de decisión multicriterio que permite ordenar alternativas en función de su proximidad a la solución ideal positiva y de su alejamiento respecto de la solución ideal negativa [83].

4.4.1 Alternativas y criterios de evaluación

Primeramente, se establecen los elementos a evaluar, en este caso los tres tipos de materiales sometidos a estudio en el presente trabajo: acero naval en grado A, PRFV y PRFV cargado con grafeno al 0,5%. Estos materiales representan los tres tipos de materiales de construcción naval, respectivamente: tradicionales, materiales compuestos y nuevos materiales, y que se corresponden con la columna de la matriz de decisión $\{A_1, A_2, A_3\}$. La evaluación se realiza a partir de cinco criterios de decisión $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$, algunos de carácter cuantitativo, obtenidos en la realización de este TFG (C_1, C_2 y C_3) y otros de carácter cualitativo (C_4 y C_5), sobre la base de las opiniones de expertos, cuyos valores serán una escala del 1-10; media de los datos obtenidos de consultar a siete expertos en la materia y referidos a la aplicación en astilleros [100] [97] [96] [99] [98]:

- C_1 , flecha de la viga apoyada;
- C_2 , peso de la estructura;
- C_3 , coste de adquisición del material;
- C_4 , escalabilidad industrial y
- C_5 , resistencia a la corrosión.

Los tres primeros criterios se tratan como criterios de coste, dado que valores menores son preferibles, mientras que los dos últimos se consideran criterios de beneficio, ya que valores mayores representan un mejor desempeño.

Cabe destacar que la rigidez de los buques-viga de PRFV y su alternativa dopada con grafeno se toma de los valores hallados para espesores equivalentes capaces de aguantar el mismo peso que el acero, por lo que ya estaríamos teniendo en cuenta el límite último y analizaríamos en la matriz los límites de servicio propios de la rigidez

La ponderación de los criterios se ha establecido a partir del consenso técnico obtenido en el trabajo de campo y responde a la relevancia relativa de cada dimensión en el contexto naval analizado. En particular, se han adoptado los siguientes pesos para cada una de las variables: $w_j = \{w_1 = 0,0667; w_2 = 0,1333; w_3 = 0,3333; w_4 = 0,2667; w_5 = 0,2000\}$. De esta forma cumplimos la condición que el sumatorio de todos los pesos sea 1 es decir, $\sum_{j=1}^5 w_j = 1$ de esta forma podemos plantear la matriz de decisión que de forma general como en Tabla 4-27.

Tabla 4-27 Matriz de decisión genérica.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}
A_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}

4.4.2 Construcción de la matriz de decisión, normalizada y ponderada

Además, se plantean los criterios a evaluar siguiendo el método TOPSIS. Para ello, tomamos los siguientes valores numéricos reseñados en la Tabla 4-28. Los valores de C_1 corresponden a las flechas obtenidas en el apartado 4.2.4, para las viga de sección cuadrada que soportan misma carga límite que el acero. Los valores de C_2 corresponden al producto de multiplicar el volumen de las tres vigas-buque, para cada espesor equivalente, por la densidad del material reseñado en la Tabla 4-1.. Los valores de C_3 se derivan de los costes calculados para las vigas en la discusión económica del apartado 4.3.2.

Tabla 4-28 Matriz de decisión final

Material	C_1 (mm)	C_2 (kg)	C_3 (€)	C_4	C_5
Acero naval grado A	20,6	558,4	363,0	10	4
PRFV	206,255	231,6	440,1	5	7
PRFV+0,5% Grafeno	551,6	162,8	374,5	4	10

Ahora es necesario normalizar esta matriz para obtener la matriz euclidiana “r” aplicando la expresión $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}}$, siendo m =número de materiales. En nuestro estudio, $m=3$. De esta forma podemos escribirla como vemos en la Tabla 4-29.

Tabla 4-29 Matriz normalizada

Alternativa	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Acero naval grado A	0,0350	0,8919	0,5319	0,8422	0,3114
PRFV	0,3500	0,3699	0,6449	0,4211	0,5449
PRFV+0,5% Grafeno	0,9361	0,2600	0,5488	0,3369	0,7785

Se presenta el peso de ponderación para cada criterio en la Tabla 4 30, en los cuales se ordenan por importancia los cinco criterios. La subjetividad del método se ha intentado paliar mediante la consulta de expertos en el sector.

Tabla 4 30 Ponderación de criterios

Criterio	Orden de importancia	Rango	Peso w_j
C3	1.º	5	$5/15 = 0,3333$
C4	2.º	4	$4/15 = 0,2667$
C5	3.º	3	$3/15 = 0,2000$
C2	4.º	2	$2/15 = 0,1333$
C1	5.º	1	$1/15 = 0,0667$
Σ	-	15	1

A continuación, se realiza el producto entre cada uno de los términos de la matriz normalizada n_{ij} y el peso de cada criterio w_j exponiéndolos en forma de matriz en la Tabla 4-31.

Tabla 4-31 Matriz normalizada ponderada

Alternativa	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Acero naval grado A	0,0023	0,1189	0,1773	0,2246	0,0623
PRFV	0,0233	0,0493	0,2150	0,1123	0,1090
PRFV + 0,5% grafeno	0,0624	0,0347	0,1829	0,0898	0,1557

4.4.3 Soluciones ideales y coeficientes de cercanía

Una vez definida la matriz ponderada, se determinan la solución ideal positiva y la solución ideal negativa. Para los criterios de coste, la solución ideal positiva corresponde al valor mínimo y la negativa al valor máximo. Para los criterios de beneficio sucede lo contrario. En consecuencia, se obtienen los resultados que podemos ver en la Tabla 4-32.

Tabla 4-32 Solución ideal positiva y negativa

Criterio	A^+	A^-	Norma
C_1	0,0023	0,0624	Mínimo
C_2	0,0347	0,1189	Mínimo
C_3	0,1773	0,2150	Mínimo
C_4	0,2246	0,0898	Máximo
C_5	0,1557	0,0623	Máximo

Con nuestros valores de la matriz normalizada ponderada (v_{ij}) de la Tabla 4-31 y los valores ideales ($A_j^{+/-}$) de la Tabla 4-32, podemos hallar los vectores de distancia con la expresión $z_{ij} = (v_{ij} - A_j^{+/-})^2$, que los separan, respecto al ideal positivo (Tabla 4-33) y respecto al ideal negativo (Tabla 4-34).

Se reseña, además, la norma euclídea para calcular la lejanía de cada alternativa respecto a los vectores ideal positivo y negativo. Esta expresión se obtiene del sumatorio de los cuadrados de las distancias de cada criterio z_{ij} : $S_i^{+/-} = \sqrt{\sum_j (v_{ij} - A_j^{+/-})^2} = \sqrt{\sum_j z_{ij}^2}$

Tabla 4-33 Valor diferencial con ideal positivo

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5	Norma euclídea S_i^+
A1	0,0000	0,0071	0,0000	0,0000	0,0087	0,1258
A2	0,0004	0,0002	0,0014	0,0126	0,0022	0,1299
A3	0,0036	0,0000	0,0000	0,0182	0,0000	0,1476

Tabla 4-34 Valor diferencial con ideal negativo

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5	Norma euclídea S_i^-
A1	0,0036	0,0000	0,0014	0,0182	0,0000	0,1523
A2	0,0015	0,0048	0,0000	0,0005	0,0022	0,0952
A3	0,0000	0,0071	0,0010	0,0000	0,0087	0,1298

Por último determinamos el coeficiente de cercanía en base a $C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$ que nos ofrece los valores que podemos ver en Tabla 4-35. En consecuencia, el orden de preferencia final queda establecido como: Acero Naval A > PRFV + 0,5 % grafeno > PRFV. Que gráficamente podemos representar como vemos en la Figura 4-24 Comparación del coeficiente de cercanía obtenido mediante TOPSIS.

Tabla 4-35 Coeficientes de cercanía

Alternativa	Coeficiente de cercanía
Acero Naval A	0,5476
PRFV	0,4229
PRFV + 0,5 % grafeno	0,4679



Figura 4-24 Comparación del coeficiente de cercanía obtenido mediante TOPSIS
(Elaboración propia)

4.4.4 *Análisis de sensibilidad de la metodología TOPSIS*

Para evaluar la robustez de la elección del acero naval frente al PRFV dopado con grafeno, se ha realizado un análisis de sensibilidad basado en tres escenarios estratégicos que representan diferentes prioridades para la Armada: primero un escenario base de equilibrio industrial que es la ponderación considerada en el estudio, un escenario táctico en el que prima el sigilo operativo y un escenario de emergencia en el que primará el coste mínimo y máxima rigidez. De esta forma obtenemos:

1. Escenario base: es el escenario desarrollado en la memoria en relación a las necesidades actuales de la Armada y está basado en el consenso de los expertos de Armón, Avanzare y Rodman que priorizan el coste (C_3) y la escalabilidad (C_4). El resultado de aplicar este escenario, nos lleva a la siguiente clasificación: Acero (0,55) > PRFV+G (0,47) > PRFV (0,42).
2. Escenario táctico: en este escenario se priorizan el ahorro de peso (C_2) y la resistencia a la corrosión (C_5), al considerarse relevantes para perfiles operativos en los que la reducción de firma, la disminución de mantenimiento y la mejora de la carga útil adquieren mayor importancia relativa. Con este modelo, la alternativa PRFV + 0,5 % grafeno pasa a ocupar la primera posición en el coeficiente de cercanía relativa, por delante del PRFV base y del acero naval. Este resultado no implica una superioridad general del material compuesto dopado, sino una preferencia condicionada al escenario en el que el peso y la durabilidad frente al medio marino reciben una valoración más alta. El resultado es: PRFV+G (0,72) > PRFV (0,65) > Acero (0,38)
3. Escenario de emergencia: este escenario refleja una situación de necesidad de construcción rápida y económica de grandes series, donde la flexión global (C_1), es la única restricción técnica aceptable y el presupuesto (C_3) es muy limitado. El Acero naval refuerza su dominio de forma absoluta. La diferencia de coste y la rigidez imbatible del acero anulan cualquier ventaja competitiva de los materiales compuestos en esta escala. Acero (0,84) > PRFV+G (0,39) > PRFV (0,18)

El análisis de sensibilidad muestra que la clasificación final de materiales depende de forma apreciable de la ponderación de los criterios. En el escenario base y en el de emergencia, el acero naval mantiene la mejor posición debido a su rigidez, coste relativo y madurez industrial. Sin embargo, cuando el peso estructural y la resistencia a la corrosión adquieren mayor relevancia, el PRFV dopado con un 0,5 % de grafeno mejora su posición y pasa a ser la alternativa preferente dentro del marco de la metodología aplicada. En consecuencia, el PRFV con grafeno no puede considerarse una solución óptima universal, pero sí una opción técnicamente interesante para escenarios operativos específicos en los que la eficiencia estructural y el sostenimiento tengan un peso decisivo en la decisión.

4.4.5 *Conclusión de resultados de la aplicación del TOPSIS*

El resultado obtenido confirma que, bajo la ponderación adoptada, el acero naval de grado A continúa siendo la alternativa globalmente más equilibrada, principalmente por su elevada rigidez, su madurez industrial y su mejor comportamiento estructural. No obstante, el PRFV dopado con un 0,5% de grafeno presenta un desempeño superior al PRFV convencional, lo que sugiere que la incorporación de grafeno puede aportar ventajas parciales cuando el peso, la corrosión o el mantenimiento adquieran una mayor importancia relativa en escenarios de diseño específicos. Conviene señalar que el ranking final depende de forma directa de la ponderación asignada a los criterios. Por tanto, una variación en los pesos (por ejemplo, aumentando la relevancia del peso estructural, de la corrosión o del coste de mantenimiento) podría modificar el orden de preferencia de las alternativas, especialmente en favor del PRFV con grafeno.

4.4.6 *Justificación del uso de método TOPSIS*

Para la evaluación global y la selección de la alternativa estructural óptima en este TFG, se ha seleccionado el método de decisión multicriterio TOPSIS. La elección de esta técnica frente a otros

métodos tradicionales de la literatura científica, como el AHP (*Analytic Hierarchy Process*) o ELECTRE, se fundamenta en su idoneidad para abordar problemas de ingeniería con variables fuertemente heterogéneas [122]. A diferencia del método AHP, el cual introduce un componente de subjetividad limitante al basarse en comparaciones binarias cualitativas que se vuelven ineficientes y propensas a inconsistencias a medida que aumenta el número de criterios [123] [124].

TOPSIS trabaja de manera directa y ágil con datos cuantitativos numéricos procedentes de simulaciones y costes reales. Asimismo, frente a la complejidad analítica de las relaciones de superación de ELECTRE, que a menudo conducen a soluciones indeterminadas o núcleos de alternativas difíciles de jerarquizar, TOPSIS ofrece un enfoque geométrico intuitivo y matemáticamente riguroso [125]. Al determinar simultáneamente la menor distancia a la solución ideal positiva y la mayor distancia a la solución ideal negativa, este método proporciona un coeficiente de cercanía relativo explícito, asegurando una ordenación inequívoca, objetiva y robusta de las configuraciones de material evaluadas [126].

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se consolidan los resultados obtenidos a través de las tres vías metodológicas empleadas tanto en la revisión bibliográfica, como el trabajo de campo con las entrevistas a personal del sector naval y visitas a los astilleros o el análisis analítico-numérico (FEM) comparativo, la evaluación de costes y la evaluación multicriterio. El objetivo es ofrecer una visión integral de la viabilidad del grafeno y los materiales compuestos en el sector naval militar, concretamente dentro de las necesidades de la Defensa como se refleja en la ETID 2026 en la que los nuevos materiales se consideran como una parte de la investigación y desarrollo de nuevos diseños de plataformas, mejora del rendimiento hidrodinámico o la reducción de la detección [127].

5.1 Análisis de la literatura en la materia

El análisis de la literatura científica, contrastado con el trabajo de campo realizado en astilleros como Armón y Rodman Polyships, así como con proveedores tecnológicos como Avanzare Materials, permite extraer conclusiones fundamentales sobre la viabilidad del grafeno en el sector naval (apartado 3.1. de este TFG)

Uno de los resultados más relevantes que se observa es la necesidad de dotar de significado estructural al grafeno contrastando el análisis del comportamiento mecánico y el límite de saturación del grafeno como carga. Mientras que la literatura académica a menudo se centra en el grafeno monoatómico ideal, la realidad industrial para la construcción naval se basa en nanoplaquetas de grafeno (GNP) u óxidos de grafeno que no son lo mismo.

Frente a las expectativas teóricas de sustitución total de materiales, podemos afirmar que el grafeno opera más como una carga o aditivo funcional que optimiza la matriz polimérica pero no es capaz por el momento de sustituir el papel estructural de la fibra de vidrio embebida en la matriz de resina. Por otro lado, se ha validado un umbral de eficiencia que se sitúa en el en torno al 1% en masa como máximo dado que las cargas mayores producen aglomeración que termina actuando como acumuladores de tensiones invalidando cualquier mejora mecánica del laminado.

El estado del arte revela una brecha significativa entre los resultados de laboratorio y el uso del grafeno en la construcción naval actual; por una parte, las Sociedades de Clasificación como la VB o el DNV (miembros de la IACS) aun no contemplan el grafeno dentro de sus reglamentos estructurales navales lo que orienta su uso a elementos no críticos a cuestiones muy específicas como el tratamiento superficial como aislante. Esta incertidumbre normativa repercute en que no se oriente la producción a la aplicación de este material en estructuras de buques.

Además de esto, la mejora en los medios de producción de las líneas de acero de los astilleros modernos con alta automatización y construcción modular, junto a la fabricación de composites que requieren de controles ambientales rigurosos y composiciones muy precisas muestran una madurez

industrial que provoca que la introducción de estos nuevos materiales puedan suponer un riesgo. Hay ventajas inherentes al acero como la reparación in situ, mientras que los plásticos cargados requieren de controles exhaustivos además de ambientes controlados para trabajar, lo que complica los mantenimientos y reparaciones.

Del análisis de la bibliografía se desprende que el principal potencial del grafeno en el ámbito naval no reside únicamente en la mejora mecánica de los materiales, sino en su capacidad para aportar funcionalidades estratégicas. En los buques de guerra, puede contribuir a la reducción de firmas y a la protección de sistemas electrónicos sensibles. Asimismo, su incorporación en recubrimientos o matrices compuestas puede favorecer una gestión más eficiente del mantenimiento, al retrasar la aparición de fenómenos de degradación y reducir la frecuencia de intervenciones asociadas a la corrosión de los aceros.

En el caso de los materiales compuestos de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), el grafeno puede actuar como elemento de protección frente al ambiente marino, mejorando la resistencia a la penetración de humedad, la degradación salina y los procesos de ósmosis característicos de este tipo de materiales.

Este análisis permite concluir que, aunque el acero naval Grado A sigue siendo el estándar por madurez y coste, el PRFV dopado con grafeno se posiciona como una alternativa estratégica real para buques de pequeña y media eslora donde el peso y la firma sean determinantes.

5.2 Análisis de los resultados del trabajo de campo: visión de la industria

Las consultas con expertos y las visitas a instalaciones productivas han permitido validar las hipótesis teóricas con la realidad industrial. El consenso técnico con empresas como Avanzare Materials confirma que una carga del 1% de nanoplaquetas de grafeno (GNP) es el límite superior de viabilidad. Cargas mayores provocan aglomeración por fuerzas de Van der Waals, generando defectos estructurales en lugar de refuerzos.

Por otro lado, se ha contrastado que, mientras el acero representa un campo de certidumbre y madurez total (Astilleros Armón), el PRFV requiere un enfoque de industria química donde la integridad del material se fabrica en el propio molde (Rodman Polyships). Esto hace necesario recurrir a estructura de planificación de la producción completamente diferentes.

Por último y, más allá de la mejora mecánica, los resultados de las entrevistas destacan que el grafeno aporta valor estratégico en la disipación de cargas estáticas y el apantallamiento electromagnético, factores críticos en buques militares modernos y que deben ser líneas que se sigan en un futuro como aplicación más que estudio teórico de propiedades y comportamiento de forma aislada. La Tabla 5-1 ofrece de forma resumida los principales hallazgos en las primeras etapas del estudio, estado del arte y trabajo de campo.

Tabla 5-1 Comparación de hallazgos en los capítulos 2 y 3 del TFG.

<i>Dimensión</i>	<i>Estado del Arte Hallazgo crítico</i>	<i>Trabajo de Campo Validación industrial</i>
Estructural	Mejora de propiedades mecánicas interlaminares.	El grafeno refuerza la matriz, pero no sustituye a la fibra.
Económica	Elevado coste inicial del nanomaterial.	El ahorro de peso es crítico en alta velocidad, secundario en carga.
Productiva	Dificultad de dispersión en grandes volúmenes.	El 1% es el límite para mantener la reología e infusión.

Operativa	Resistencia superior a la corrosión química.	Drástica reducción de costes de mantenimiento (solo <i>antifouling</i>).
Futuro	Capacidad aislante reducción de firma radar	Aplicaciones en tratamientos superficiales para reducción de firma.

5.3 Resultados del análisis mecánico y FEM

Siguiendo los cálculos explicados en el capítulo 4 (Tabla 4-2, Tabla 4-3, Tabla 4-4 y Tabla 4-5) para la viga-casco y su validación mediante elementos finitos, se obtienen los siguientes resultados clave. El comportamiento a flexión (Viga-casco) con el dopado con grafeno al 0,5% mejora la transferencia de carga entre las fibras de vidrio al optimizar la matriz de resina, retrasando la aparición de microfisuras interlaminares.

Para igualar la capacidad de carga de referencia definida por el límite elástico del acero, el PRFV dopado con grafeno permite secciones más eficientes que el PRFV base por su mayor resistencia límite, no por un incremento de rigidez. La simulación FEM confirma que esta mejora de resistencia permite reducir el espesor necesario respecto al composite convencional para la misma sollicitación de quebranto y arrufo.

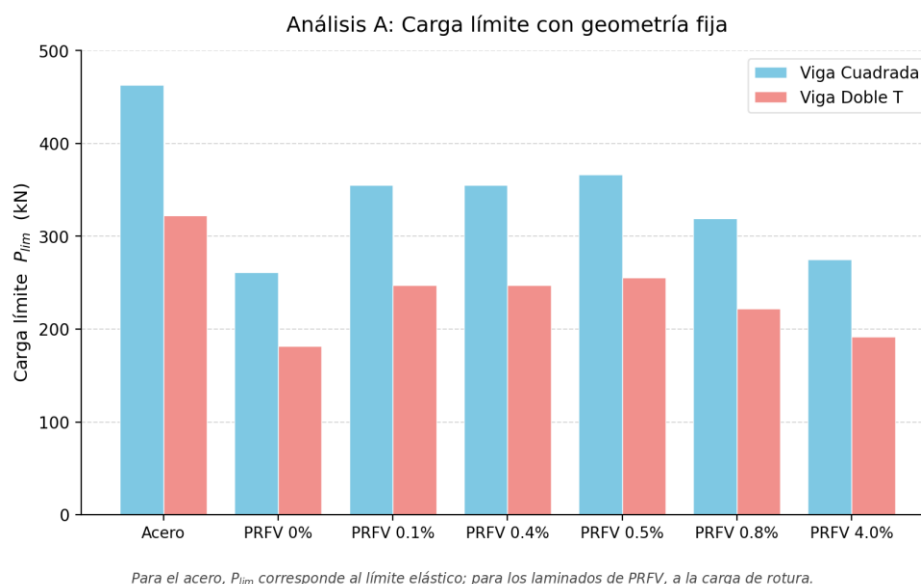


Figura 5-1 Comparativa de la carga límite (P_{lim})

En la Figura 5-1 se representa (P_{lim}) en el análisis A (geometría fija con espesor de 6 mm) para las secciones cuadrada y en doble T según el material analizado. El eje de ordenadas (Y) representa la carga límite en (kN), mientras que el eje de abscisas (X) representa la configuración de material (Acero naval frente a PRFV Rovimat con diferentes porcentajes en masa de nanoplaquetas de grafeno (GNP)). La superposición muestra la pérdida de capacidad portante del material compuesto a igualdad de geometría y el óptimo mecánico situado en 0,5 % de GNP.

5.3.1 Resultados de análisis numérico

A pesar de que el análisis numérico sitúa el óptimo puramente mecánico en un dopado del 0,5% de GNP, maximizando la tensión de rotura y optimizando el espesor de la viga-casco, en el presente proyecto se justifica la selección del 1% en masa como configuración de referencia debido a criterios de multifuncionalidad y viabilidad industrial.

Desde la perspectiva operativa militar, elevar la concentración al 1% asegura la superación del umbral de percolación eléctrica, dotando al casco de capacidades críticas de apantallamiento

electromagnético (EMI) y disipación electrostática que el 0,5% no consolida de forma robusta. Asimismo, en consonancia con los datos recabados en el trabajo de campo con expertos del sector, el diseño al 1% absorbe las tolerancias y posibles heterogeneidades propias de los procesos de infusión a gran escala en astilleros, garantizando que el comportamiento global de la plataforma estructural se mantenga de forma homogénea por encima de las prestaciones del PRFV convencional.

Por otro lado, los resultados cuantifican una reducción masiva de peso estructural, lo que valida la posibilidad de aumentar la carga útil o mejorar la autonomía del buque. Este punto es un elemento clave en todos los buques, pero es crítico en los buques de guerra por los márgenes de crecimiento futuro por las obsolescencias que se puedan presentar a lo largo de su ciclo de vida.

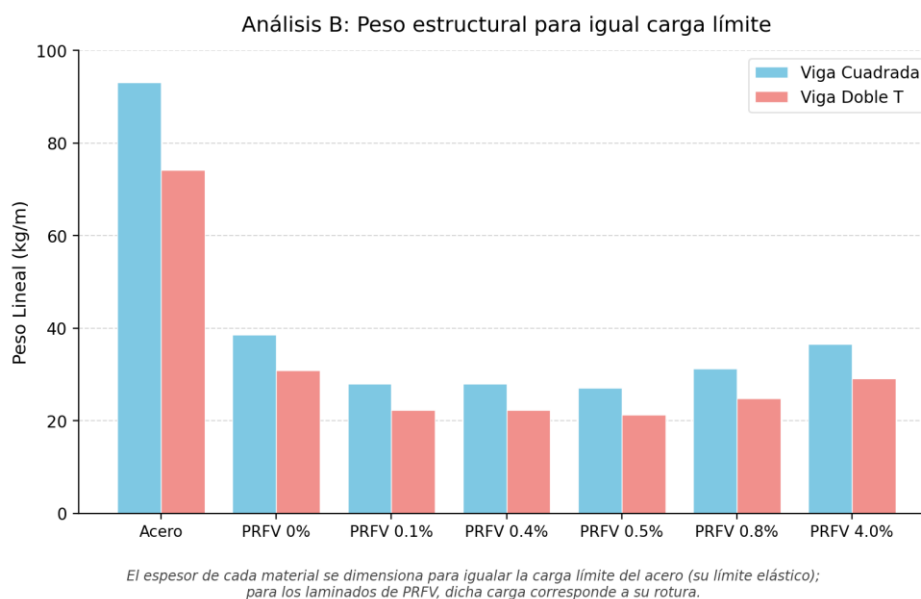


Figura 5-2 Comparativa del peso lineal estructural

En Figura 5-2 del Análisis B comparando espesores equivalentes para igualar la carga de límite elástico del acero entre la sección cuadrada y la sección en doble T. Eje de ordenadas (Y) representa el peso lineal de la viga en kilogramos por metro (kg/m) y el eje de abscisas (X) la configuración de material analizado. Las barras superpuestas permiten contrastar la mayor eficiencia de la sección en doble T frente a la cuadrada, logrando reducciones de masa superiores 70 % respecto al acero de referencia de calidad naval.

Se ha podido constatar en los resultados del modelo numérico, el óptimo puramente mecánico se sitúa en una carga del 0,5% de nanoplaquetas (GNP), ya que maximiza la tensión última ($\sigma_u=285$ MPa) y permite la mayor reducción de espesor equivalente. Sin embargo, para la propuesta estratégica final de este TFG, se ha considerado el 1% en masa como configuración de referencia. Esta decisión responde a un criterio de multifuncionalidad en el campo naval militar. Mientras que el 0,5% optimiza la flexión, el 1% garantiza superar el umbral de percolación eléctrica, dotando al buque de capacidades de apantallamiento electromagnético (EMI) y disipación de cargas estáticas que son críticas en entornos operativos de la Armada.

Desde el punto de vista de la ingeniería de producción, esta dosis del 1% actúa también como un margen de seguridad industrial. Considerando las entrevistas con expertos de Avanzare y Rodman, una carga del 1% permite absorber las heterogeneidades e imprecisiones propias de los procesos de infusión a gran escala en astilleros, asegurando que, incluso con ligeras variaciones en la dispersión, las propiedades globales del casco se mantengan siempre por encima de las del PRFV convencional sin comprometer el procesado de la resina.

5.3.2 Resultados del análisis FEM comparado

La Tabla 4-16 consolida el análisis comparativo global de la viga-casco de sección cuadrada, permitiendo evaluar el comportamiento estructural, de masa y de seguridad elástica del acero naval frente a las diferentes configuraciones de materiales compuestos (PRFV convencional y PRFV dopado con grafeno). Este análisis es fundamental para cuantificar las ventajas de la optimización geométrica y micro-mecánica del laminado. Destacaremos los siguientes hallazgos realizados durante el estudio de FEM:

5.3.2.1 Descarte metodológico del escenario PRFV₍₁₎

En primer lugar, es necesario señalar que el escenario PRFV (1), planteado bajo un espesor geométrico idéntico al del acero de 6mm, representa una configuración inviable y estructuralmente fallida. Aunque teóricamente arroja una reducción de peso del 77,1% respecto al acero para la geometría de 6mm, el análisis del índice de reserva de resistencia SR da como resultado un valor crítico de $SR = 0,115$. Al ser un valor drásticamente inferior a la unidad ($SR < 1$), el software FEM predice un colapso inmediato del perfil por delaminación interlaminar y rotura de fibras, registrando tensiones de tracción (544,6 MPa) y compresión (-463,7 MPa) que superan con creces los límites admisibles del composite base. Asimismo, la flecha elástica resultante (1065 mm) resulta inadmisibile para la incapacidad operativa de la viga-casco, invalidando por completo este escenario.

5.3.2.2 Comportamiento del PRFV convencional equivalente PRFV₍₂₎

Para subsanar el fallo anterior y establecer una comparativa realista con el acero, el escenario PRFV₍₂₎ aumenta el espesor estructural hasta los 10,96 mm con el fin de alcanzar una condición de seguridad estricta ($SR = 1,0$). Bajo este diseño equivalente, las tensiones máximas se reducen a valores seguros (218,5 MPa a tracción y -188,8 MPa a compresión). A pesar del incremento de espesor necesario para compensar el menor módulo elástico de la fibra de vidrio frente al acero, el perfil sigue registrando una reducción de masa lineal neta del 58,5% (38,60 kg/m frente a los 93,07 kg/m del acero), demostrando la excelente eficiencia de peso intrínseca de los materiales compuestos.

5.3.2.3 Impacto del dopaje con grafeno y optimización geométrica PRFV_{GNP} (1) y (2)

La introducción de nanoplaquetas de grafeno (GNP) al 0,5% redefine los límites de optimización del diseño a través de dos estrategias de cálculo diferenciadas:

El escenario PRFV GNP₍₁₎ es una optimización por espesor. Este modelo busca la máxima eficiencia de aligeramiento reduciendo el espesor a un valor intermedio de 7,65 mm pero garantizando la seguridad estructural ($SR = 1,0$). Gracias al incremento de la resistencia de rotura que aporta el nanomaterial, el perfil es capaz de trabajar a tensiones límite mucho más elevadas (281,3 MPa a tracción) e igualar la capacidad resistente del acero. Esto se traduce en una reducción de peso del 70,8% respecto al acero y, lo que es más relevante, en un ahorro de masa adicional del 29,7% respecto al composite convencional equivalente PRFV₍₂₎, situando la masa lineal en apenas 27,14 kg/m.

El escenario PRFV GNP (2) mantiene el espesor de 10,96 mm y se interpreta como una alternativa de reserva resistente, no como una optimización de rigidez. Las tensiones FEM son 218,4 MPa a tracción y -205,1 MPa a compresión, mientras que el postproceso devuelve un $SR \approx 10$ en la mayor parte de la sección, con un mínimo de 1,4 en el tejido biaxial de la fibra comprimida. La flecha de 207,1 mm es prácticamente coincidente con los 206,3 mm del PRFV base equivalente, por lo que el beneficio de esta alternativa es resistente, no de rigidez.

Con esta comparativa global se demuestra que el PRFV convencional requiere aumentar el espesor para alcanzar la capacidad resistente de referencia del acero, mientras que el dopaje nanométrico con grafeno incrementa la resistencia de las capas de matriz. Esto permite elegir entre un perfil un 30 % más ligero para misiones que prioricen autonomía y carga útil, PRFV+GNP (1), o un perfil de igual espesor que el PRFV base con mayor reserva resistente local, PRFV+GNP (2).

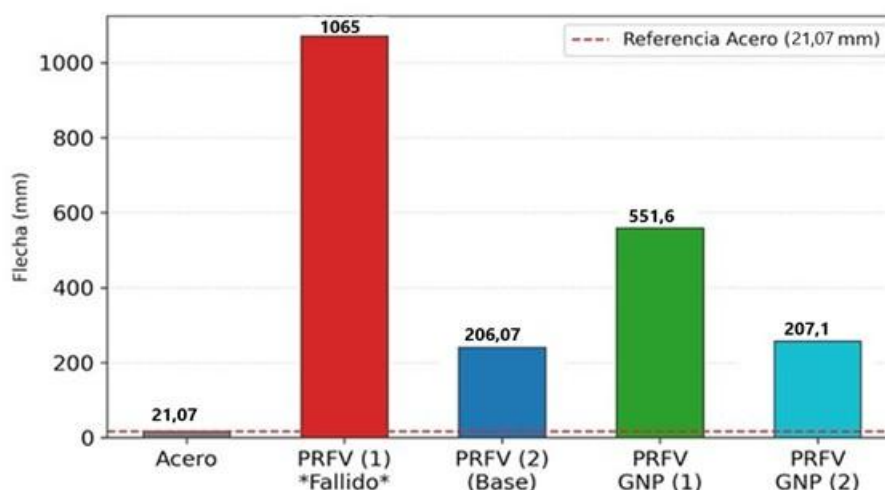


Figura 5-3 Flecha máxima por deformación elástica.

El análisis comparativo de la deflexión elástica, representado en la Figura 5-3, evidencia la disparidad de rigidez entre los materiales analizados bajo las mismas condiciones de carga. La línea de control, establecida por el comportamiento del acero naval (20,06 mm), sirve de referencia para constatar que el escenario PRFV (1) queda fuera de los márgenes de estabilidad estructural con una flecha crítica superior a 1.000 mm. El incremento de espesor en el PRFV (2) sitúa la flecha en 206,3 mm. La alternativa PRFV+GNP (1), optimizada en masa con 7,65 mm, alcanza 551,6 mm por su menor espesor; al mantener 10,96 mm en PRFV+GNP (2), la flecha se sitúa en 207,1 mm. Por tanto, GNP (1) maximiza la eficiencia másica, mientras que GNP (2) mantiene una respuesta de rigidez próxima a la del PRFV base equivalente.

En la Figura 5-4 se cuantifica el impacto del cambio de material en la masa lineal del perfil estructural, tomando como límite superior y línea de control los 93,07 kg/m característicos del Acero Naval. El gráfico ilustra visualmente el notable potencial de aligeramiento de los materiales compuestos, los cuales reducen de forma homogénea más de un 58% del peso estructural en sus configuraciones base. Destaca especialmente el escenario optimizado por espesor PRFV GNP (1), el cual, gracias a las propiedades mecánicas mejoradas por el uso de las nanoplaquetas de grafeno, registra el valor mínimo de masa con apenas 27,14 kg/m, lo que se traduce en una reducción neta del 70,8% respecto al acero tradicional sin comprometer la seguridad frente al fallo.

Es fundamental destacar aquí que la validación cruzada se ha cumplimentado íntegramente mediante el análisis exhaustivo de la viga-casco de sección cuadrada. Este elemento constituye el elemento estructural representativo de la construcción naval simplificado, permitiendo modelar de forma fidedigna el comportamiento de una viga-casco sometida a flexión longitudinal bajo cargas de escala real en toneladas. Los resultados obtenidos ratifican que el método numérico confirma con precisión los espesores equivalentes calculados analíticamente, cumpliendo así el objetivo técnico central del trabajo.

Por tanto, el modelado adicional de la sección en doble T se plantea exclusivamente como un estudio de comportamiento geométrico comparativo. Aunque los cálculos analíticos ya demuestran una mayor eficiencia en peso de las secciones abiertas, la arquitectura de viga cerrada (cajón) empleada en la validación FEM es la que ofrece la respuesta más robusta y conservadora para representar la integridad de un casco naval. Con la validación del Caso I (viga cuadrada), queda demostrada la madurez del procedimiento de simulación y la fiabilidad de las conclusiones sobre el potencial local de aligeramiento del 70,8% alcanzado con el PRFV dopado.

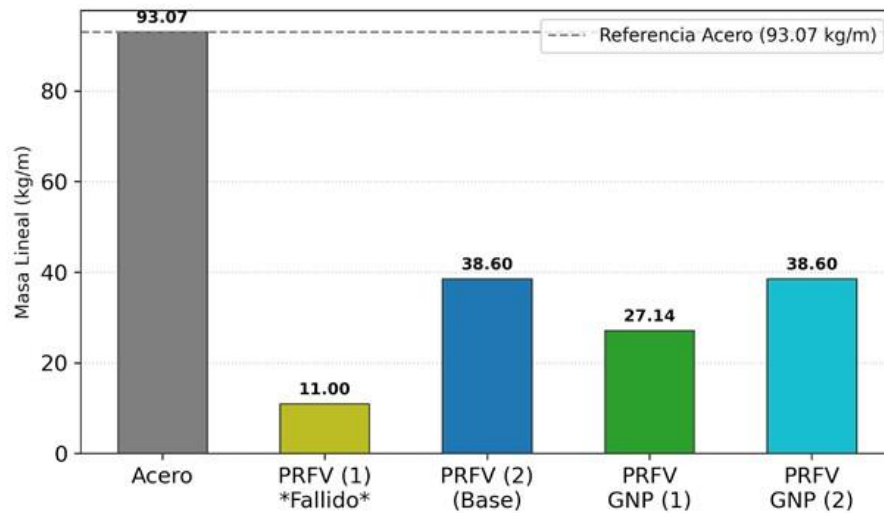


Figura 5-4 Masa lineal y eficiencia del peso.

5.3.3 Resultados de las vigas en doble T

El análisis de la sección en doble T consolida las conclusiones mecánicas obtenidas en la sección cuadrada, pero introduce un factor crítico de optimización geométrica fundamental para la distribución de esfuerzos axiales por flexión longitudinal (*arrufo y quebranto*). A diferencia de la viga-casco cuadrada, donde el esfuerzo cortante se redistribuye uniformemente por las paredes verticales laterales, el perfil en doble T optimiza de forma radical el empleo del material al concentrar el área resistente en las alas (representación de la cubierta y el fondo del buque), zonas sometidas a las máximas tensiones de tracción y compresión.

De acuerdo con los datos analíticos y numéricos consolidados (Tabla 4-4), la carga de límite elástico para la sección de referencia de acero naval A se sitúa en 322,42 kN. La simulación por elementos finitos (FEM) en Nastran In-CAD validó esta carga de límite elástico, arrojando un coeficiente de reserva mínimo de $SF = 1,0046$ en la fibra superior sometida a flexión, lo que arroja una convergencia matemática casi perfecta (error inferior al 0,5 %) respecto al modelo analítico de Navier-Bernoulli.

Al evaluar el comportamiento del composite de matriz polimérica con dopado de nanoplaquetas de grafeno al 0,5 % GNP bajo una configuración de espesor equivalente variable (Análisis B: espesor de alas=7,67 mm y espesor de alma= 15,33 mm), los resultados del software Nastran demuestran las ventajas mecánicas de la adición del nanomaterial. El mapeado de la ratio de resistencia estructural (Strength Ratio) bajo el criterio de fallo de Tsai-Wu se estabiliza firmemente en $SR = 1,0$ en las secciones centrales de máxima solicitación, confirmando que la viga de material compuesto es capaz de sustituir funcionalmente al acero naval soportando de forma íntegra los 322,42 kN de diseño.

La mayor trascendencia para el diseño naval de este análisis radica en la ganancia de eficiencia de peso. Mientras que el perfil de acero naval presenta una masa lineal de 74,23 kg/m, la sección equivalente en PRFV + 0,5 % GNP reduce esta magnitud estructural a 21,66 kg/m. Esto equivale a una reducción neta de masa del 70,8 % frente al acero tradicional. Este ahorro de peso estructural en elementos longitudinales primarios resulta crítico en buques de guerra modernos, pues incrementa de forma sustancial los márgenes de peso y estabilidad requeridos para absorber futuras obsolescencias y la instalación de sistemas de armas o sensores a lo largo del ciclo de vida operativo de la plataforma naval.

Este comportamiento a flexión en la sección en doble T no constituye una mera abstracción analítica de laboratorio, sino que representa la modelización estructural directa y a escala de la viga-buque de plataformas reales. Las alas de la doble T simulan el comportamiento cinemático de la cubierta resistente

y del fondo del casco donde se concentran los esfuerzos longitudinales críticos provocados por el oleaje, mientras que el alma equivalente representa los costados y mamparos longitudinales encargados de absorber el esfuerzo cortante y garantizar la rigidez torsional. Por consiguiente, la validación analítica y por elementos finitos (FEM) de este perfil demuestra que la sustitución del acero por el composite dopado con grafeno es perfectamente trasladable a la arquitectura de un buque real, ofreciendo una base científica robusta para justificar los márgenes de estabilidad, la reducción de desplazamiento y los retornos económicos calculados en este TFG.

En cuanto a la capacidad portante, si bien la limitación del tejido biaxial en compresión impide que el incremento del 40% en la resistencia de la matriz se traduzca de forma directa en un aumento proporcional de la carga de rotura global de la sección, el dopado con grafeno aporta una reserva de seguridad interna superior. Mientras que en el PRFV convencional el laminado se agota de forma homogénea ($SR=1,0$ en todas las capas), el PRFV+G presenta un $SR \approx 10$ en el 90 % de la sección cuadrada analizada, con un mínimo de 1,4 en el tejido biaxial comprimido, bajo la misma carga. Esto dota a la viga-buque de una mayor capacidad para absorber daños accidentales o picos de carga imprevistos antes de que el fallo se propague catastróficamente por la matriz

5.4 Resultados de viabilidad económica y operativa

A partir de los datos cualitativos y cuantitativos recabados durante las visitas técnicas y las entrevistas estructuradas a expertos del sector (detalladas en los Anexos III a VII), se ha procedido a modelar el impacto financiero de la sustitución del acero naval por el material compuesto avanzado (PRFV + 0,5% GNP). El análisis se fundamenta en la disociación entre el gasto de capital inicial (CAPEX) y los costes operativos y de mantenimiento (OPEX) a lo largo de un ciclo de vida estandarizado para plataformas navales militares, estimado en 30 años.

5.4.1 *Análisis del Coste del Ciclo de Vida (LCC) y Periodo de Retorno*

La representación gráfica del coste acumulado de la Figura 5-5 muestra que la alternativa en PRFV + GNP parte de un coste directo inicial de ejecución estructural superior. La proyección se extiende a 30 años para visualizar el ciclo de vida completo, mientras que el VAN se mantiene referido al horizonte descontado de 10 años.

1. Plan de mantenimiento y esquemas de pintura: el empleo de PRFV + GNP elimina la corrosión del sustrato metálico, pero no elimina todas las necesidades de sostenimiento de la obra viva. Mientras que el acero naval Grado A exige un ciclo recurrente de carenado, chorreado y aplicación de esquemas multicapa anticorrosivos, la solución compuesta mantiene la renovación periódica de la pintura antifouling. En coherencia con ello y basándose en un valor aportado por Rodman Polyships, el modelo económico adopta un ahorro del 90 % en el mantenimiento anticorrosivo anualizado, no una eliminación total de dicho coste.
2. Eficiencia energética operativa: la reducción de masa lineal estructural validada en los análisis mecánicos previos expresa un potencial local y no se traslada directamente al desplazamiento total del buque. Por ello, el modelo económico adopta una reducción estructural global conservadora del 39 %, que descuenta elementos no sustituidos, refuerzos y condicionantes de integración. Para el BAM, esta reducción conduce a un 9,32 % teórico mediante la ley del Almirantazgo y se rebaja al 8 % en el modelo económico; para el patrullero y el flotador, esta misma hipótesis arroja un ahorro de combustible del 15%.

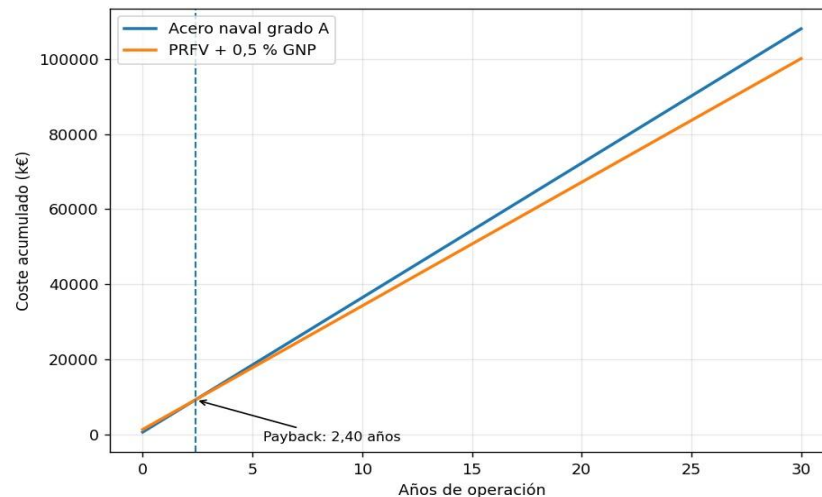


Figura 5-5 Proyección del ciclo de vida LCC para el BAM acumulado a 30 años

En la Figura 5-5, el eje de ordenadas representa el coste económico acumulado del escenario BAM, expresado en miles de euros, y el eje de abscisas representa los años de operación. Las curvas incorporan el coste directo inicial de ejecución estructural y los costes anuales absolutos de combustible y mantenimiento; la diferencia de sus pendientes equivale al ahorro anual $\Delta\text{OPEX} = 287.861,20 \text{ €/año}$. Con estos valores, el cruce de las curvas se sitúa en torno a 2,40 años para el escenario determinista base.

El análisis de sensibilidad sitúa el retorno entre 2,88 y 6,07 años, según las condiciones económicas y operativas consideradas, manteniéndose en todos los casos dentro del horizonte económico de 10 años.

La Figura 5-6, obtenida con el software *Matlab*, distingue entre los valores discretos obtenidos del modelo económico y las curvas cuadráticas empleadas únicamente como representación de tendencia. Los puntos ancla correspondientes a las plataformas de 6 m, 35 m y 94 m proceden directamente de los resultados económicos recogidos en la Tabla 4-26. Los valores intermedios incluidos en la Tabla 5-2 se han obtenido mediante una interpolación cúbica PCHIP por tramos, seleccionada por su capacidad para preservar la forma local de los datos y evitar oscilaciones artificiales entre los puntos ancla.

Para cada escenario se ha representado adicionalmente una curva de ajuste polinómico de segundo grado, de la forma:

$$y = ax^2 + bx + c$$

donde x representa la eslora en metros e y el periodo de retorno en años. Las ecuaciones mostradas en la figura se han obtenido a partir de los tres puntos ancla de cada escenario, por lo que las curvas cuadráticas atraviesan exactamente dichos valores de referencia. Por el contrario, los puntos PCHIP intermedios no tienen por qué coincidir con la parábola, ya que proceden de una técnica de interpolación distinta.

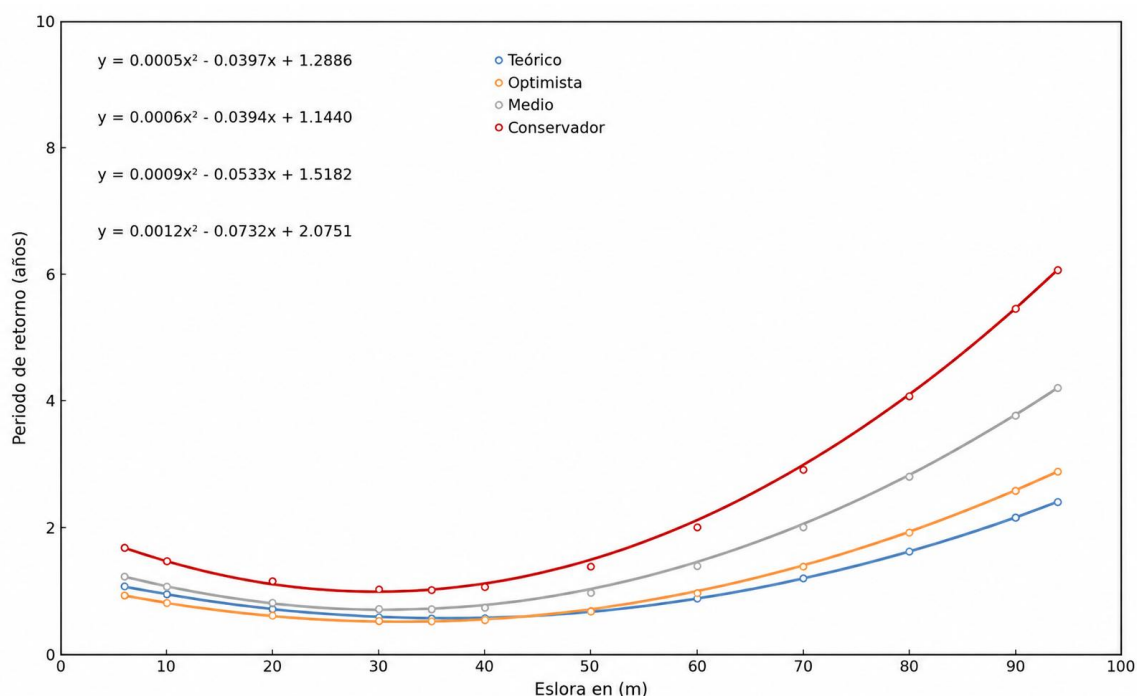


Figura 5-6. Periodos de retorno discretos y ajustes cuadráticos por mínimos cuadrados

Al analizar la geometría de la envolvente de incertidumbre, se constata empíricamente la existencia de una zona dulce de rentabilidad económica localizada en el espectro de esloras medias 20 y 45 metros de eslora, cuyo exponente óptimo es el Patrullero de 35 m. En este intervalo, la alta sensibilidad de las plataformas ligeras ante la reducción del desplazamiento estructural maximiza el ahorro operativo anual (Δ OPEX), permitiendo mitigar y absorber con enorme facilidad los sobrecostos industriales asociados a la manufactura del nanomaterial. Por el contrario, a partir de los 50 metros de eslora, la curva cuadrática experimenta un repunte exponencial en los plazos de amortización, alcanzando los 4,2 años (Caso Medio) y los 6,07 años (Caso Conservador) en la escala del BAM (94 metros). Está marcada concavidad demuestra que en grandes esloras el éxito del proyecto sigue siendo financieramente viable al quedar firmemente retenido dentro del horizonte económico de 10 años, pero advierte de que su rentabilidad dependerá críticamente de la futura estandarización normativa y de la optimización del proceso industrial de construcción lo que debemos ser prudentes a la hora de valorar esta opción. Los valores estimados para las esloras intermedias se recogen en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Periodos de retorno

(Puntos ancla calculados y valores intermedios PCHIP empleados como apoyo del ajuste (m y años)).

(m)	<i>Teórico</i>	<i>Optimista</i>	<i>Medio</i>	<i>Conservador</i>
6	1,07	0,93	1,23	1,68
10	0,95	0,81	1,08	1,47
20	0,71	0,62	0,83	1,15
30	0,59	0,53	0,73	1,03
35	0,57	0,52	0,72	1,02
40	0,58	0,54	0,75	1,06
50	0,68	0,68	0,97	1,38
60	0,89	0,97	1,39	2,01
70	1,20	1,38	2,01	2,91
80	1,62	1,92	2,81	4,06
90	2,16	2,58	3,77	5,45
94	2,40	2,88	4,20	6,07

5.5 Resultado final del análisis multicriterio (TOPSIS)

Con el propósito de mitigar la subjetividad y unificar las dimensiones técnicas (flecha, masa, espesores), industriales (madurez y procesos) y financieras (CAPEX, OPEX y *payback*) analizadas en este TFG, se aplicó el método de decisión multicriterio TOPSIS. Los resultados numéricos del índice de cercanía relativa a la solución ideal (C_i) que podemos ver representadas en la Figura 4-24, arrojaron los siguientes resultados y orden de preferencia jerárquica:

El acero naval arroja el valor superior de (C_i). Pese a sus desventajas en peso y mantenimiento, continúa posicionándose en el primer lugar de la matriz de decisión general cuando los pesos de los criterios ponderan con fuerza la madurez logística, la facilidad de reparación estructural en arsenales militares y el bajo coste de adquisición inicial.

El PRFV + 0,5% GNP presenta el siguiente valor de (C_i) y se consolida sólidamente como la segunda opción con mayor puntuación y la primera dentro de la familia de los materiales no ferrosos. Supera al PRFV convencional (0% GNP) en prácticamente todos los escenarios simulados debido a que la penalización económica marginal del grafeno queda ampliamente compensada por la ganancia en rigidez estructural a bajas adiciones y las ventajas multifuncionales añadidas (baja firma magnética y apantallamiento electromagnético), variables de vital importancia en buques de acción marítima o cazaminas modernos

Por otra parte, del análisis de sensibilidad del método multicriterio TOPSIS, los resultados demuestran que, si bien el acero naval grado A es la solución más sólida en entornos de construcción convencional por su bajo CAPEX y madurez, existe un punto de inflexión tecnológico crítico: en escenarios donde la misión prioriza la ligereza para aumentar la carga útil y la baja firma magnética (resistencia a la corrosión), el PRFV dopado se posiciona como la opción preferente, superando al acero en el coeficiente de cercanía relativa (C_i).

Este análisis confirma que el grafeno constituye una solución de ingeniería estratégica para nichos operativos específicos de la Armada, donde las ventajas en el OPEX y la eficiencia estructural justifican el diferencial de inversión inicial. En base a lo definido en (4.4.4) construimos la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Tabla de escenarios considerados para el estudio de sensibilidad

<i>Enfoque estratégico</i>	<i>Pesos de los criterios (w_j)</i>	<i>Ranking alternativas (C_i)</i>	<i>Material óptimo</i>
Base	1.Coste	1º Acero Naval (0,55)	Acero Naval
	2.Escalabilidad:	2º PRFV + 0,5% GNP (0,47)	
	3. Corrosión	3º PRFV Base (0,42)	
	4.Peso:		
	5.Rigidez		
Táctico	1.Peso:	1º PRFV + 0,5% GNP (0,72)	PRFV + 0,5% Grafeno
	2.Corrosión	2º PRFV Base (0,65)	
	3.Rigidez	3º Acero Naval (0,38)	
	4.Escalabilidad		
	5.Coste		
Emergencia	1.Rigidez	1º Acero Naval (0,84)	Acero Naval
	2.Coste	2º PRFV + 0,5% GNP (0,39)	
	3.Escalabilidad	3º PRFV Base (0,18)	
	4.Peso		
	5.Corrosión		

Gráficamente podemos ver todas las opciones representadas en la Figura 5-7 en la que vemos la clasificación de las tres posibilidades analizadas.

La variabilidad de las barras en la Figura 5-7 valida la sensibilidad y la utilidad del algoritmo TOPSIS como una verdadera herramienta de diseño conceptual en la ingeniería naval. El gráfico demuestra que el PRFV dopado con grafeno no compite como un sustituto genérico del acero, sino como una solución tecnológica de nicho altamente eficiente, cuya ventana de viabilidad se abre decisivamente en escenarios tácticos donde el peso y el ciclo de vida operativa son prioritarios frente a las restricciones presupuestarias inmediatas.

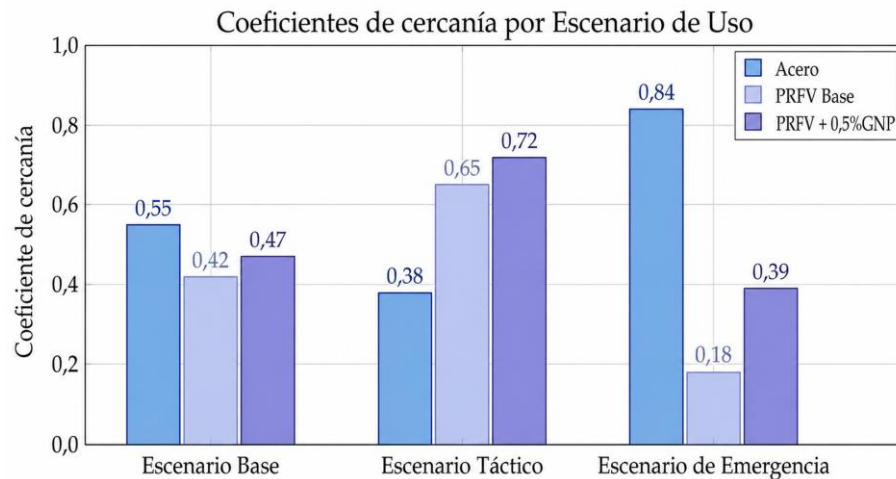


Figura 5-7 Coeficientes de cercanía con respecto a los escenarios planteados.

La comparación entre escenarios confirma que el método TOPSIS resulta útil como herramienta de apoyo a la decisión en fase conceptual, al permitir visualizar cómo varía la jerarquía de alternativas cuando cambian las prioridades de diseño. No obstante, los resultados deben interpretarse dentro del marco de hipótesis adoptado y no como una demostración concluyente de superioridad absoluta de un material sobre otro. Su principal valor en este trabajo reside en integrar de forma ordenada variables estructurales, económicas y de madurez industrial en una evaluación comparativa coherente.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Las conclusiones del presente trabajo se estructuran a continuación en correspondencia directa con los objetivos planteados en 1.2, con el fin de valorar de forma sintética los hitos técnicos alcanzados, las limitaciones del estudio y el alcance real de los resultados obtenidos.

6.1 Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada confirma que el grafeno presenta un interés técnico real como aditivo funcional en matrices poliméricas y recubrimientos aplicables al ámbito naval. La literatura analizada muestra mejoras potenciales en propiedades como resistencia específica, rigidez a bajas adiciones en composites, durabilidad frente al medio agresivo y funcionalidad multifísica del material. No obstante, también se constata una limitación relevante: la mayor parte de la evidencia disponible procede de estudios de laboratorio, probetas o prototipos aislados, por lo que sigue existiendo una brecha entre los resultados experimentales publicados y la validación de estas soluciones en estructuras navales reales, certificables y mantenibles en servicio. En consecuencia, el grafeno debe interpretarse, en el estado actual de la técnica, como una tecnología prometedora pero todavía condicionada por su madurez industrial, normativa y económica.

El análisis mecánico comparado sobre un elemento representativo tipo viga-casco permite concluir que el acero naval continúa ofreciendo la solución más equilibrada cuando se priorizan simultáneamente rigidez, capacidad resistente y simplicidad constructiva. Por su parte, el PRFV presenta ventajas claras en reducción de masa y resistencia a la corrosión, pero su menor rigidez y su menor capacidad resistente a igualdad geométrica obligan a introducir compensaciones de diseño para alcanzar prestaciones equivalentes. El PRFV dopado con grafeno mejora el comportamiento del PRFV base y muestra una relación más favorable entre eficiencia estructural y peso, aunque dicha mejora no resulta, por sí sola, suficiente para desplazar al acero como solución general en estructuras primarias de buques convencionales. Por tanto, el estudio apunta a que el mayor valor del grafeno se encuentra, por ahora, en la optimización de soluciones compuestas específicas, y no en la sustitución directa e inmediata del acero naval.

La comparación entre el análisis analítico simplificado y el análisis por elementos finitos permite afirmar que el empleo conjunto de ambas herramientas resulta útil como metodología comparativa en fase conceptual. El cálculo analítico proporciona una referencia clara para interpretar tendencias globales de rigidez, resistencia y masa lineal, mientras que el FEM permite observar con mayor detalle la distribución estructural de la respuesta. Sin embargo, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del alcance del modelo adoptado. Aunque el planteamiento FEM se ha orientado a representar de forma más adecuada la naturaleza laminar y anisótropa de los composites, este análisis no sustituye un dimensionamiento reglamentario completo ni una validación experimental certificada. En consecuencia,

la validación alcanzada en este TFG debe entenderse como preliminar y comparativa, suficiente para apoyar tendencias de comportamiento, pero no para cerrar de forma definitiva la aptitud estructural del material en servicio real.

Una de las aportaciones clave de este estudio ha sido la distinción entre el óptimo mecánico (0,5% GNP) y el óptimo operativo (1,0% GNP). Mediante la validación cruzada entre el cálculo analítico y el modelo FEM de la viga-casco, se demuestra que, aunque la máxima eficiencia estructural se alcanza con dosis bajas, el uso de dosis entre 0,5% y 1% de grafeno constituye una solución equilibrada para la Armada. Esta configuración permite un potencial local de reducción de masa lineal del 70,8% manteniendo la resistencia equivalente. Además, asegura la viabilidad industrial de fabricación y aporta ventajas estratégicas en blindaje electromagnético y reducción de firmas, posicionando al PRFV dopado como un material disruptivo frente al acero naval en esloras cortas y medias.

Desde el punto de vista normativo, el trabajo confirma que el principal obstáculo para la implantación estructural del grafeno en construcción naval no es únicamente mecánico, sino también reglamentario. La construcción naval exige trazabilidad de propiedades, criterios de seguridad, procesos repetibles y aceptación por parte de las sociedades de clasificación. Bajo este marco, el acero parte con una ventaja decisiva por su total integración en la práctica industrial y normativa, mientras que las soluciones en PRFV y, especialmente, las dopadas con grafeno, requieren todavía mayor evidencia técnica, ensayos normalizados y validación específica antes de poder considerarse alternativas maduras en estructuras principales. Por tanto, la vía de implantación más realista del grafeno a corto y medio plazo parece situarse en aplicaciones no primarias o de incorporación progresiva, tales como recubrimientos funcionales, sensores estructurales o componentes secundarios avanzados.

El análisis económico desarrollado indica que la sustitución parcial o selectiva de materiales tradicionales por soluciones compuestas puede generar ventajas operativas asociadas, principalmente, a la reducción de peso y a la disminución de necesidades de sostenimiento frente a la corrosión. No obstante, el resultado económico está fuertemente condicionado por el perfil operativo del buque, por la escala de fabricación, por el coste inicial del material y por la madurez del proceso industrial. En este sentido, el estudio sugiere que la viabilidad económica del PRFV dopado con grafeno no puede expresarse como una conclusión universal, sino como una posibilidad dependiente del escenario de empleo. Así, los beneficios potenciales existen, pero deben interpretarse con cautela y siempre dentro del carácter preliminar del modelo de LCC adoptado en este trabajo.

La síntesis global de resultados permite concluir que el grafeno no debe considerarse, a día de hoy, un sustituto general del acero naval en estructuras principales, sino una tecnología con potencial estratégico para nichos concretos de aplicación naval. Su mayor interés reside en su capacidad para mejorar materiales compuestos existentes, aportar funcionalidades avanzadas y abrir líneas de innovación con valor añadido en sostenimiento, monitorización y reducción de peso. Las principales barreras identificadas para su implantación son la falta de validación estructural a gran escala, la inmadurez normativa, la dificultad de justificar económicamente su uso fuera de ciertos escenarios y la necesidad de procesos industriales estables y repetibles. En consecuencia, el resultado más sólido del presente TFG no es afirmar una sustitución inmediata del acero por el grafeno, sino demostrar que el grafeno representa una línea de desarrollo técnicamente interesante cuya incorporación al ámbito naval deberá ser gradual, selectiva y respaldada por validación adicional.

6.1.1 Conclusión general del trabajo.

En términos globales, el presente TFG permite responder al objetivo principal planteado: la viabilidad técnica y económica del PRFV y del PRFV dopado con grafeno frente al acero naval solo puede sostenerse, con el grado de evidencia aquí reunido, en contextos específicos y no como conclusión general aplicable a toda la construcción naval militar. El acero permanece como la alternativa más robusta cuando se consideran conjuntamente rigidez, resistencia, coste, trazabilidad normativa y madurez industrial. El PRFV dopado con grafeno, sin embargo, emerge como la opción más prometedora dentro del campo de los materiales compuestos estudiados, especialmente en escenarios

donde el peso, la durabilidad y la funcionalidad adicional tienen un valor operativo alto. El trabajo, por tanto, no cierra el debate, pero sí contribuye a ordenarlo técnicamente y a situar el grafeno en una posición realista dentro del proceso de innovación naval.

6.1.2 Limitaciones del estudio.

Los resultados obtenidos deben interpretarse teniendo en cuenta varias limitaciones. En primer lugar, el análisis estructural se ha realizado sobre un modelo representativo simplificado y no sobre un buque completo dimensionado reglamentariamente. En segundo lugar, parte de las propiedades empleadas procede de literatura científica y técnica, con la variabilidad inherente a las condiciones de ensayo y a la comparabilidad entre fuentes. En tercer lugar, el análisis FEM tiene carácter comparativo y preliminar, y requeriría validación experimental adicional para consolidar sus resultados. Finalmente, la evaluación económica del ciclo de vida debe entenderse como una aproximación orientativa, sensible a hipótesis operativas, energéticas e industriales. Estas limitaciones no invalidan el interés del estudio, pero sí obligan a interpretar sus conclusiones con el grado de prudencia técnica propio de una investigación exploratoria de TFG.

6.2 Líneas futuras

Como líneas futuras de trabajo, se considera prioritario desarrollar estudios en la materia que permitan:

1. Ampliar la base experimental con ensayos normalizados de tracción, flexión, fatiga, impacto y envejecimiento salino en laminados PRFV con distintos porcentajes de grafeno
2. Desarrollar modelos FEM de mayor fidelidad con laminados certificados y criterios de daño progresivo;
3. Contrastar el comportamiento hidrodinámico y el ahorro operativo mediante campañas experimentales o simulación CFD;
4. Estudiar aplicaciones de implantación más inmediata, como recubrimientos anticorrosivos, sistemas de monitorización estructural y componentes secundarios; y
5. Analizar la integración normativa de estos materiales en el marco de las sociedades de clasificación para aplicaciones navales específicas.
6. Validación experimental mediante ensayos de blindaje EMI y pruebas de infusión real con cargas del 1%

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Abunu, M. Birhan, B. Negash y T. Batu, «Integrating composite materials throughout the military sector: A review,» *Advances in Materials Science and Engineering*, p. 9931653, 2026.
- [2] European Commission, «Commission Staff Working Document for a European Defence Industry Programme and a framework of measures to ensure the timely availability and supply of defence products (EDIP),» Bruselas, 2024.
- [3] Secretaría Técnica General, «Ministerio de Defensa,» 2020. [En línea]. Available: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/e/t/etid_estrategia_de_tecnologia_e_innovacion_para_la_defensa_2020.pdf. [Último acceso: 30 Enero 2026].
- [4] Jefatura de Apoyo Logístico (JAL), *Nuevos materiales. Posibilidades de la utilización del grafeno y materiales compuestos en la construcción naval*, Madrid: Armada. Documento de propuestas de estudios, 2025.
- [5] J. Graham-Jones, J. Summerscales y B. Moutik, Is a 100 m composite ship possible? What are the critical issues?, Reino Unido: Advance Materials: Building the next warship, 2024.
- [6] A. Jurado y al, «FIBRESHIP, el gran reto de usar materiales compuestos en la construcción naval,» *Scipedia*, 2022.
- [7] J. Geetisubhra y P. John, «A review on recent advances in graphene oxide-based composite coatings for anticorrosion applications,» *Progress in Organic Coatings*, vol. 172, 2022.
- [8] M. Kelly, A. Erbe, I. Hallsteinsen y H. Lein, «The antifouling mechanism and efficacy of graphene based nanomaterials in composite coatings against marine diatoms,» *ACS Omega*, 2025.
- [9] K. S. Novoselov y al, «Electric field effect in atomically thin carbon films,» *Science*, 2004.
- [10] Q. Abbas, P. A. Shinde, M. A. Abdelkareem, A. H. Alami, M. Mirzaeian, A. Yadav y A. G. Olabi, «Graphene Synthesis Techniques and Environmental Applications,» *Materials*, vol. 15, nº 21, p. 7804, 2022.

- [11] X. Huang, Z. Yin, S. Wu y al, «Graphene-Based Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications,» *Small*, vol. 7, nº 14, pp. 1876-1902, 2011.
- [12] M. S. Chae, T. H. Lee, K. R. Son, T. H. Park, K. S. Hwang y T. G. Kim, «Electrochemically metal-doped reduced graphene oxide films: Properties and applications,» *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 40, pp. 72-80, 2020.
- [13] H. Jafarlou, K. Hassannezhad y G. R. Marami, «Enhancement of mechanical properties of low carbon steel joints via graphene addition,» *Materials Science and Technology*, vol. 34, nº 4, pp. 455-467, 2018.
- [14] C. Liu, X. Hunag, Y. Y. Wu, X. Deng, Z. Zheng y B. Yang, «Studies on mechanical properties and durability of steel fiber reinforced concrete incorporating graphene oxide,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 130, 2022.
- [15] R. A. Borse, M. B. Kale, S. H. Sonawane y Y. Wang, «Fluorographene and Its Composites: Fundamentals, Electrophysical Properties, DFT Studies, and Advanced Applications,» *Advanced Functional Materials*, 2022.
- [16] Z. Y. Xue, X. J. Li, J. H. Chu, M. M. Li, D. N. Zou y L. B. Tong, «Greatly enhanced corrosion/wear resistances of epoxy coating for Mg alloy through a synergistic effect between functionalized graphene and insulated blocking layer,» *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 12, nº 1, pp. 332-344, 2024.
- [17] A. R. Urade, I. Lahiri y K. S. Suresh, «Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review,» *The Journal of the Minerals*, 2023.
- [18] A. V. Ivanov y otros, «Corrosion-resisting properties of graphene-reinforced epoxy coating,» 2025.
- [19] D. G. Trikkaliotis, A. K. Christoforidis, A. C. Mitropoulos y G. Z. Kyzas, «Graphene Oxide Synthesis, Properties and Characterization Techniques: A Comprehensive Review,» *ChemEngineering*, 2021.
- [20] E. Patsnap, «Graphene Composites in Marine Applications: Performance Analysis,» 2024. [En línea]. Available: <https://eureka.patsnap.com/report-graphene-composites-in-marine-applications-performance-analysis> .
- [21] X. Yao, I. A. Kinloch y M. A. Bissett, «Fabrication and Mechanical Performance of Graphene Nanoplatelet/Glass Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites,» *Frontiers in Materials*, vol. 8, nº 773343, 2021.
- [22] S. Nagesh, R. Ramachandra, P. Aruna Kumara, P. Kanti, C. Prakash y S. Kumar, «Effect of graphene addition on tensile, flexural, and hardness behavior of GFRP composites,» *PLoS One*, vol. 21, nº 1, 2026.
- [23] D. F. Smaradhana, A. R. Prabowo y A. N. F. Ganda, «Exploring the potential of graphene materials in marine and shipping industries -A technical review for prospective application on ship operation and material-structure aspects,» *Journal of Ocean Engineering and Science*, vol. 6, nº 3, pp. 299-316, 2021.
- [24] A. Kumar, A. A. Lakshmi, M. S. Bisht, D. Varshney y S. Sreenivasa, «The Potential of Graphene in the Structural Materials for Marine and Ship Architectures,» *International Journal of Maritime Engineering*, 2025.

- [25] Grafeno.co, «Graphenano presenta el primer barco fabricado con grafeno del mundo,» 2024. [En línea]. Available: <https://grafeno.co/graphenano-presenta-primer-barco-grafeno/>.
- [26] G. nanotechnologies, «Fabricación graphenano one,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.graphenano.com/>.
- [27] M. Kumar, G. Arora y M. Pal, «Graphene Based Polymer Nano-composites for the Prevention of Corrosion,» *Journal of Research in Medical and Dental Science*, 2022.
- [28] L. Wijewickrama, J. Jeewantha, G. I. P. Perera, O. Alajarmeh y J. Epaarachchi, «Fiber-Reinforced Composites Used in the Manufacture of Marine Decks: A Review,» *Polymers*, vol. 17, n° 2345, 2025.
- [29] G. Harris, «Lloyd's Register approves GIT Coatings' graphene hull coating XGIT-Force,» *Marine Industry News*, 17 marzo 2026. [En línea]. [Último acceso: 7 Mayo 2026].
- [30] First Graphene Ltd., «Successful Trial in FRP Structures Opens Up the Global Boatbuilding Market,» Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://firstgraphene.net/successful-trial-in-frp-structures-opens-up-the-global-boatbuilding-market/>. [Último acceso: 7 Mayo 2026].
- [31] A. G. D'Aloia, F. Marra, A. Tamburrano, G. De Bellis y M. Sarto, «Electromagnetic absorbing properties of graphene–polymer composite shields,» *Carbon*, vol. 73, p. 175–184, 2014.
- [32] G. Cui, Z. Peng, Z. Liu, H. Ci, R. Liu, M. Li, H. Wang y Z. Liu, «Flexible Graphene@Silica Fabric Metasurface for Electromagnetic Wave Absorption on High-Speed Aircraft,» *Advanced Materials*, vol. 38, n° 4, p. 16254, 2026.
- [33] I. Esteve-Adell, M. Gil-Agusti, L. Z. S. d. Zaitogui, A. Quijano-López y M. García-Pellicer, «Aplicaciones del grafeno en sistemas de almacenamiento de energía,» *Anales de Química de la Real Sociedad Española de Química*, 2020.
- [34] I. Cohen, J. Kelley, D. Wetz y J. Heinzl, «Evaluation of a Hybrid Energy Storage Module for Pulsed Power Applications,» *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, p. 2948–2955, 2014.
- [35] D. Wetz, P. Novak, B. Shrestha, J. Heinzl y S. Donahue, «Electrochemical Energy Storage Devices in Pulsed Power,» *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, p. 3034–3042, 2014.
- [36] M. Anas, M. A. Nasir y Z. Asfar, «Structural health monitoring of GFRP laminates using graphene-based smart strain gauges,» *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 40, 2018.
- [37] D. F. Akram Zitoun, N. Jayasree, S. Omairey, F. Oikonomidis, Z. Stoeva y M. Kazilas, «Graphene-based strain sensing in composites for structural and health monitoring applications,» *SN Appl. Sci.*, vol. 4, n° 58, 2022.
- [38] T. G. Ltd., *Talga's New Graphene Coating Starts Large Scale Trial, comunicado a la ASX*, Perth, 2019.
- [39] T. G. Ltd., *Trial Milestone for Graphene Ship Coating*, Perth: TLG, 2021.
- [40] B. Liu, G. Kong, G. Su, C. Che y D. Lai, «Research on the mechanism of improving the corrosion resistance of waterborne zinc-rich coatings by polydopamine-modified graphene,» *Progress in Organic Coatings*, vol. 211, 2026.

- [41] S. Sabiote, «Trabajo de investigación sobre el comportamiento en el entorno marino de materiales poliméricos con aditivos antifouling,» *Universidad de Cantabria*, 2021.
- [42] A. Salmasi, J. Abraham y F. Salmasi, «Prospects for Application of Nanotechnology in Marine Industries: A Brief Review,» *International Series in Science and Technology*, 2022.
- [43] P. Carrasco, *Apuntes de Teoría del Buque y construcción naval. Capítulo 11: esfuerzos estructurales en aguas tranquilas.*, Marín, 2025.
- [44] Y. Cho, K. H. Jeon, S. B. Lee, H. Park y I. Lee, «Evaluation of in-service speed performance improvement by means of FDR-AF marine coating based on ISO 19030 standard,» *Scientific Reports*, vol. 11, nº 1, p. 1062, 2021.
- [45] L. Tian, Y. Wang, Z. Li, H. Mei y Y. Shang, «The thermal conductivity-dependent drag reduction mechanism of water droplets controlled by graphene/silicone rubber composites,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 85, p. 363–369, 2017.
- [46] N. J. Gianaris y J. D. Russell, Composites, OH, USA: ASM International, 2026.
- [47] K. Abdurohman, R. A. Pratomo, R. Hidayat, R. A. Ramadhan, T. S. Nurtiasto, R. Ardiansyah y M. G. PPP, «A Comparison of Vacuum Infusion, Vacuum Bagging, and Hand Lay-Up Process on The Compressive and Shear Properties of GFRP Materials,» *International Journal of Oceans and Oceanography*, vol. 21, pp. 39-50, 2023.
- [48] D. Shiva, «Comparison of mechanical properties of fiber glass reinforced composites and carbon fiber reinforced composites with polyester resin,» *AIP Conference Proceedings*, 2025.
- [49] G.-L. Song, C. Zhang, X. Chen y D. Zheng, «Galvanic activity of carbon fiber reinforced polymers and electrochemical behavior of carbon fiber,» *Corrosion Communication*, 2021.
- [50] F. Rubino, A. Nisticò, F. Tucci y P. Carlone, «Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review,» *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020.
- [51] A. Mas, «El grafeno llega a la Copa América: barcos más ligeros y resistentes,» *Expansión*, [En línea]. Available: <https://www.expansion.com/nauta360/regatas/2018/04/30/5ae1f68746163f941e8b4589.htm> l. [Último acceso: 23 febrero 2026].
- [52] L. Titire y C. Muntenita, «Ballistic Impact Study of an Aramid Fabric by Changing the Projectile Trajectory,» *Fibers*, vol. 13, nº 1, p. 8, 2025.
- [53] M. Mehdikhani, L. Gorbatikh, I. Verpoest y S. V. Lomov, «Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance,» *Journal of Composite Materials*, vol. 53, nº 12, p. 1579–1669, 2018.
- [54] M. Agwa, S. Youssef, S. Ali-Eldin y M. Megahed, «Integrated vacuum assisted resin infusion and resin transfer molding technique for manufacturing of nano-filled glass fiber reinforced epoxy composite,» *Journal of Industrial Textiles*, vol. 51, nº 1, 2022.
- [55] C. Pérez Alonso, «Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval,» UPC, Barcelona, 2016.
- [56] I. Gago Velasco, «Nanocompuestos basados en materiales grafénicos para aplicaciones de ingeniería,» UPCT, Cartagena, 2023.

- [57] H. Satoh, A. Morita y Y. Arao, «Differential Effects of Adding Graphene Nanoplatelets on the Mechanical Properties and Crystalline Behavior of Polypropylene Composites Reinforced with Carbon Fiber or Glass Fiber,» *Materials*, vol. 18, nº 5, p. 8926, 2025.
- [58] J. Mendes, «Statistical Optimization of Graphene Nanoplatelet-Reinforced Epoxy Nanocomposites via Box-Behnken Design for Superior Flexural and Dynamic Mechanical Performance,» *Polymers*, vol. 17, nº 23, p. 3218, 2025.
- [59] A. Namdev, A. Telang y R. Purohit, «Investigation of mechanical behavior of graphene nanoplatelets and carbon fiber-reinforced hybrid laminate composites under different environment aging conditions,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 238, 2023.
- [60] S. Khammassi, M. Tarfaoui, Y. Qureshi y H. Benyahia, «Mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced epikote 828 under dynamic compression,» *Mechanics of Materials*.
- [61] S. J. Lee, S. J. Yoon y I. Y. Jeon, «Graphene/Polymer Nanocomposites: Preparation, Mechanical Properties, and Application,» *Polymers*, 2022.
- [62] U. R. Hashim, A. Jumahat y M. Jawaaid, «Mechanical Properties of Hybrid Graphene Nanoplatelet-Nanosilica Filled Unidirectional Basalt Fibre Composites,» *Nanomaterials*, vol. 11, nº 6, 2021.
- [63] M. Rafiee, S. Hosseini Rad, F. Nitzsche, J. Laliberte y M. R. Labrosse, «Significant Fatigue Life Enhancement in Multiscale Doubly-Modified Fiber/Epoxy Nanocomposites with Graphene Nanoplatelets and Reduced-Graphene Oxide,» *Polymers*, vol. 12, nº 9, pp. 2135-2020, 2020.
- [64] M. Hussain y otros, «Fatigue life enhancement of fibre-reinforced composites: A state-of-the-art review and outlook,» *Results in Engineering*, vol. 28, 2025.
- [65] A. A. e. al., «Enhanced barrier, mechanical and viscoelastic properties of graphene oxide embedded glass fibre/epoxy composite for marine applications,» *Construction and Building Materials*, vol. 268, 2021.
- [66] S. T. e. al., «Enhancing marine composite performance: The role of Cu, Al, and graphene nanofillers in seawater-aged glass fiber epoxy composites,» *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, pp. 9713-9725, 2025.
- [67] Bureau Veritas, *NR 467 Rules for the Classification of Steel Ships, Part C – Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection*, París, 2026.
- [68] Bureau Veritas, «NR 467 Rules for the Classification of Steel Ships, Part B – Hull and Stability,» París, , 2026.
- [69] IMO, *Resolución MSC.307(88): International Code for Application of Fire Test Procedures*, Londres, 2010.
- [70] International Organization for Standardization, *ISO 12215-7:2020 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 7: Determination of loads for multihulls and of their local scantlings using ISO*, Suiza, 2020.
- [71] International Organization for Standardization, «ISO/TS 9651:2025, Nanotechnologies - Classification framework for graphene-related 2D materials,» Ginebra, 2025.

- [72] Det Norske Veritas, «DNV-ST-C501, Composite components,» DNV AS, Noruega, 2022.
- [73] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Orden ICT/739/2022, de 28 julio, por la que se establecen las bases reguladoras para la concesión de ayudas a actuaciones de integración y transformación de la cadena de valor industrial del sector naval, dentro del Proyecto Estratégico para la Recuperaci,» de *Boletín Oficial del Estado*, Madrid, 2022.
- [74] Turismo, Ministerio de Industria y, «PERTE para la industria Naval,» [En línea]. Available: <https://www.mintur.gob.es/es-es/recuperacion-transformacion-resiliencia/paginas/perte-naval.aspx>. [Último acceso: 27 Enero 2026].
- [75] IRS, «Structural Assessment of Ships based on Finite Element Method,» 2024. [En línea]. Available: https://www.irclass.org/media/7619/guidelines-on-finite-element-methods_irs-g-des-05_rev01_dec-2024.pdf. [Último acceso: 2 Febrero 2026].
- [76] J. Bardiani, C. Oppezzo, A. Manes y C. Sbarufatti, «An Inverse FEM for Structural Health Monitoring of a Containership: Sensor Network Optimization for Accurate Displacement, Strain, and Internal Force Reconstruction,» *Sensors*, 2025.
- [77] D. E. Torralba Ben-Amar, *Analytical and numerical determination of the hull girder deflection of inland navigation vessels.*, Cartagena: UPCT, 2015.
- [78] B. Grove, D. Patton y B. Ma, «Microscopic-to-macroscopic finite element analysis for predicting polymer-graphene nanocomposite laminate mechanical strength,» *Polym. Compos*, vol. 46, p. S40–S53, 2025.
- [79] D. Bolf, M. Hadjina, A. Zamarin y T. Matulja, «Methodology for composite materials shrinkage definition for use,» *Scientific Journal of Maritime Research*, n° 35, pp. 267-274, 2021.
- [80] H. I. Monsalve Gil, *Diseño de uniones para perfiles pultruidos fabricados en PRFV mediante modelado FEM*, Colombia: Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2026.
- [81] C. Contreras Hermosilla, *Manual práctico de Autodesk-Inventor*, Stanford: Crative Commons, 2016.
- [82] Bureau Veritas, «NR 546-Hull in Composite, Plywood, and High Density Polyethylene Materials,» Bureau Veritas, 2022.
- [83] E. K. Zavadskas, A. Mardani, Z. Turskis, A. Jusoh y K. M. Nor, «Development of TOPSIS Method to Solve Complicated Decision-Making Problems - An Overview on Developments from 2000 to 2015,» *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 15, n° 3, pp. 645-682, 2016.
- [84] I. Taufiq Daulay y A. A. B. Dinariyana, «Application Of a Combination of AHP and TOPSIS Methods in Shipyard Selection,» *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 8, n° 4, pp. 658-666, 2023.
- [85] T. Rizwan, S. A. El Rahimi, R. Thaib y M. Arif, «Optimal Shipyard Model Selection for Kutaraja Fishing Port, Aceh, Indonesia Using Fuzzy AHP and TOPSIS,» *Journal Ocean Eng. Technology*, vol. 39, n° 4, pp. 370-378, 2025.

- [86] J. V. Araujo y al., «Selection of a vehicle for Brazilian Navy using the multi-criteria method to support decision-making TOPSIS-M,» *Procedia Computer Science*, vol. 221, pp. 261-268, 2023.
- [87] O. H. Arican, «Arican OH Understanding the core determinants of bunker supply vessel selection for maritime industry: an integrated fuzzy-AHP and fuzzy-TOPSIS approach,» *Maritime Business Review*, vol. 11, nº 1, pp. 21-38, 2026.
- [88] M. Mert Tekeli, E. Bal Besikci, O. Arslan y otros, «Application of IT2Fs-AHP and TOPSIS modeling for performance analysis of tank coatings in chemical tankers,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 238, 2023.
- [89] M. Kirmizi, S. Karakas y H. Uçar, «Selecting the Optimal Naval Ship Drainage System Design Alternative Based on Integer Linear Programming, TOPSIS, and Simple WISP Methods,» *Journal of Ship Production Desing*, vol. 39, nº 2, pp. 63-74, 2023.
- [90] C. Muriana, R. Miceli, G. Aiello y M. Muzammil Farooqi, «TOPSIS MCDM approach for the comparison of traditional and innovative ship propulsion systems,» de *International Conference on Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering (BdKCSE)*, Bankya, 2025.
- [91] E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, vol. 44, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [92] A. Popa, M. G. Manea y M. V. Ristea-Komornicki, «FEM Structural Analysis for Ship's Beam Modification: A Case Study,» *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, pp. 15848-15853, 2024.
- [93] A. Pintilie, «Optimization of bulk carrier hull design through CAD modelling and FEM structural analysis – a case study,» *Results in Engineering*, 2025.
- [94] P. A. Caridis, «Global Strength of Ships: Analysis and Design Using Mathematical Methods,» *Cambridge University Press*, 2025.
- [95] Organización Marítima Internacional, «Orientación revisada que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas en condiciones meteorológicas y estados de la mar adversos,» Comité de Seguridad Marítima, 2007.
- [96] A. Navarro Manso, Interviewee, *Perspectivas de la construcción naval modular y optimización de procesos en cascos de acero Grado A. (Director de Astilleros Armón Navia)*. [Entrevista]. 4 Marzo 2026.
- [97] J. Pérez Martínez, Interviewee, *Entrevista sobre métodos y uso de materiales en la construcción naval. (Director Comercial de Avanzare Materials)*. [Entrevista]. 4 marzo 2026.
- [98] S. Martín García, Interviewee, *Análisis comparativo del mercado de materiales y flexibilidad en las líneas de armamento de buques. (Director de Vigo y Director Comercial de Astilleros Armón)*. [Entrevista]. 2 Marzo 2026.
- [99] R. Tapia de Andrés, Interviewee, *Metodologías de laminado por infusión y diseño de moldes para cascos de PRFV frente al acero tradicional. (Director Técnico de Astilleros Rodman Polyships)*. [Entrevista]. 10 Marzo 2026.

- [100] O. Vilela, Interviewee, *Homologación de resinas, gelcoats y caracterización de las propiedades mecánicas interlaminares de composites*. (Directora del Laboratorio de Materiales de Rodma Polyships). [Entrevista]. 23 marzo 2026.
- [101] G. Marchesi, L. Lomazzi, M. Giglio y A. Manes, «Scaling the Response of a Simplified Hull Girder Subjected to Underwater Explosions,» *Engineering Proceedings*, vol. 85, nº 1, 2025.
- [102] DNV GL, *Rules for Classification of Ships/High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft, part 2, chapter*, DNV, 2012.
- [103] F. J. González, *Herramientas de Cálculo Estructural I. Mars/Steel*, Madrid: ETSIN, 2021.
- [104] W. D. Callister Jr y D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*, John Wiley & sons., 2020.
- [105] S. Shabberhussain y R. Velmurugan, «Effect of graphene nanoplatelets on mechanical performance of GFRP composites,» *In Materials Science Forum*, vol. 1059, pp. 73-80, 2022.
- [106] N. Wayzode y V. Suryawanshi, «Mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced glass/epoxy composites manufactured using resin film infusion process,» *AIMS Materials Science*, vol. 10(4), pp. 693-709, 2023.
- [107] J. Larreta Aldave, *La transición en el empleo del acero a los materiales compuestos en construcción naval*, Santander: Universidad de Cantabria, 2023.
- [108] M. J. Churruca, *Tesis doctoral. Microfisuración en materiales compuestos*, Argentina: Universidad Nacional de Mar del Plata, facultad de Ingeniería, 2022.
- [109] J. A. Santana Villamar y A. F. Rigail Cedeño, *Optimización de propiedades eléctricas y mecánicas en composites Epoxi-Grafito Expandido*, Madrid: ESPOL. FIMCP., 2025.
- [110] Organización Marítima Internacional, «Subcomité de Proyecto y Construcción Naval,» IMO, Londres, 2026.
- [111] N. A. T. Organization, «ANEP-77: Naval Ship Code,» NATO Standardization Office, Bruselas, 2014.
- [112] H. Schneekluth y V. Bertram, *Ship Design for Efficiency and Economy*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [113] *Cuaderno de Bitácora del Río Luna*, Marín, Pontevedra, 2026.
- [114] *Cuaderno de Bitácora del BAM Tornado*, Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, 2026.
- [115] J. Bakker y P. L. A. van Vlaardingen, «Wetted Surface Area of Recreational Boats,» Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos, Bilthoven, 2018.
- [116] M. N. bin Mohamed Zaidi, «Quotation for Ship Blasting & Painting Services,» Project Tracmar, 2020.
- [117] L. T. Blank y A. J. Tarquin, *Ingeniería económica*, 8 edición ed., Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2020, p. 656.
- [118] NATO LCC Task Group, *ALCCP-1: Allied Life Cycle COst Guidance for Naval Sustems*, Bruselas: NATO-AEP, 2023.

- [119] European Defence Agency (EDA), *Methodology for Technology Readiness Assessment and Economic Viability in Advance Marine Materials*, Bruselas: EDA-RT Structural Panel, 2022.
- [120] B. Burak Göksu, B. Yıldız y M. Danış, «Techno-Economic Assessment of Marine Fuels for Container Ships: A Net Present Value-Based Investment Analysis,» *Sustainability*, vol. 17, nº 17, p. 7967, 2025.
- [121] International Energy Agency (IEA), «Oil Market Report and Volatility of Marine Gasoil (MGO) and Military Distillates,» OECD/IEA, Paris, 2025.
- [122] R. F. Calili, H. G. Costa, O. L. G. Quelhas y R. C. Souza, «Estudo de modelos decisórios para escolha de alternativas de usinas geradoras de energia elétrica: utilização dos métodos multicritério TOPSIS, ELECTRE e AHP,» de *4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management* , San Sebastián, 2021.
- [123] J. J. Flórez Mora y J. A. Rojas Cepeda, «Comparación de las metodologías AHP y TOPSIS como enfoque de solución al problema de selección de componentes de un portafolio,» 2023.
- [124] T. Bozdoğan, A. Odabas y Ö. O. Çetin, «Financial performance of BIST-Cement companies analysis by TOPSIS and ELECTRE methods,» *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, nº 78, pp. 491-510, 2023.
- [125] C. L. Hwang y K. Yoon, *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey.*, Springer Science & Business Media, 1981.
- [126] A. Shanian y O. Savadogo, «TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell,» *Journal of Power Sources*, vol. 2, nº 159, pp. 1095-1104, 2006.
- [127] Dirección General de Estrategia e Innovación de la Industria de Defensa, *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa*, Madrid: Ministerio de Defensa, 2026.
- [128] TurboScribe, «AI transcription tool,» 2026. [En línea]. Available: <https://turboscribe.ai>. [Último acceso: 23 febrero 2026].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

La introducción de materiales compuestos reforzados con grafeno en la construcción naval implica diversas consecuencias desde el punto de vista social, económico y ambiental, que deben ser consideradas junto con sus ventajas técnicas.

Desde el punto de vista social, el empleo de estos materiales puede contribuir a mejorar la seguridad estructural de los buques debido a su mayor resistencia frente a la corrosión, reduciendo el riesgo de fallos estructurales y aumentando la fiabilidad operativa. Esto repercute directamente en la seguridad de las tripulaciones y en la disponibilidad de los buques. Asimismo, la incorporación de estos materiales fomenta el desarrollo tecnológico y la innovación en el sector naval, impulsando la formación de personal cualificado y el avance de la industria.

En el ámbito económico, uno de los principales inconvenientes es el elevado coste inicial del grafeno y de los materiales compuestos en comparación con los materiales tradicionales como el acero. Sin embargo, su menor peso permite reducir el consumo de combustible, lo que disminuye los costes operativos a largo plazo. Además, su mayor resistencia a la corrosión reduce las necesidades de mantenimiento y prolonga la vida útil de los componentes, lo que contribuye a disminuir los costes asociados al ciclo de vida del buque.

Desde el punto de vista ambiental, el uso de materiales más ligeros contribuye a mejorar la eficiencia energética de los buques, reduciendo el consumo de combustible y, en consecuencia, las emisiones contaminantes asociadas al transporte marítimo. Asimismo, su elevada resistencia a la corrosión disminuye la necesidad de tratamientos y recubrimientos anticorrosivos, reduciendo el impacto ambiental sobre el medio marino. No obstante, la producción de estos materiales puede requerir procesos industriales con un consumo energético elevado, por lo que será necesario optimizar su fabricación para maximizar sus beneficios ambientales.

Se puede concluir, por tanto, que el empleo de grafeno y materiales compuestos en la construcción naval presenta importantes ventajas en términos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad, aunque su implantación depende de la evolución de los costes de producción y del desarrollo de procesos industriales adecuados.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo y la aplicación de nuevos materiales como el grafeno en la construcción naval implican no solo consideraciones técnicas, sino también reflexiones éticas y sociales relacionadas con la responsabilidad profesional del ingeniero y el impacto de sus decisiones en la sociedad.

Desde el punto de vista ético, el ingeniero tiene la responsabilidad de garantizar que los materiales y soluciones adoptados cumplan con los requisitos de seguridad, fiabilidad y durabilidad. La incorporación de nuevos materiales debe basarse en estudios rigurosos que aseguren su comportamiento estructural y su idoneidad para las condiciones reales de operación. La adopción prematura de tecnologías no suficientemente verificadas podría comprometer la seguridad de las estructuras y de las personas, por lo que es fundamental actuar con rigor técnico y responsabilidad.

Asimismo, es importante considerar el impacto que estas decisiones tienen sobre el uso eficiente de los recursos. El empleo de materiales más duraderos y resistentes contribuye a reducir la necesidad de reparaciones y sustituciones, favoreciendo un uso más sostenible de las materias primas. Desde este punto de vista, el ingeniero debe priorizar soluciones que optimicen el ciclo de vida de las estructuras y minimicen su impacto global.

Por otro lado, el desarrollo de nuevas tecnologías contribuye al progreso industrial y tecnológico de la sociedad, mejorando la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de los sistemas de transporte marítimo. Sin embargo, este progreso debe realizarse de forma responsable, garantizando que su implementación sea segura, viable y beneficiosa a largo plazo.

El desarrollo e implantación de nuevos materiales como el grafeno debe abordarse desde una perspectiva ética y social responsable, garantizando la seguridad, la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos. El papel del ingeniero es fundamental para asegurar que el avance tecnológico se realice de forma segura, responsable y beneficiosa para la sociedad.

ANEXO III: ENTREVISTA AL DIRECTOR DEL ASTILLERO ARMÓN (NAVIA)

A continuación, se transcribe de forma literal y a partir de una grabación, la entrevista realizada al director de Astilleros Armón en Navia (en adelante A.N) [96] con el fin de lograr una comprensión global y profunda del caso de estudio en el ámbito concreto del acero naval y sus aplicaciones.

Para la transcripción de esta entrevista y la de los Anexos IV a VII se ha hecho uso de la Inteligencia Artificial *TurboScribe* a partir de las pistas de audio de las entrevistas. [128] Además, se ha estructurado por párrafos de ideas para facilitar la claridad expositiva.

J.Z:

Buenas tardes A. Lo primero de todo, darte las gracias por haber accedido a concederme esta entrevista, haciéndome un hueco.

A.N

Nada. Para mí es un placer ayudar a estudiantes interesados en mi campo y en lo que yo te pueda ayudar pues te intentaré aclarar.

J.Z

Gracias. No sé si pudiste ver el documento que te envíe...

A.N

Sí...sí, pensando más en la aplicabilidad y en lo que se está haciendo ahora, lo que está pasando en la construcción naval, creo que podemos empezar por los criterios clave en la selección de material, es decir, porque al final es lo que mueve la industria, pero no, es que a mí me encanta el grafeno, bueno, ok, pero... entonces, creo que eso nos introduce bien el resto de cosas, ¿no? Tenías ahí unos criterios, para mí, buenos criterios de selección. Y lo que manda primero es el bajo coste. Bueno, voy a hablar así de forma imperativa, pero quiero decir, es mi opinión, ¿eh?

J.Z:

Sí, bueno.

A.N:

Y lo que, por mi experiencia, llevo 14 años en la industria privada de la construcción naval, pasando por departamentos de producción, comercial, compras, bueno, entonces estaría el bajo coste, ¿vale? Como estamos en un entorno hostil en lo que se refiere a la corrosión, etcétera, por resistencia a la corrosión, no solo por el entorno, sino porque los buques son plataformas que tienen que durar 20-25 años, que en la práctica acaban durando 30-35, ¿no? Y el mantenimiento no siempre puedes mantenerlo, si estás en una campaña, en vuestro caso, en el Índico, pues, entonces, coste y resistencia a corrosión, luego, la escalabilidad, ¿no? No hacemos, quiero decir, nuestros productos, bueno, efectivamente, hay embarcaciones desde los 10 metros hasta los 200 y hasta los 350 metros que se construyen en Asia, ¿no? Pero, al final, los barcos son grandes, me da igual que 20 metros, 40, 50, 100 metros, y los barcos que utiliza la marina, pues, como estaba hablando, barcos de entorno de 50-150 metros, ¿no? Sin irnos al portaaviones, o sea, entonces, tú necesitas una producción masiva de todo ese producto, entonces, eso para mí es fundamental, es más, luego veremos, que ya lo sabes tú, la fibra, etcétera, pues, no sé el dato exacto, si a partir de 40 metros, 50 metros...

J.Z:

Sí, no es viable.

A.N:

No es viable, ¿no?, por otros motivos también, fijándonos en la resistencia, etcétera.

Vale, luego, si nos queda poco peso específico, bueno, pues el poco peso específico, para mí, estaría en cuarto lugar, es decir, es un factor importante, pero, para mí, siguen siendo prioritarios los otros, es importante, sobre todo, no en sí mismo, sino para la eficiencia, pues, esto qué quiere decir para la operación, para la velocidad, para el consumo, claro, aquí ya tendríamos que hablar de mercado, por ejemplo, este criterio de poco peso específico para un “carrier”, pues, que pese más o menos la estructura, ahora pesa cero, pero, quiero decir, no es relevante si estás llevando 100.000 toneladas de grano, ¿no? Entonces, por eso lo pongo en cuarto, porque siendo importante, claro, esto, un barco de alta velocidad, pues, este criterio que hemos puesto aquí, el cuarto, de forma genérica, pues, igual sería el primero, ¿no? Claro, depende, ¿no? Poco peso en la estructura para correr. Vale. Bueno, y luego, la rigidez que ponías, bueno, la rigidez para mí es un... la rigidez, no sé a qué te refieres, entiendo que es la resistencia al límite, elástico ¿no?

J.Z:

Así es.

A.N:

Correcto, quiero decir, en este sentido, dejando el grafeno, que no lo controlo, entiendo que, pues, luego comentamos, ¿no? Que podemos ver unos datos luego, ¿no? La rigidez, pues, es necesaria para la seguridad, para que el barco no te rompa. Digamos que todos estos materiales, con diferencias sensibles, pues, son suficientemente rígidos para que, aplicados con el espesor adecuado, etc., cumplan los requerimientos. Entonces, aquí volvemos otra vez al coste-peso, ¿no? Evidentemente, quien más resistencia tiene en términos comerciales sería el acero, y luego, bueno, fibra de carbono también, pero tiene otras las aplicaciones. Entonces, estos son los criterios.

J.Z:

Vale. Si te parece pasamos a hablar del acero, que ahí seguro que me aportas mucho.

A.N:

¿Tienes alguna duda de estos criterios o cómo lo ves tú, o si tienes en algún sector en particular?

J.Z:

No, o sea, yo lo único que..., claro, la escalabilidad, también es verdad que vosotros, por lo que me dijo S., a lo mejor, no sé si ahí es igual, pero que no hacéis barcos en serie, y eso también no sé si sería, en caso de que trabajaseis con materiales compuestos, si trabajaseis barcos en serie, a lo mejor, sería más ventajoso, no sé.

A.N:

No, no, sí, correcto. A ver, la escalabilidad, yo la estaba pensando aquí como industria, es decir, como escalabilidad en tamaño del buque. Si hablamos de escalabilidad en producción, bueno, los típicos astilleros que pasa en Europa, los astilleros privados, tú compites por productos de valor añadido, diversificando, no hay un barco igual, entonces es ahí donde puedes competir porque la mano de obra sigue representando mucho, pero representa menos en comparación, pues digamos, que la mano de obra en otro petrolero... entonces, por eso nuestras soluciones son a medida y nuestro nicho son esos mercados de valor. Hay mercados de valor que son seriados, por ejemplo, yates, o embarcaciones de recreo de un rango menor en tamaño. Bueno, pues ahí, efectivamente, los materiales compuestos tienen, en estos criterios, tendrían muy buen punto en la escalabilidad y en bajo coste, porque, aunque el material, vamos a ver, el material de la fibra, es más caro a priori, ¿no?

J.Z:

Claro, es más cara.

A.N:

Y tienes que tener el molde, etc., pero, bueno, la ventaja de hacerlo sería que podrías repartir todos los costes iniciales y acabaría siendo más competitivo.

J.Z:

Ya... y ¿considerarías que a largo plazo un buque menos pesado se notaría el menor coste en combustible? ¿O no crees que sea determinante?

A.N:

Sí, vamos a ver. Totalmente. Eso es una de las cosas... Vale, no, totalmente. Eso es uno de los temas que se tiene en cuenta para los barcos de alta velocidad, por ejemplo, cuando tienes... Por eso nosotros, bueno, te explico un poco más de la fibra, que, bueno, conocemos y hay un sector que no competimos contra la fibra. Nosotros, una de las apuestas es: tenemos una división de acero y luego una división de aluminio de las más grandes del mundo, es decir, estamos haciendo barcos aquí en aluminio de 130 metros de eslora. En 2 o 3 astilleros del mundo se puede hacer lo que estamos haciendo aquí en casa. Cuando digo casa, digo Asturias, Galicia, en el norte de España, ¿no? Entonces, ¿por qué? Porque parte del discurso de nuestros clientes de ferris de alta velocidad, por ejemplo, es que es más sostenible la alta velocidad porque te fuerza a utilizar materiales más ligeros, entonces, me lo invento, si tienes un ferry que pesa en aluminio mil toneladas, pues en acero estaría pesando el doble, ¿no? Entonces, pues son mil toneladas menos que no estás transportando durante todos los 25 o 30 años de operación, entonces eso es un ahorro de combustible importante.

Todo lo que ahorres en peso se puede considerar como una medida sostenible y, digamos, económica, que pasa en la realidad. Nosotros lo decimos: tú ahorras en peso no para ser más sostenible, sino para poder correr más. Pero bueno, no deja de ser también... entonces, lo que has dicho, tú lo que planteas es exactamente como lo has dicho y caso a caso. ¿Qué pasa? Que volvemos al caso extremo: en un petrolero, que ahorres cinco mil toneladas de acero si estás transportando cien mil toneladas, pues no es relevante, ¿no? Porque luego no es lineal que pese el doble el barco, diciendo una generalidad, no quiere decir que ahorres el doble de combustible, ¿no? Esto no es lineal.

J.Z:

Vale, genial. Luego te ponía otra pregunta en el documento, quizá menos abierta a la subjetividad, que es, ¿cómo valoras la escalabilidad en los tres materiales que te he dicho? Que a lo mejor PRFV con grafeno no me sabes decir, y luego también la resistencia.

A.N:

Vale, a ver, empezamos por la resistencia. Vale. Vale, la resistencia... No, vamos a ver, cuando nosotros hablamos de resistencia, nos interesa más el límite elástico que la resistencia a la tracción, ¿no? Porque si en los reglamentos... yo tampoco soy un experto en materiales o estructura u otras muchas áreas también, pero digamos nosotros, cuando los reglamentos entran, normalmente cuando dimensionas la estructura, entras en el límite elástico, ¿no? Entonces, por orden de magnitud, bueno, ahí depende de la selección, etc., ¿no? Pero si hablamos de acero naval, esto tú puedes verificarlo en internet con cualquiera, ¿no? Pero el límite elástico del acero estamos en torno a los 350 MPa, ¿sí? Eso quiere decir sobre 3500 kilos por centímetro cuadrado, ¿no? El aluminio, pues estaríamos hablando de 220 megapascals hasta 240, dependiendo de la aleación, por lo tanto, bueno, pues es un tercio menos, por así decirlo. Y luego la fibra, la fibra de vidrio es inferior, no tengo el dato, no llega a los 100 megapascals. De ahí la limitación: cuanto el barco es más grande, el ruido de las olas, la teoría del buque-viga, cómo se comporta...

J.Z:

Literalmente lo que estudio es la teoría buque-viga.

A.N:

Claro, pues entiendo yo que precisamente por las limitaciones en las propias propiedades mecánicas y de resistencia de la fibra, pues llegaría un momento que tendrías que trabajar con espesores brutales, que no son construibles, no son viables, vamos, de una forma construible normal. Y entonces, pues, la fibra no es... porque no resiste mucho, no sé si estamos a 70 megapascals, 100, o bueno, no lo puedes comprobar, pero vamos, igual la mitad del aluminio, por decir algo, ¿no?

J.Z:

Ya.

A.N:

En fibra de carbono también... bueno, justo la fibra de carbono es más sensible porque depende... normalmente trabajas... bueno, aplicaciones muy técnicas de competición, recubrimientos, y dependiendo de la aleación que se utiliza y dependiendo de la orientación de las fibras, tienes una resistencia o no. Podríamos estar hablando entre 500 y 1200 MPa. Realmente la fibra de carbono sí tiene una resistencia muy buena, pero derivado por los otros criterios, por precio, por fabricación, por los otros criterios que vimos, pues se utiliza en alta velocidad, pero algo muy específico, orientación militar y de competición. Si no, no le vemos aplicación en el sector, de hecho, nosotros no lo utilizamos.

J.Z:

Y te ahorras... o sea, tú para buques de acero sí que necesitas pinturas anticorrosivas, que además entiendo que, creo que miré, entre 2-5 años tienes que repintar normalmente. Eso es un coste que también es ahorro significativo si tienes un casco que ya de por sí previene la corrosión.

A.N:

Lo que dices de la corrosión es muy importante, de hecho, yo te lo indicaba como el segundo punto de los criterios claves de la selección. La corrosión es un tema fundamental. De hecho, aunque material estrella hecho para los barcos que hay, mi opinión o la tuya, es el acero. Sin embargo, curiosamente el acero es el que peor resistencia a corrosión tiene. Tienes que pintarlo cada 2,5 o 5 años.

Bien, el aluminio, por ejemplo, tiene una... ¿qué pasa? Que el acero y las pinturas han mejorado mucho. Entonces decimos que el acero no tiene resistencia a la corrosión, pero con pintura sí. Y bueno, es de Perogrullo, pero bueno, es que podríamos no tener solución. Lo que quiero decir es que el acero, siendo un material muy malo en lo que se refiere a corrosión, las soluciones que hay realmente, en aplicabilidad, son muy razonables. Y aunque tiene un coste importante la pintura, dependiendo del tamaño del buque, tú a los 5 años seguramente ya lo tienes que sacar del barco por clase; dependiendo de la pintura, lo tienes que sacar porque tienes que revisar los ánodos, tienes que revisar los ejes... Entonces, siendo un factor importante el de la pintura, este problema está resuelto en el acero precisamente por la pintura. No sé si me explico.

J.Z:

Sí

A.N:

Dicho eso, el aluminio, por ejemplo... el aluminio, de hecho, si conoces barcos militares de Estados Unidos, tienen una división de aluminio sin pintar, por peso y porque el aluminio no necesita... el aluminio tiene una capa de oxidación que se produce de forma espontánea y esa capa de oxidación no la ves a simple vista, o es como un polvillo, y es propiamente la que le protege de la corrosión.

¿Qué estamos haciendo nosotros con barcos comerciales de aluminio? Bueno, pues pintamos lo que se ve en la obra muerta con muy poco espesor, con un esquema de pintura que llevamos muy bajo porque, por ejemplo, si construimos a Balearia, no podemos llevar a una terminal de pasaje un barco sin pintar porque estéticamente no vende. Entonces por eso lo estamos pintando. Pero lo que son cubiertas exteriores que no las ves, o donde no se transitan, van sin pintar. Si es un catamarán, el interior va sin pintar. Eso es una ventaja del aluminio.

¿Qué sucede en la práctica? La obra viva, es decir, abajo del agua, lo pintamos. Y dices tú: ¿por qué? Por el tema de la eficiencia y la velocidad, porque ya estamos utilizando en algún caso pinturas de silicona para bajar la fricción del casco, en este caso aluminio o de acero. Entonces, lo pintamos no por protegerlo, sino por la velocidad. En resumen, lo que es una ventaja en aluminio, que podríamos ir sin pintar, no lo es tanto porque también lo estamos pintando por otros motivos que no son la corrosión.

J.Z:

Ya

A.N:

Bueno, esto es un brainstorming que te hago para que abras la cabeza y todos estos análisis que hagas intentes pensar fuera de la caja.

J.Z:

Supongo que también el aluminio tiene limitaciones de tamaño, porque hacéis puentes de aluminio para bajar el centro de gravedad del barco y mejorar la estabilidad, pero salvo este que me comentas de ferris y tal, no hacéis... no sé si hacéis barcos enteros de aluminio.

A.N:

Sí, vamos a ver. En los catamaranes estos, si has entrado en nuestra web, puedes entrar en ferries, y al producir los catamaranes grandes son barcos enteros. Son en catamarán, que es más complejo, de hecho, estructuralmente es más complejo que un monocasco porque tienes distintas torsiones, etc. Son barcos... de hecho son las unidades productivas más grandes que hacemos, incluso que, en acero, hoy en día aquí en nuestros astilleros, aunque podríamos hacer más grande en acero. Y estas embarcaciones, cuando montamos el primer barco de la serie Eleonor Roosevelt, en una serie para Balearia, en su día fue la estructura flotante más grande del mundo. Entonces no hay ninguna limitación en escalabilidad en este sentido, más allá de lo que te demande el mercado. Podemos hacer un barco de aluminio de 300 metros. Es impagable, no hay mercado para eso, ¿me sigues? Porque si haces un barco de 300 metros no es para ir a 35 nudos, es otro tipo de barcos, ¿me sigues? Pero no es una limitación física, es una limitación de viabilidad industrial, ¿me explico? De hecho, si ves las fotos verás el barco entero de aluminio, es una barbaridad. Eso lo puedes hacer en monocasco, etc. Hacemos barcos de aluminio enteros en monocasco más pequeños; cuando son más grandes, ya pesan tanto la carga que tienen, los motores, etc., que no tiene sentido que el barco entero sea de aluminio.

J.Z:

Vale, pues Adolfo, no te quiero quitar más tiempo. Yo creo que ya me has dejado bastante claro porque además de las preguntas que tenía preparadas, yo creo que me hemos cubierto todas

A.N:

Bueno... en los análisis yo creo que hemos cubierto todo. Otros aspectos que no hemos tenido en cuenta, pero que te los digo y tú ya los puedes pensar. Es decir, que nos importa hemos hablado de resistencia, de peso, del coste, porque entendemos que...debe ser viable De esto hemos hablado todo, pero yo te lanzo unas cuestiones:

Reciclabilidad. Es un aspecto que ahora se tiene muy en cuenta, o se va a tener más en cuenta. Hay una nueva normativa. Por ejemplo, el acero y el aluminio tienen un mercado propio, que tú puedes vender a chatarra y tú puedes reciclar el buque. Es más fácil reciclar un buque de acero o aluminio que de fibra. También hay reciclabilidad de fibra, pero la reciclabilidad de acero y aluminio es mucho más alta.

La soldabilidad. Bien, hay que tenerlo en cuenta. Cuando construyes para alguien, para un cliente, imagínate un pesquero que va a pescar en Mauritania. Imagínate que por lo que sea, encaja que sea en fibra. Ahora te planteo: ¿qué pasa si tiene un choque con un bajo? ¿Cómo lo vas a soldar? Al final, una máquina de soldar la tiene todo el mundo. Sí es verdad que el aluminio es más difícil de soldar, que eso daría para otra charla de una hora. En las reparaciones es un poco más complejo el aluminio. Pero me entiendes. Una máquina de soldar la tiene todo el mundo y elementos para hacer vacío en la fibra no es tan fácil.

J.Z:

Tendría que ser un parche.

A.N:

Justo, un parche. Por ejemplo, yo no lo conozco, yo veo que la cosa existe y no es complicado, pero en una ubicación remota quizás sea más complejo. Cuando hagas estos análisis, si los quieres enfocar desde un punto de vista comercial o industrial, hay que tener en cuenta esto. Y luego, tanto el metal como el aluminio se deforman. Eso hace que ante un impacto o una carga excesiva quizás es mejor que se deformen antes de llegar al límite de ruptura, que la fibra no se deforme y se rompa.

Estoy hablando de ventajas e inconvenientes de lo que conozco, no porque esté en contra de la fibra. La fibra tiene su aplicación, pero por eso es orientada a la aplicación. Hay que ser crítico.

J.Z:

Veo que el acero apunta a que va a seguir siendo un material, pero ¿consideras que hay alguna aplicación que no sea el casco, que se puedan usar estos nuevos materiales para la superestructura, para otro tipo de aplicaciones que puedan ser beneficiosas y que sean mejores que el acero?

A.N:

En ese sentido, el aluminio es el que está ganando campo. A veces, lo que decía, hacemos los puentes de aluminio, pero a veces también la superestructura la hacemos de aluminio.

También hemos hecho superestructuras de fibra. A pesar de que nosotros no construimos fibra, podemos contratarla a un taller que haga fibra y la traemos. La ventaja de la fibra, por ejemplo, en superestructuras, para que no sean todo inconvenientes, si te hablo de superestructuras pequeñas, que dependiendo del tamaño, efectivamente, para forrar por dentro de la superestructura no tienes los refuerzos tradicionales que tienes que hacer en aluminio, chapa y refuerzo, chapa y refuerzo. Es decir, que el acabado interior y exterior es mejor en fibra, en tanto y en cuanto que luego para forrar, para poner todo el panelado, es más fácil porque aprovechas mejor el espacio porque no tienes esos refuerzos, donde vamos a poner aislamiento y todo eso. Tienes que aislar, pero eso ya es una ventaja.

¿Qué pasa? Que por contra, para unir la fibra con el sustrato, la cubierta a acero o aluminio, tienes que hacer una llanta por toda la cubierta y tienes que atornillar. También funciona bien. Quiero decir, hay puentes de 200 metros que se construyen con tornillos. O sea, no es un problema en sí mismo, pero es una complejidad adicional frente al aluminio. El aluminio tú puedes soldarlo directamente con el acero, con unas llantas bimetálicas, pero al final, en resumen, tú tienes una unión soldada. Una unión soldada, en términos de estanqueidad, siempre va a ser mejor para el futuro. Los barcos se deforman y tal.

El aluminio y la fibra van a tener peso y siguen teniendo peso y tendrán que convivir con el acero. Pero el acero, a nivel industrial, pese a que pesa 7,8 toneladas metro cúbico, 7,9 toneladas, el aluminio estamos en 2,7, la fibra en 2, pese a que penaliza el peso el tema del acero, pero la relación precio-resistencia, el acero hoy en día es imbatible.

J.Z:

Vale. Muy bien. Pues yo creo que no tengo nada más. ¿Tienes alguna cosa que digas que tengo que conocer seguro?

A.N:

No. No sé si te ha ayudado algo a estructurar la cabeza. Muchas cosas yo creo que ya la sabrías.

J.Z:

Sí, pero me ayuda a no ser demasiado optimista con estos materiales, porque es verdad que tengo que ser riguroso en el trabajo y exponerlo con todo.

A.N:

Correcto. Yo lo que te diría, porque esto mismo podríamos haber discutido de fueles, de qué fuel es mejor, de más fueles alternativos, que suena todo esto, el hidrógeno, etc. Aquí hay que tomar, nosotros que somos ingenieros... ojalá, a ver, la fibra no es un material nuevo, ya tiene muchos años. La fibra de carbono, tampoco es nuevo. El grafeno, que lo apuntas tú, que no conozco, entiendo que está en un uso muy experimental todavía, sobre todo por costes y aplicabilidad industrial. Pero lo que te diría es que a

veces nos empeñamos como sociedad en tomar partido: “ya, estos materiales, tenemos que elegir uno”. Es que no es así, porque si fuese así ya estarían desbancados, no porque tú y yo lo digamos. Si realmente fuese uno, la propia oferta y demanda y globalización ya habrían elegido, y al final el comprador o el inversor no es tonto. Si no, solo habría un material.

Entonces, pues el acero, es buenísimo en muchas cosas, que de forma general en la industria es el que abarca más rango, es así. ¿Pero la fibra no vale?... si hablamos de barcos tipo Rodman, que tiene su propio mercado y también pesca en determinados segmentos y esloras, pues la fibra va a resultar una mejor opción. Si hablamos de barcos de alta velocidad, grandes, pues no hay otra cosa a gran escala que no sea aluminio, por esto, por esto y por esto.

Entonces, oye, ¿se pueden combinar? Pues sí. Entonces, a mí a veces siento contestar un poco como los gallegos: le dices, bueno, depende. Pero es que esa es la clave. Depende de la operación, depende del armador y del tipo de operación, pues eliges un material u otro, o un combustible u otro.

En el caso militar, casualmente yo estoy ahora dirigiendo el proyecto de un par de barcos multipropósitos para la Armada Sueca.

J.Z:

Ah, sí, los oceanográficos, ¿no?

A.N:

Son unos buques multipropósitos que están en Vigo, los estoy llevando desde aquí, por eso, bueno, los cruzamos todos los días como siempre hicimos, pero digamos que, claro, antes hablábamos, y con esto ya termino, de los criterios de selección del material, ¿no? Y el primero que te dije, porque es lo que tengo que decir como industria privada, es el precio, porque es lo que manda el mercado. En la industria militar, pues es distinta. Voy a decir una tontería que no conozco. Si en una F-100 hay que poner una torre para meter el radar en fibra de carbono, aunque cueste, me lo invento, cinco veces más que en acero, porque el radar, porque la sombra, porque no sé qué, pues el cliente lo va a pagar porque es un organismo público, porque es prioritaria antes la necesidad que el precio, ¿no? Todo depende del caso. Bueno, no me enrollo, ¿vale?

J.Z:

No, no, si el tiempo te lo he quitado yo.

A.N:

Sí, no, no, si andamos todos muy ocupados, pero bueno, por poner en valor tu tiempo y el mío, pues, bueno, un poco no pasa nada.

J.Z:

Pues muchísimas gracias por todo, Adolfo. De verdad.

A.N:

Muy bien. Gracias a ti. Que vaya bien.

ANEXO IV: ENTREVISTA AL DIRECTOR COMERCIAL DE AVANZARE MATERIALS

A continuación, se transcribe de forma literal y a partir de una grabación, la entrevista realizada al director comercial de “Avanzare Materials” (en adelante J.P) [97] con el fin de lograr una comprensión global y profunda del caso de estudio en el ámbito concreto de los materiales compuestos y el grafeno.

J.Z

Buenos días J. Lo primero de todo, muchísimas gracias, de verdad por tu tiempo. Si te parece, empezamos la entrevista. Mi idea es que sea libre, para que puedas aportarme tu experiencia y vamos viendo sobre la marcha si te parece.

J.P:

Bien, pues si quieres te cuento un poco lo que hacemos. Nosotros lo que hacemos es el material, alguien lo utiliza para meterlo en un composite y meterlo en cualquier parte. Naval es una de las partes, pero donde más estamos haciendo es automoción y construcción aeronáutica, lo que pasa es que va más lento, se hace siempre a muy largo plazo y lo que se desarrolla hoy va para dentro de 20 años, por lo menos.

Un poco de partida, por decirte, nosotros lo que básicamente fabricamos, porque el grafeno y la colaboración con el grafeno hay muchas cosas en el mercado, lo que nosotros trabajamos básicamente es partiendo del grafito una exfoliación, normalmente física. Tenemos la parte química, pero esa va más para temas relacionados con electrónica y cosas de ese tipo, tener súper altas conductividades y cosas así, pero eso va por otra línea, además son productos muchísimo más caros.

El que hacemos en composites es básicamente partir del grafito, haces una exfoliación física, básicamente son molinos de bolas que van exfoliando poco a poco el material y lo que tú consigues no es, vamos a decirlo así, un material monocapa de grafeno, sino que son una especie de intermedios entre grafitos muy exfoliados y grafeno. Habrá láminas que presenten una o dos láminas y habrá materiales que puedan presentar 28, no es único.

Ese material como tal presenta ciertas ventajas, ciertas características que pueden ser empleadas en composites, sobre todo están muy relacionadas con temas de mejorar o bien propiedades eléctricas, o bien propiedades térmicas, o propiedades mecánicas, pero siempre necesitas una base polimérica que sea la que haga de polímero, vamos a decirlo así, la que haga de base, porque el material que se fabrica de esta manera, de grafeno, es un material que tiene, imagínate, una lámina de como mucho 40 o 100 micras por cada uno de los dos lados y de espesor pues entre un nanómetro y treinta.

Entonces, claro, con ese folio, vamos a decirlo así, a nivel nanométrico, poco puedes hacer. No puedes hacer un puente de eso únicamente, no puedes hacer ninguna estructura de eso porque no tiene ni dimensiones ni nada. Entonces lo que se hace es meter ese material dentro de un polímero. Ese polímero puede ser termoplástico, puede ser elastómero, puede ser resina, puede ser termosil, puede ser lo que sea, y entonces lo que haces es darle a ese polímero características un poco diferentes de las que tiene.

Nosotros nos centramos mucho en mejorar la conductividad eléctrica para, por ejemplo, cualquier resina normalmente suele ser aislante, pues para darle una conductividad eléctrica para aplicaciones en las cuales tenga que disipar la conductividad eléctrica por multitud de factores, yo qué sé, por temas de estática, por temas de seguridad de, de en general, pueda generar una chispa y pueda haber una explosión, cosas así.

Otras aplicaciones también bastante interesantes, y que es la que yo creo que es la que más está trabajando, sobre todo, es para disipación térmica.

Cualquier polímero tiene transmisiones térmicas de 0,2, entre, no hablo de espumoso, que espumoso tendría menos, pero vamos a decirlo así, un material sólido podría tener entre 0,1 y 0,3, ¿vale?, de vatios metro kelvin. Vatios que quieres capaz de transferir en un área y en un espesor. Y a una temperatura.

Cuando tú le metes grafeno lo que tú consigues es mejorar la transmisión térmica de ese material multiplicando la transmisión térmica por 5, por 10 o por 20 veces. ¿Eso para qué es válido? Bueno, pues hablando en cosas terrenales, por ejemplo, en carcasas de móviles o cosas de ese tipo, para que el calor que se esté generando dentro del móvil o dentro del motor o dentro de lo que sea, la carcasa, si tú le pones una carcasa que es 100% plástico, lo que hace es generar una manta que concentra el calor porque no puede transferirse fuera. Si tú le metes grafeno o algo de ese tipo, lo que tú permites es que ese material pueda disipar el calor 5 o 10 veces más eficientemente que un material resto.

J.Z:

Yo había leído que, bueno, es que también trato del polímero reforzado con fibra de vidrio, que efectivamente cargándolo con grafeno mejora un montón las propiedades, pero yo había leído que solo podías efectivamente hacerlo como un 4% de grafeno en masa como mucho, porque a partir de ese punto, ¿qué ocurre?

JP:

¿Estás hablando de mecánicas?

J.Z:

Sí, ahora mecánicas.

J.P:

Si hablas de mecánicas, aquí hay varios conceptos, ¿vale? Cuando tú trabajas con nanopartículas, pero no solo con grafeno, casi con cualquier nanopartícula, lo que tú actúas a muy baja dosis, a 0,5-1% como mucho, lo que tú estás haciendo normalmente es generar núcleos de cristalización dentro de tu polímero.

Entonces lo que normalmente se hace es que tu polímero, cada polímero, vamos a decirlo así, tiene una fase cristalina y una amorfa, ¿vale? Por las características que le dé, ¿vale? Hay polímeros que tienen más fase cristalina y polímeros que tienen más fase amorfa, ¿vale? Que son capaces de, vamos a decirlo así, generar —voy a hablar un poco como básico, ¿no? — una pared de ladrillos muy bien hecha o menos bien hecha, vamos a decirlo así, ¿vale?

Entonces cada polímero, me da igual el polipropileno, me da igual una poliolefina, me da igual una poliamida, me da igual la resina, tiene una parte que está construida, vamos a decirlo así, mejor que otra parte que está construida un poco peor, ¿vale? Entonces lo que tú haces cuando tú le metes cualquier nanopartícula a este tipo de sistemas es que generas puntos en los cuales empiezan a nuclear. Cuando empiezan a nuclear son puntos en los cuales empiezan a construir el polímero haciéndolo más cristalino, ¿vale?

Que eso no significa que sea mejor, ¿eh? Significa que tiene más fase cristalina, que hará que tu polímero tenga mejores propiedades mecánicas o, más que mejores propiedades mecánicas, más acordes con un polímero cristalino que con un polímero amorfo, que no tiene por qué ser mejor, ¿vale?

Por ejemplo, muchas veces en un plástico se buscan cosas relacionadas con el impacto, ¿vale? El impacto de un parachoques de coche o una cosa de ese tipo, y cuando impacta un material sobre piedra o lo que sea, lo que hace falta no es que el material sea duro, sino que el material sea capaz de absorber esa energía, ese impacto, y difundirlo a través de todo el polímero plástico sin que se rompa. Entonces eso muchas veces está más relacionado con que el polímero sea amorfo más que con que sea cristalino. Lo que haces es aumentar la fase cristalina

J.Z:

¿Y eso por qué puede ser malo si cargas demasiado? ¿Porque si es muy cristalino?

J.P:

Ahora te explico. Cuando tú tienes más material, imagínate tú que pasas del 1%, cuando empiezas ya no se dispersa tan bien, ya empiezas a ver dónde se acumula. Quiero decir, no sé cómo explicártelo de una manera... vamos a decirlo así: como que hay demasiados puntos de cristalización y entonces se empieza a cristalizar uno sobre otro y entonces ya empiezan a aparecer puntos que se llaman puntos de ruptura, en los cuales ya el material ya no está bueno y tiende a romperse.

Vale, entonces normalmente tienes una primera parte cuando añades este tipo de materiales, tienes una primera parte en la cual el material actúa, el grafeno, actúa como material nuclear. Luego, si habláramos de un polímero cualquiera, digámoslo así, que la fase cristalina aumentaría las propiedades mecánicas un tiempo, y luego a partir de que ya no seas capaz de dispersar correctamente el material, es decir, que no queden los núcleos de cristalización separaditos y bien puestos, empieza a haber aglomeración de ellos y, en vez de generar que tu material sea mejor, va a peor, porque no se está integrando tan bien por lo que sea.

Entonces ahí empieza a bajar, ¿4%? Bueno, yo nunca habría dicho un 4%, yo de hecho diría menos, pero bueno, es que depende mucho del nanomaterial que estés metiendo, la forma que tenga, el polímero sobre lo que estés haciendo, etcétera.

¿Qué es lo que ocurre? Cuando ya has metido una cantidad suficiente, que ya el efecto de la nanoforma ya no actúa como nucleante y ya has pasado el efecto de que se aglomeren más, luego te actúa el material como un material estándar, vamos a decirlo así, micrométrico, no nanométrico, ¿vale?

Entonces ahí ya no te dan las características de que las modificaciones no han sido porque el material haya nucleado más. No. Ahí ya es la propiedad que te esté dando el material porque estás metiéndolo dentro de lo tuyo, ¿vale?

Por ejemplo, te explico: si cojo un material y le estoy metiendo un 20% de sílica o de carbonato, pues lógicamente la integración del carbonato dentro del polímero es peor que la de la sílica normalmente y las propiedades mecánicas son peores, pero ya no hay ningún efecto de nanomaterial ni nada, simplemente es que hay una combinación de material y hay que ver cómo se integra.

¿Lo que has oído por ahí, eso del 4%? Bueno, yo diría que menos, pero sí, puede ser.

J.Z:

Vale, bueno, yo lo trabajo, o sea, lo estudio al 1%, pero lo había leído que el máximo que se había llegado experimentalmente era el 4%.

J.P:

Y luego también tienes otra cuestión: meter un 4% en masa no es tan fácil. Porque, para que entiendas un poco, un grafeno, si el grafeno es bueno y tal, a ver, si suelen caer en composites puedes meter hasta un 20%, no te voy a decir que es fácil, pero se puede meter. Pero si tú trabajas con un nanomaterial, con un grafeno puro, bueno, y lo intentas meter en un polímero, ese tipo de grafeno normalmente tiene densidades de 0,01 o incluso menos.

J.Z:

Claro.

J.P:

Meter un material de densidad 0,01 aparente dentro de una resina o dentro de un termoplástico es muy difícil, porque no entra, vamos a decirlo así. Tú tienes una extrusora y si tienes que meter, pasas un kilo de plástico, que ocupa, por el polímero, que tiene más o menos 0,9, ocupa más o menos un litro de

agua, para que entiendas, y le quieres meter un kilo de lo otro, más o menos 50-50, un kilo de lo otro es un metro cúbico. Entonces dices: ¿cómo meto ese metro cúbico dentro de lo otro?

J.Z:

Vale, vale. Y luego, ¿qué limitaciones presenta? Porque por lo que me estás diciendo, la idea de usar el grafeno puro, construir cosas de grafeno, es un poco irreal. O sea, se usa como aplicación.

J.P:

Vale. Hay una forma de hacer las nanoláminas, nosotros lo hacemos, que es por CVD. CVD básicamente es: coges un gas con alto contenido en carbono, lo pones a temperatura de mil y pico grados, entonces básicamente descompones, generas CO₂, luego carbono, y lo que hace es básicamente que se va depositando sobre una superficie, ¿vale?

Con eso, ¿qué es lo que se hace? Pues básicamente se hacen pantallas electrónicas, ¿vale? Las pantallas electrónicas de grafeno son así, pero claro, estas pantallas, estás hablando de que tienen, me parece que la más grande que están haciendo ahora mismo será de 15 centímetros, 20 centímetros, una cosa así, por 20 centímetros, por un espesor de 0,8 nanómetros, una cosa así, una monocapa o una bicapa. Eso no tiene aplicación en composites. Vale, a fecha de hoy yo no conozco ninguno, igual ayer, pero yo no conozco ninguno.

Luego, ¿qué más cosas están haciendo? Pues unido a transmisión térmica, por ejemplo, en fluidos. Esto ya no va tanto para propiedades mecánicas, va para propiedades térmicas, ¿vale? Metido en fluidos lo que tú consigues es que este tipo de materiales aumenten la transmisión térmica del fluido, que lo que te permite es captar el calor, extraer el calor de una fuente de calor.

Por ejemplo, imagínate un motor a combustión. Captas el calor del motor, el agua se calienta más fácil cuando se acerca el motor y cuando va al radiador es capaz de transferir al radiador mucho más rápido la energía. Eso es lo que te permite trabajar con radiadores más pequeños, con circuitos más eficientes. Y encima ahí está en juego también el tema que está relacionado con cuánta energía te cuesta mover ese fluido dentro del sistema. Porque claro, yo puedo aumentar mucho la transmisión térmica del fluido, pero si me cuesta más energía mover el fluido dentro del sistema que la energía que yo gano al evacuar el calor, pues no me sale rentable.

Lo que pasa con el grafeno, como también tiene un coeficiente de fricción muy bueno, entonces lo que hace es que el material no aumente tanto, cómo se llama, no es la viscosidad, pero es un parámetro que básicamente está influenciado.

¿Qué más cosas se están haciendo con el grafeno? Esto sí que está chulo y bueno, a ver si encuentro una foto o algo para enseñarte, que igual no lo has visto nunca. A ver, ¿dónde puedo tener yo eso de la...? A ver... A ver si encuentro algo. Es que si no te lo enseño no lo vas a entender.

Bueno, no es el mejor sitio para enseñarte, pero bueno. A ver, comparte aquí pantalla. Te voy a enseñar una chorrada, pero a ver. Ya está.

Esto es un tipo de material. Aquí, esto es muy viejo, pero luego te enseño algo de lo que ya he hecho. Lo que te permite es que tú puedes, en un composite, inyectar una pieza de plástico que sea completamente aislante, ¿vale? Y simplemente por la acción de un láser tú puedes generar un circuito impreso conductor.

¿En qué está basado eso? En que tú trabajas con grafeno oxidado, ¿vale?, que sea aislante. Cuando tú superficialmente generas un circuito con un láser, lo que estás haciendo es reducirlo, reducirse a grafeno, a grafeno oxidado, vas a grafeno, y entonces lo que hacen es que todo el circuito que tú hayas generado es ese LED. Lo que está mostrando esto básicamente es que aquí un LED, lo que hacen es conectar dos pines. La verdad que aquí se ve fatal. A ver si soy capaz de buscar otro sitio donde se vea mejor.

Lo que tú haces básicamente es generar un circuito eléctrico dentro de tu polímero. ¿Para qué sirve eso? Bueno, pues eso sirve para muchas cosas. Primero, para eliminar cobre y peso de un sistema, ¿vale? Y luego imagínate, por ejemplo, en un salpicadero de coche o en cualquier cosa de ese tipo. Ya no solo eliminar cobre, sino simplemente que tú puedes generar, o sea, tú inyectas directamente el salpicadero con la forma que tú quieras. Una vez ya fabricado, tú con un láser seleccionas el circuito, los puntos donde quieres ir de un sitio a otro, el circuito que quieras hacer. Puedes hacer un circuito para simplemente que sea como un sensor para detectar con tu huella un circuito, puedes hacer un montón de cosas.

Estoy buscando a ver si encuentro algo mejor que esto, porque eso está bastante bien.

J.Z:

¿Y qué limitaciones tiene? Porque si no digo yo que estaría más implementado. ¿Es el coste?

J.P:

Cuesta mucho implementar las cosas. Nosotros ahora mismo tenemos, está en el mercado en dos aplicaciones. Por ejemplo, en salpicaderos de coche hay un par de coches que tienen aplicaciones de este tipo. Y luego sí que está muy aplicado, por ejemplo, en temas relacionados con generar el circuito para el paso de corriente eléctrica y que ese circuito se caliente y puedas eliminar hielo, por ejemplo, en alas de aviones. En vez de hacerlo con un circuito eléctrico, o sea, en vez de hacerlo con un circuito de metal, lo haces con este tipo de cosas.

Pero todo esto está bastante incipiente. No es que sea una cosa que esté haciendo mucho. Porque esto va a sustituir mucho sobre todo a, por ejemplo, pinturas conductoras. La típica pintura conductora que se hace con un circuito de plata. Pues la ventaja que tiene esto es, por ejemplo, cuando tú imprimes un circuito de plata sobre un plástico, cuando ese plástico se empieza a mover, tú fracturas el hilo de plata, no el hilo, la pintura de plata que tú has puesto en la superficie, porque no tiene la misma flexibilidad que el plástico, entonces se rompe. Con este tipo de sistemas no, porque lo que tú estás haciendo es básicamente quemar la superficie del polímero para que se reduzca, entonces es el mismo polímero.

A ver si encuentro algo. Pero bueno, son cosas de las que, vamos a decirlo así, se pondrán en el mercado en un tiempo finito. No te estoy hablando... esto no está en el mercado. Así como aplicaciones de conductividad térmica y cosas del tipo, sí que hay unas cuantas ya. Las del patrón, de momento, muy pocas.

J.Z:

Y volviendo a propiedades mecánicas, si yo tengo por ejemplo una viga de acero y la comparo con una viga de polímero cualquiera, que lo he cargado con grafeno, obviamente, esa segunda viga tiene mejores propiedades sobre todo en cuanto a peso, ¿no?

J.P:

Ah, eso sí. Pero el resto no. O sea, yo no haría una casa nunca de composite.

J.Z:

Claro, ¿y por qué no? O sea, ¿por qué no? Porque sí que muestra buenas propiedades mecánicas que tú puedes mejorar.

J.P:

Estás hablando de que, por ejemplo, un polímero... Si tú tienes un plástico o, vamos a decir, un polímero cualquiera, es mucho más eficiente una poliamida con fibra de vidrio larga bien integrada, o en manta, un composite con manta de fibra de vidrio, que por ejemplo ese mismo composite con grafeno. Pero mucho más eficiente, ¿vale? Porque lo que te puede mejorar el grafeno básicamente es, yo qué sé,

entre un 20 y un 30% de la propiedad mecánica, ¿vale?, o doblarlo, pero no te va a mejorar más, porque lo que te está haciendo es mejorar las partes poliméricas, ¿vale?

Cuando tú haces un composite de fibra de vidrio, por ejemplo, trabajado con una manta, o fibra de carbono, el 90% de la propiedad mecánica es la fibra, no la resina. La resina solo es el soporte, ¿vale?

Entonces, un composite es 30% de resina, 70% de fibra, ¿vale? La propiedad mecánica que le da la propiedad mecánica como impacto, como presión, en un composite de termoset, en una resina con fibra de carbono, por ejemplo, el 90% viene de lo buena o mala que sea la manta, si está cosida, si está tal... La manta es la que le da el 90% de la propiedad mecánica y solo el 10% viene de la resina.

J.Z:

Pero si me dices que sí que mejoraría un 20-30%, ¿por qué dices que no sería tan eficiente? ¿Porque ese 20-30% supondría un coste muchísimo mayor?

J.P:

No, porque ese 20-30% mejoraría la propiedad mecánica de la resina.

J.Z:

Ah, vale.

J.P:

Pero claro, es lo que te digo. Imagínate que estamos hablando de las mallas. Si el composite, la fuerza de presión es 1000, por decirte una cantidad, esos 900 dependen de la fibra, porque está tejida, porque está puesta, etcétera, como esté orientada, y solo 100 dependen de la resina.

Vale. Si yo quito la fibra, por mucho que mejore la resina, nunca va a llegar al condicionante de la fibra.

¿Qué se hace? Pues lógicamente lo que están haciendo son híbridos: que tú metes la resina con la fibra de vidrio, fibra de carbono, con lo que quieras, y luego le metes algo de grafeno para mejorar esas partes. Pero bueno, mejoras parcialmente.

J.Z:

Y ya la última pregunta, porque ya creo que te he robado mucho tiempo. El grafeno, supongo que los precios varían un montón, pero uno de los motivos por los que a lo mejor no está implementado, bueno, no sé, es que lo llevo a mi terreno, la industria naval, ¿puede ser el precio?

J.P:

Ya. El precio es subjetivo. Si la propiedad que te da no se puede ejecutar de otra manera, se puede pagar.

Quiero decir, imagínate, te voy a decir una estupidez, ¿eh? Yo hago una lámina de este tipo de grafeno únicamente y soy capaz de ponerla como refuerzo antimisiles. Maravilloso, perfecto. Pero esta lámina ocupa un milímetro y es capaz de parar, yo no sé, el Tomahawk más grande que me pueda imaginar. Será cuestión de que la aplicación pueda pagar esto o que no se pueda hacer de una manera diferente.

Ahora mismo, para mí, no es el problema del precio. Existen muchos más problemas que no son el precio únicamente. Por supuesto el precio es un hándicap, pero no creo que sea el hándicap mayor que hay.

El hándicap mayor que yo veo en este tipo de cosas está relacionado con una cosa de la que nunca nos damos cuenta, ¿vale? Tú todavía eres joven, no estás en la industria y no te atacan, pero yo que he tocado muchas industrias, que estás en la industria, cuando tú estás trabajando de una determinada manera... imagínate un composite, este composite que he dicho que básicamente se fabrica poniendo una

manta de fibra de vidrio sobre la cual vierto resina, se hace vacío, no sé qué y se queda ahí. No lo estoy usando en el momento, pero lo puedo aplicar donde me dé la gana.

Si tú a esta persona o a este sistema le das algo para producir esta misma manta y hay que hacer una modificación muy grande sobre el sistema productivo normal, no se adopta de una manera tan sencilla, porque todas las empresas tienen su forma de producir, el operario tiene su forma de trabajar, hay muchas cosas que cuestan adaptarse porque no es lo que haces todos los días. Entonces, lo que haces todos los días y la aplicación que tienes todos los días tiene una inercia muy grande y para cambiarla, la verdad que cuesta un montón.

Entonces, yo al grafeno le veo: sí, el precio es un problema. Otro problema puede ser que no es fácil trabajar. Cuando te digo que no es fácil, no es fácil meter dentro de una resina una cantidad importante de grafeno. Te lo he dicho antes: un kilo de resina es un litro; un kilo de grafeno es un litro... no es que valga mil euros, que también, pero es que no se puede trabajar de una manera sencilla.

Entonces hay que trabajar mucho mejorando mucho los intermedios para poder producir sistemas para que la industria pueda adoptar este tipo de soluciones.

J.Z:

Escalabilidad es más el problema.

J.P:

Escalabilidad, sí. Escalabilidad. Yo darle un productito: aquí tienes tu material, que sea grafeno o sea lo que sea, tu material que lo utilizas así, de esta manera, y te da estas propiedades. Eso es lo que falla todavía a fecha de hoy y por eso no hay tantas soluciones en el mercado como debería haber.

J.Z:

Pues J., yo no te quiero quitar... a no ser que tengas algo más que decirme...

J.P:

No. Yo te digo, es interesante que hagas cosas de este tipo. Es difícil. En internet hay muchas cosas y verdaderamente es difícil saber lo que es realidad y lo que no es realidad.

Hoy por hoy, las aplicaciones que tiene el material dentro del sistema, dentro de lo que es la industria, todavía son limitadas. Pero es que escucha, el silicio le costó 30 o 40 años ser utilizado en condiciones. Y luego, cuando empezaba a ser utilizado en condiciones, cuando empezaba la economía de escala, a procesar, la placa fotovoltaica antes costaba 100 veces lo que costaba, una cosa así.

Esto es igual, es cuestión de que la gente siga trabajando y vaya adoptando la tecnología para poder ir haciendo cosas, que vaya rodando.

J.Z:

Vale, pues nada, precisamente por esto me viene muy bien saber de primera mano de gente que sabe y no porque en internet encuentro una cosa y luego la otra.

J.P:

Es que es lo que te digo. Hay una cosa que es complicadísima, que son las expectativas. Ahora menos, porque ahora hay menos información... no menos información, perdón, menos propaganda. Pero hace 3 o 4 años nosotros recibíamos 6 o 7 llamadas al día de lo que nosotros llamábamos sumados del grafeno, ¿vale? No, en serio, gente que había oído que el grafeno era capaz de hacer yo qué sé qué.

Y claro, si tú has oído o estás leyendo en la tele que el grafeno, que una lámina de grafeno puede aguantar el peso de un elefante, pues tu expectativa es algo parecido. La realidad es que si yo comparo una lámina de grafeno con una lámina de acero de las mismas dimensiones, sí que es 6.000 veces más fuerte. Pero, ¿a quién se le ocurre hacer una lámina de acero de 0,8 nanómetros por la anchura que tú quieras? A nadie

Esto es claro. La expectativa que se ha generado muchas veces con la implantación de una nueva tecnología, muchas veces la opinión pública en general empieza a absorber esa idea de que puede cambiar todo, de que puede hacer todo, y verdaderamente hace mucho en contra de realmente la implantación, ¿vale? Porque cosas de las que sí que pueden ser implantadas relativamente rápidas, la gente se piensa que le va a cambiar todas las propiedades y no. Es que me habías dicho que tal... pues no. Hace unos años hubo muchísimo dinero en investigación en esto. Había un montón de grupos metiendo grafeno a cualquier cosa, y claro, le metes grafeno a cualquier cosa y estoy seguro de que alguna propiedad mejoras.

J.Z

Pues nada J. que muchísimas gracias por tu tiempo, de verdad, que además has estado muy dispuesto desde el principio y me ha venido muy bien

J.P

Nada, es parte de nuestro trabajo, intentar arrojar algo de luz en esto, que no es fácil como has visto

J.Z

Bueno, pues intentaré poner mi granito de arena

J.P

Bueno, Javier., cuídate.

ANEXO V: ENTREVISTA AL DIRECTOR DE LOS ASTILLEROS ARMÓN (VIGO)

A continuación, se transcribe de forma literal y a partir de una grabación, la entrevista realizada al director de Astilleros Armón en Vigo (en adelante S.M) [98] con el fin de lograr una comprensión global y profunda del caso de estudio en el ámbito concreto del trabajo de astillero, así como el uso concreto del acero frente a otras alternativas.

J.Z:

Vale... si te parece empezamos un poco por lo general, y vamos viendo sobre la marcha con flexibilidad absoluta ¿cómo ves tú, desde aquí, desde Armón Vigo, todo el tema de materiales en construcción naval? Porque desde fuera parece que está cambiando todo...

S.M:

Ya... sí... eso desde fuera siempre parece más rápido de lo que es, ¿eh? Aquí dentro las cosas van... más despacio, más... más con pies de plomo ¿eh?

A ver... cómo te lo explico... nosotros aquí, al final, trabajamos con barcos que tienen que funcionar sí o sí. No es un concepto, digamos que no es un prototipo... es algo que sale por ahí, por el mar y se va a hacer cosas de verdad.

Entonces... claro, todo lo que suena muy bien en teoría... lo miras, sí, lo estudias... pero luego dices: vale, ¿esto quién lo paga?, ¿quién lo construye?, ¿quién lo repara dentro de diez años? Y ahí ya... empiezas a filtrar mucho.

J.Z:

Claro...

S.M:

Por ejemplo, nosotros hicimos hace unos años un buque para apoyo *offshore*, bastante exigente en cuanto a operación, que iba a estar en el Atlántico Norte en campañas largas, condiciones duras, bueno que te voy a contar a ti...

Y ahí lo que te pide el cliente es fiabilidad. No te pide “oye, hazme algo innovador”. Te dice: “quiero que esto no falle”.

Entonces... ¿qué haces? Pues te vas a lo que conoces. Acero, bien dimensionado, bien protegido, con sistemas que ya sabes cómo se comportan. Luego sí que introduces mejoras, pero siempre con esa, con esa, digamos red de seguridad ¿me explico?

J.Z:

¿A qué te refieres con mejoras?

S.M:

Pues... por ejemplo, optimización de espesores, yo que sé, cambios en ciertas zonas, uso de aluminio en partes concretas... incluso estamos con el tema este de cambios en pinturas, en recubrimientos, que eso parece una tontería, pero no lo es.

Mira, el tema de las pinturas ahora mismo es un mundo. Nosotros estamos probando sistemas nuevos que reducen bastante el fouling, la adherencia... y eso, al final, se traduce en menos consumo. Digamos que a la hora de la verdad, el armador le interesa más que cualquier material exótico el poder, el poder tener esa seguridad que otros materiales a lo mejor no te dan. Eso, eso vamos, tenlo por seguro.

J.Z:

O sea que la innovación va más por ahí.

S.M:

Muchas veces sí, sí... es más incremental, más... vamos afinando lo que ya hay. Porque cambiar el material base de un barco... eso es complicadísimo. Por muchos motivos, estas cosas pueden no resultar rentables y arriesgarte a que no lo sean y luego tener un barco que no sirve pues no es un riesgo asumible. Y ya te digo, en la mayoría de aspectos, el acero sigue siendo el más óptimo, digámoslo así.

J.Z:

¿Y por qué cuesta tanto?

S.M:

Bueno... por muchas cosas. A ver... lo primero, porque un barco es grande. Parece una obviedad, pero no lo es. No es lo mismo hacer una pieza de un metro que una estructura de 80, 100, 120 metros. Los problemas escalan de otra manera.

Luego tienes la normativa. Aquí no haces lo que quieres. Tienes sociedades de clasificación, tienes reglas, tienes inspecciones... y todo eso está muy desarrollado para ciertos materiales. Si tú te sales de ahí... te metes en un, en un jardín importante.

J.Z:

Claro.

S.M:

Y luego está la parte humana... que eso no se suele contar. Aquí tienes gente que lleva 20, 30 años trabajando con acero. Saben cómo corta, cómo deforma, cómo responde. Tú les cambias el material... y no es solo enseñarles otra técnica. Es cambiar la manera de pensar el barco. Y eso no es inmediato.

J.Z:

Ya... porque, ¿que clase de mejoras, digamos, no estructurales o no de peso, podemos tener con materiales compuestos?

S.M:

Eso es otra historia... ahí hay cosas interesantes. Mira, una cosa que se habla poco es del comportamiento acústico, por ejemplo. En algunos barcos, como los oceanográficos o pesqueros, el ruido estructural importa mucho.

Y ahí sí que ciertos materiales pueden aportar... pero claro, otra vez, no cambias todo el barco por eso. Ajustas zonas concretas.

J.Z:

No lo había pensado.

S.M:

Claro... es que al final el barco no es solo “que flote y no se rompa”. Tiene mil requisitos. Vibraciones, ruido, temperatura, accesibilidad... tú tienes que poder entrar a reparar cosas, tienes que poder modificar equipos con los años... Y eso, con materiales tradicionales, está muy interiorizado. Con otros... te diría que no tanto. Qué puede ser que sí ¿eh? No te digo que no, pero yo desde mi experiencia te digo que es más complicado.

J.Z:

Y el tema del fuego... que eso también lo he visto mencionado bastante, ¿qué me puedes decir?

S.M:

Sí... eso es importante, ¿eh? Más de lo que parece al principio. A ver... el acero ahí juega con ventaja clara. No es que sea inmune, porque si le metes temperatura pierde resistencia, eso es así... pero no arde. O sea, no alimenta el incendio. En cambio, cuando te vas a compuestos... claro, ahí ya tienes resinas, materiales poliméricos... y aunque hoy en día hay soluciones ignífugas y todo eso, no es lo mismo.

J.Z:

O sea, que hay más riesgo.

S.M:

Más riesgo... más incertidumbre. Y en según qué barcos, eso no te lo puedes permitir. Entonces muchas veces, aunque otras propiedades sean mejores, ese factor ya te condiciona bastante dónde puedes usar esos materiales y dónde no.

J.Z:

Entiendo.

S.M:

Luego hay otra cosa que te va a sonar menos académica, pero es muy real y es el miedo. O sea, tú cuando haces algo nuevo... tienes que asumir un riesgo. Y en barcos, ese riesgo es caro. Entonces, si la mejora no es muy clara... la gente no se lanza.

J.Z:

Claro.

S.M:

Nosotros, por ejemplo, hemos visto propuestas de materiales nuevos que en papel eran espectaculares. Pero luego rascas un poco... y ves que no hay suficiente histórico, que no hay suficientes barcos en operación... Y dices: vale, ¿quién es el primero que se la juega? Y nadie quiere ser ese.

J.Z:

Y el grafeno, por ejemplo, ¿cómo lo ves tú? Mi trabajo va un poco de ver si añadiéndolo en materiales compuestos, se mejoran las propiedades o incluso se superan las del acero. No sé si conoces algo de esto.

S.M:

El grafeno... sí... eso es el material milagro, ¿no? A ver... yo lo veo como algo interesante, pero todavía muy lejos de lo que se vende. Yo sí creo que va a entrar... pero por los bordes. En *coatings*, en sensores, en cosas muy específicas. Pero estructuralmente... yo no lo veo. Al menos en lo que nosotros hacemos.

J.Z:

¿Ni siquiera como refuerzo?

S.M:

Como refuerzo dentro de un composite... puede tener sentido, sí. Pero otra vez, es una mejora parcial. Y además tienes el problema de siempre: ¿cómo lo metes?, este ¿cómo lo distribuyes?, ¿cómo aseguras que está funcionando igual en toda la pieza? Eso en un laboratorio lo puedes controlar, pero en producción a nivel astillero... ya es otra cosa ¿entiendes? Y luego está el tema del coste, pero fíjate, no es solo el coste del material. Es el coste de cambiar procesos, de formar gente, de certificar, de asumir riesgos... Eso es lo que de verdad pesa te diría yo. Mira, te pongo otro ejemplo real. Nosotros hicimos un barco bastante grande donde se estudió optimizar muchísimo el peso... y al final lo que más impacto tuvo no fue cambiar el material principal. Fue rediseñar ciertas zonas, mejorar distribución, optimizar

estructuras secundarias... cosas menos vistosas. Muchas veces la clave no es tanto el material, como cómo lo usas. Puedes tener un material increíble... y usarlo mal. Y puedes tener uno normal... y hacer un barco muy bueno.

J.Z:

Y de cara al futuro... ¿qué crees que va a pasar?

S.M:

Pues... yo creo que vamos a seguir igual, sinceramente, quizá afinando en alguna cosa. Pero no veo una sustitución total de nada. El acero va a seguir. El aluminio también. Los compuestos tendrán su sitio. Y los nuevos materiales... irán entrando poco a poco, donde de verdad aporten. Ten en cuenta que todo esto que hablábamos del grafeno es relativamente reciente, como quien dice. Lleva muy poco tiempo y quizá tarde unos pocos años en consolidarse. Sí... es que al final esto no va de modas. Va de que el barco funcione, que el cliente gane dinero... y que tú no tengas problemas dentro de diez años.

J.Z:

Ya veo.

S.M:

Sí, sí... aquí la teoría dura lo que dura... luego sales al mar y... te pone en tu sitio bastante rápido.

J.Z:

Y ya, para ir acabando si te parece, saliéndonos un poco del tema de materiales... a nivel personal, ¿cómo dirías que trabaja un ingeniero en un astillero? O sea, ¿qué perfil hace falta de verdad para tener éxito en un astillero?

S.M:

Uf... pues mira, te diría que lo primero es quitarse la idea de ingeniero de despacho, porque aquí eso no funciona. Es decir, aquí tienes que ser... espabilado, en el buen sentido. O sea, resolutivo. Porque los problemas no vienen en formato bonito ni ordenado. Te llegan como llegan, a veces a medio hacer, a veces mal explicados... y tienes que ser capaz de entenderlos rápido y dar una solución.

Luego, flexibilidad total. Y cuando digo total es total. Un día estás con un cálculo, otro revisando un plano, al siguiente estás en taller viendo por qué una pieza no encaja como debería... y en medio tienes llamadas, correos, cambios de última hora... Aquí no hay dos días iguales, y si te gusta tener todo bajo control... te frustras. ¿entiendes? Sí, sí... y rapidez mental. Porque muchas veces no tienes todo el tiempo que te gustaría para pensar ¿eh? Hay decisiones que hay que tomar sobre la marcha, con la información que tienes en ese momento. Luego el inglés... eso ya no es ni un plus, es obligatorio. Aquí trabajamos con armadores de fuera, proveedores internacionales, documentación técnica en inglés... y no es solo leer, es defenderte en una reunión, explicar un problema, negociar algo. Si no te manejas ahí... te quedas fuera de muchas cosas importantes.

J.Z:

Claro.

S.M:

Y luego hay otra parte que no se enseña mucho en la carrera... que son las habilidades sociales. Aquí trabajas con mucha gente distinta. Taller, oficina técnica, compras, calidad, cliente... cada uno con su forma de ver las cosas.

Tienes que saber hablar con todos. Saber, pues yo que sé, cuándo insistir, cuándo ceder, cómo explicar algo técnico para que lo entienda alguien que, a lo mejor, pues no es ingeniero... y al revés, cómo traducir lo que te dice producción a un plano... Son muchas cosas. Y luego también convencer.,

porque muchas soluciones no son únicas. Hay varias opciones, y tienes que ser capaz de defender la que crees que es mejor.

J.Z:

O sea, no es solo técnica pura.

S.M: No, para nada. La técnica es la base, claro... pero si solo tienes eso, te quedas corto. Pero vamos, mucho ¿eh? O sea, un ingeniero que solo es bueno con los números no es un buen ingeniero. También te diría... tener iniciativa. Aquí se valora mucho la gente que no se queda esperando a que le digan qué hacer. Aquí yo prefiero contratar mil veces más a un joven como tú recién salido de la carrera e inexperto pero que me demuestra que tiene ganas. Pero mil veces más que un ingeniero, digamos lo así, más consolidado. Para empezar, porque estás invirtiendo en un recurso valioso que va a entender cómo se trabaja aquí concretamente y luego en unos años, ese chaval con la experiencia que coge, pues no tiene precio. Si ves un problema, te mueves, preguntas, propones... aunque no aciertes siempre. Eso se valora más que quedarse parado. Y luego... aguantar un poco la presión, también te lo digo. Porque hay plazos, hay dinero en juego, hay decisiones que afectan a mucha gente... y hay gente muy buena que no sabe manejar eso. Yo he visto de todo aquí, incluso buenos expedientes que no saben cómo comportarse frente a esa presión. Pero bueno... también tiene su punto, ¿eh? Cuando ves el barco terminado, botado... y dices he estado ahí metido... merece la pena.

J.Z:

Pues... la verdad es que no te quiero robar más tiempo, que bastante te he liado ya.

S.M:

Nada, hombre, si al final estas cosas también vienen bien para ordenar ideas, que en el día a día vamos siempre a mil.

J.Z:

Desde luego, a mí me ha servido muchísimo. Sobre todo, para aterrizar muchas cosas que, desde fuera, se ven bastante más simples de lo que realmente son.

S.M:

Sí... eso nos pasa a todos al principio. Luego ya vas viendo que aquí todo es más de: “depende” que de blanco o negro.

J.Z:

Me quedo con eso. Pues nada, de verdad, muchísimas gracias por tu tiempo y por la cercanía.

S.M:

Nada, hombre, para eso estamos. Y oye, si en algún momento necesitas cualquier cosa más o quieres volver a comentar algo, sin problema.

J.Z:

Perfecto, lo tendré en cuenta. Muchas gracias de nuevo.

S.M:

A ti, suerte con el trabajo.

ANEXO VI: ENTREVISTA AL DIRECTOR TÉCNICO RODMAN POLYSHIPS (MOAÑA)

A continuación, se transcribe de forma literal y a partir de una grabación, la entrevista realizada al director técnico de Astilleros Rodman Polyships en Moaña (en adelante R.T) [99] con el fin de lograr una comprensión global y profunda del caso de estudio en el ámbito concreto del trabajo de la construcción de buques mediante materiales compuestos, frente a otros materiales tradicionales como el acero.

R.T: Para un determinado proyecto en el que tiene unas formas determinadas. Cuando hacemos este tipo de elementos, por ejemplo, este que es el molde de un casco, analizamos que esa pieza la vamos a hacer más veces.

J.Z: Eso iba a preguntar, producís en serie, ¿no?

R.T: Exacto. Entonces en este caso, por ejemplo, eh vamos a hacer dos unidades, entonces no merece la pena económicamente para la empresa hacer la pieza, digamos, ya definitiva. Hacemos en madera, podemos desmoldear 5 o 6 piezas de este molde en madera y salimos del paso

J.Z: Y os vale para producir todas las unidades que queráis.

R.T: Sí, sí. La calidad de la pieza va a ser exactamente igual que las anteriores. La única diferencia es que cuando acabamos, desmontamos el molde y los guardamos. Por ejemplo, como aquí, mira, esto que tú ves aquí es el costado de una superestructura de un catamarán y está dividido en partes,

J.Z: O sea que es solo montarlo y volverlo a hacer.

R.T: Exactamente. Tiene sus propias cuadernas para mantener la rigidez del molde, y... al final el proceso es como si fuese como cuando haces un bizcocho, tú tienes un molde metálico dentro, tal, dejas que cuaje y lo sacas

J.Z: ¿Y hace falta el dejar que ...? ¿Tienes que hacerlo de alguna manera o es simplemente esperar a que cuaje?

R.T: No, aquí en este caso lo que hacemos, el proceso de laminación es, tú pones la fibra y le echas una resina, que es el que une, y a esa resina, si no le echas, o sea, esa resina la tenemos en contenedores, lo dejo aquí en esta nave, esa resina pues está en estado líquido, el tiempo que... hasta que caduca, que pierde propiedades, lo que hace que catalice es el catalizador, que es, tu echas en un cubo la resina, la mezclas con el catalizador y tienes un tiempo. Cuanto más catalizador le echas, menos tiempo tiene. Entonces, usando acaba, tú imagínate, dejas el cubo, echas el catalizador para que catalice, imagínate. Entonces habitualmente lo dejamos para que catalice en dos, tres horas, para que a la gente le dé tiempo. No es lo mismo hacer esta pieza. Que no, que es un molde que verás después en un casco grande en el que tienes que ir a buscar los cubos y hay unos tiempos. Si dejas esa resina con ese catalizador, esa resina acaba catalizando y al final de todo, si tú le das un golpe al cubo y sale, quedaría un medallón de resina seca.

J.Z: Yo tenía entendido que aparte del laminado manual habitual era el laminado por vacío.

R.T: Sí, hay varios procesos de laminación. Laminación a mano, que es el inicial de todo, que es tú pones la fibra y vas empapando la fibra e intentando que toda la superficie quede bien resinada y lo dejas secar. Cuando seca, vuelves a dar otra capa. Después colocas el núcleo. Ese es el proceso manual. El proceso que le llama ahora por infusión, que es el por vacío, es; tú pones todas las piezas, todas las telas de debajo, pones el PVC, pones todas las telas del vacío, y una vez que pones todas las telas, pones una manta, que es un plástico, alrededor de toda la pieza metes tubos, unos tubos que son los que hacen el vacío de esa zona. Y después otros turnos que son los que alimentan de resina. ¿Entonces que pasa? Cuando haces el vacío, conectas la resina. Entonces el propio vacío de quitar el aire está metiendo la

resina. Entonces empapas toda la resina, toda la pieza. A las 8 horas o al día siguiente, quitas el vacío, quitas el plástico y ya tienes la pieza fabricada. ¿Cuál es la diferencia entre infusión y laminación manual? La separación entre capas. Es decir, en esta laminación que estamos haciendo, entre capa y capa hay aire, muy poco aire, pero hay aire. ¿Cuando haces el vacío, ese aire qué pasa? Una pieza manual, imagínate, son 4 o 5 milímetros y una pieza de vacío son 3. Las propiedades mecánicas son mejores. Digamos que la firma trabaja todo como uno. En este caso, si no lo haces bien, puedes producir deslaminación entre distintas gamas,

J.Z: ¿Por qué no se hace siempre por infusión al vacío?

R.T: por precio y... porque el molde no está siempre preparado. Por ejemplo, en este caso, yo ahora, si en este caso pongo toda la fibra, pongo los plásticos y hago el vacío. Perdería aire, Saldría el aire. Entonces, ¿Qué pasa? La máquina está intentando hacer el vacío, pero tiene fuga como en un neumático. Tú hinchas Si está pinchado no estás haciendo nada. Pues esto es exactamente igual.

J.Z: Vale, O sea, veo que tiene su parte artesanal.

R.T: Sí, esta, por ejemplo, esta es la superestructura de un barco dado la vuelta.

J.Z: ¿Esto es poliéster reforzado en fibra de vidrio?

R.T: Sí, sí, sí. Lo que pasa es que es la primera capa. Te voy a enseñar ahora. Estos son los procesos que tienen tanto de laminación como de seguridad. Cómo tienes que ordenar los residuos...

J.Z: Supongo que hay un montón de normativas de medio ambiente...

R.T: Eso es que las piezas que estamos fabricando están secando. Por eso necesitamos ventilación, digamos. Son flujos que van quedando en el ambiente. ¿Qué pasa? Si en el proceso habitual no pasa nada, pero, por ejemplo, si tú estás encima de una pieza durante 4 horas, lo mejor es que pongas una....

Mira, ahora, te comento cómo son las fibras, Los distintos tipos de fibra que utilizamos, la diferencia entre ellos es el gramaje, el tramado.

R.T: Exactamente. Este que es, por ejemplo, muy grueso. Este, por ejemplo, lo ves que es mucho más fino. Este que es un poquito más grueso que este, pero no tanto como este. Entonces, ¿Qué pasa?

J.Z: ¿Esto es la fibra sin la resina?

R.T: Sin la resina, claro. Esto, te fijas que hay una diferencia de enlazado de esta parte con esta parte. ¿Esto qué quiere decir? Que esta parte es lo que llamamos mat. Fíjate aquí, esto es muy tupido, porque cuando tú laminas la resina, esto te da muy buena calidad superficial. Si tú laminases con esto, al final el molde es espejo. Entonces el casco te aparecería con estas hendiduras. Lo que hacemos es jugamos, las primeras capas que son del casco, las laminamos con este tipo de material para que el casco, cuando tú lo ves al sol, parece un espejo. Y por la parte de dentro vamos metiendo ese tipo de gramaje, que son los que dan estructura a la pieza

J.Z: O sea del producto final del poliéster, lo que realmente lo hace fuerte. ¿Es más la trama que la resina?

R.T: No, no, la resina no hace nada. La resina lo único que hace es hacer que las distintas capas que tú estás colocando trabajen como una sola pieza. Digamos que tú estás fabricando tu chapa.

Después, por ejemplo, bueno, cuando mandamos unos planos para laminar, nosotros tenemos una limitación en el rollo, que es de manga. En eslora, no ¿No? Entonces, ¿Qué pasa? ¿Tú en un barco, de, vamos a poner, 22 metros, ¿vale? yo tengo dos metros. yo cojo, tiro y hago tiras de dos metros o de ocho metros, pero el ancho es ese. Entonces, ¿Qué pasa? yo en el casco, en lo que es todo el contorno de casco, voy haciendo solapas y los superpongo. Hacemos unas medidas que sean fáciles de trabajar para la gente. Tú si pones 35 metros de paño, la gente a la hora de colocar 35 metros de paño en un molde que es así, es complicado. Entonces, ¿Qué pasa? Lo hacemos en tramos que sean cómodos.

J.Z: Y luego es la resina lo que lo hace todo.

R.T: Y sobre estos moldes, por ejemplo, otro proyecto que estamos haciendo también para la Armada, para el tren de buceadores, entonces, le vamos a hacer ese tipo de barco, que ahora vas a ver.

J.Z: Esto es lo que me has explicado de la bomba de vacío, ¿No?

R.T: Esto lo que es, es una aspiradora. La siguiente fase. Es el refuerzo. Utilizamos lo que son las omegas. Hay los perfiles de acero para los barcos, perfiles de aluminio, y nosotros utilizamos ese tipo de omegas o de perfiles, que los colocamos por todo el casco y los laminamos. Vas a ver aquí cómo los colocamos.

Están colocando, en función del tramo, los refuerzos. por detrás va la agente y va laminando. Ves cómo han puesto la fibra y ahora él con la resina va empapando.

J.Z: Pero lo que veo que es un trabajo que tarda. No sé por qué pensaba que era mucho menos artesanal.

R.T: Sí, sí claro...porque al final. Ten en cuenta que es lo más importante del barco.

Y fíjate, la línea esa roja que han marcado, les está marcando dónde va a ir la cubierta. Por eso no laminan más arriba.

J.Z: ¿Este que barco es?

R.T: El R-38. Este es un barco que, después te paso la disposición general.

J.Z: Sí, por ver cómo. Porque ahora mismo no veo. Bueno, me imagino un poco la estructura del casco, pero...

R.T: Mira, este barco va a ser un barco que va a tener una cubierta muy amplia. Aquí en popa va a tener un barco central donde van a ir 16 buceadores. En la parte de proa van a llevar una cabina donde van a poder llevar los controles. Y en proa de todo tendrán un sitio con unos bancos para que la gente, si sale de un día de muy mal tiempo, pueda refugiarse.

J.Z: Es que estuve también mirando, bueno, investigando la construcción de acero. No tiene nada que ver. Es mucho más a gran escala

R.T: Bueno sí, pero ¿Qué pasa? Que el acero lo que hace es va haciendo bloques, va haciendo módulo. Aquí no, tú aquí no ves uniones. yo el casco lo hago de una única pieza.

J.Z: ¿Y por qué? Esta es la gran duda de mi TFG, que yo todavía no tengo muy clara. ¿Por qué no se hacen barcos más grandes de materiales compuestos?

R.T: ¿A qué te refieres con barcos más grandes?

J.Z: El barco, o sea, tengo entendido que los barcos así de gran porte, mercantes de 200 metros de eslora, obviamente se hacen con acero y el PRFV se reservan a yates, a patrulleros,

R.T: No, pero eso no es cierto, mira, eso es la mala publicidad que quieren dar los fabricantes de aluminio y de acero, para que el PRFV no le quite mercado. yo te hago una pregunta, los cazaminas que están en el mundo, ¿De qué están hechos los cascos?

J.Z: Supongo que de PRFV, pero por tema que interesa.

R.T: Claro, ¿Y cuántos metros tiene?

J.Z: ¿Que tendrá 40 metros de eslora

R.T: o tiene más. Tiene 50, casi 60 metros.

J.Z: ¿Y por qué no se hacen mercantes? ¿Porque a esa escala ya no te compensa?

R.T: Porque económicamente no te compensa hacer moldes a esas escalas

J.Z: ¿Y estructuralmente no responde mejor el acero?

R.T: No, vamos a ver, hoy salía un artículo en un periódico, en el AS creo que fue, curiosamente, decía que los chinos y los americanos están estudiando que las naves que vayan a ir a al espacio van a tener que ser de composite. Por resistencia, por durabilidad y sobre todo por mantenimiento. El tema de composite, ha tenido la mala fama de que era plástico, pero tú ahora mismo un avión, el 80% es composite, los trenes también, los coches cada vez tienen más composite, ¿Por qué? Porque pasa menos. Y a nivel de resistencia, por ejemplo, Aduanas, que... que está en persecución contra narco lanchas, se han pegado leñazos contra bateas, han traído los barcos para aquí y se han reparado el rasguño. ¿Qué pasa? En aluminio, por ejemplo, tienes que tener mucho cuidado, por ejemplo, la zona de soldadura, porque como tengas un impacto, rompe la soldadura y tienes una vía de agua que te hunde el barco, entonces al final de todo esto, tú escucharás como todo en la vida, pues me interesa hablar bien de una cosa, o me interesa hablar mal de otra.

Nosotros hemos hecho patrulleros de 45 metros para aduana a 30 nudos de velocidad. Te voy a enseñar ahora el molde, además.

J.Z: o sea, tenía entendido que... yo pensaba hasta que era inviable hacer buques tan grandes también porque que era muchísimo más caro.

R.T: No, no que va.

R.T: Esa cubierta que ves aquí es la de la 66 vuestra, hemos hecho la pieza y a continuación vamos a colocar los refuerzos

J.Z: ¿Vale, pero esta no es igual que las lanchas que tenemos nosotros en la escuela? No, porque nosotros las que tenemos en la escuela naval son la Rodman...

R.T: ...la 66.

J.Z: Sí, pero no son tan grandes como esta.

R.T: es esta, sí.

J.Z: Pues me sorprende un montón...

R.T: Claro, porque tu percepción del tamaño es completamente diferente aquí que en el agua.

J.Z: Puede ser. Claro, claro,

R.T: Seguro, además.

J.Z: Le voy a sacar una foto a esto ya por cariño a la lancha que le tengo

R.T: Nosotros, por ejemplo, tenemos unos procedimientos, unos procesos de controles de calidad...

J.Z: Y puedo ver la resina sería tenéis ahí.

R.T: ¿Pero ¿qué quieres, ver cómo es?

J.Z: Si se puede...

R.T: Sí claro. Rodman 66. Aquí tienes el laminado. Nosotros le marcamos todo lo que tienen que hacer Y estos distintos colores, la diferencia es el PVC que utilizamos. Nosotros utilizamos distintos PVC porque en función de la zona donde está, es un PVC de alta densidad o...

J.Z: Alta densidad. Cuando necesitas mayor resistencia

R.T: por ejemplo, donde colocamos las vitas. Y después lo que hacemos es, hacemos un seguimiento, tenemos un control. Es decir, dentro de diez años me llamas y me dices, mira, ya serás almirante, hemos tenido un problema con un barco y tal, que hemos tenido una deslaminación. Pues yo vendré porque vemos este archivo, hablaré con el fabricante y le diré mira, han tenido un problema de laminación. Y me dirá ¿Qué lote de resina es? Pues el lote de resina era esta, el ACTP s-80 y el lote era

el 7171037. Entonces llamará a fábrica, verá su lote y dirá ostras, pues efectivamente, tenemos un problema en el lote. Esto es también gracias a que tenemos nuestro propio control de calidad. El tener nuestro proceso control, de diseño y de producción, lo que nos ayuda es hacer un seguimiento completo desde que empezamos hasta que se hace la pieza. Incluso tenemos el operario. Este plano si quieres, te lo paso.

J.Z: Bueno, es que claro, yo no era consciente hasta qué nivel de detalle tiene. Veo que la resina tiene el símbolo de inflamable.

R.T: Sí... Ah mira, mira Todo esto que ves aquí es resina que ha sobrado

J.Z: después del catalizador, ¿no?

R.T: Ya está catalizando prácticamente se catalizado entonces ellos, lo limpian todo.

J.Z: esto supongo que no lo puedes tirar.

R.T: No, no, no. Después viene un gestor de residuos y lo lleva. Fíjate que hay distintos tipos de calderos y todos están prácticamente secos porque entre resina y fibra...

J.Z: Y otro de los problemas que he visto que se achacan el PRFV es precisamente que se comporta mucho peor frente al fuego. Mucho peor que el acero.

R.T: Sí, frente al acero, sí. Pero ahora hay procesos de... Hay resinas que ya son ignífugas el fuego.

J.Z: Ah, ¿sí? ¿Y qué se le aplica a una resina?

R.T: ¿Qué pasa? Que esas resinas que son ignífugas al fuego tienen muchos aditivos para proteger, entonces, esos aditivos le quitan propiedades de resistencia. Tienes que combinar. ¿Qué hacemos nosotros? Los cascos lo hacemos con la resina, que sean estructuralmente resistentes, y el interior, donde va la cámara de máquinas, le damos unos baños de resina de ese tipo.

J.Z: Vale. Porque es zona más peligrosa y entonces ahí protege.

R.T: Porque a ti lo de la cámara de máquina, porque te interesa proteger la parte de dentro

R.T: Mira esto, es el núcleo. En este caso son maderas que van a cerrar ahí. Pero bueno, muchas veces lo que hacemos son de este tipo para laminar.

J.Z: Mucho más duras que las que me has enseñado antes. ¿Y esas se ponen en alguna parte en concreto? ¿En crujía?

R.T: Si. Vas a poner una vita, ahí pones.

J.Z: Con este molde vais a hacer las dos lanchas, ¿no?

R.T: Hemos hecho ya 45 barcos y ahora como digo, vamos a hacer tres más. Por eso aquí hemos hecho molde.

J.Z: Claro, claro. Sale mucho más rentable eso que decías,

R.T: Sí, y fíjate en las cubiertas. Aquí ves cosas de distintos colores. Esto que ves aquí es madera que la hemos laminado. ¿Por qué? Porque cuando desmoldemos la cubierta, aquí en esta zona se va a atornillar algo y de esta manera queda rígido. Allí hay otra madera porque ahí se va a colocar los cuadros eléctricos.

J.Z: ¿Esto qué es

R.T: una cubierta de un buque deportivo. Desmoldamos las piezas y las sacamos fuera. Vale. Entonces tenemos aquí una zona que es la zona de corte, porque la pieza en sí sale con rebordes, con imperfecciones. Sí, Para poder desmoldear. Entonces lo que hacemos aquí es cortar.

J.Z: ¿Y cómo unís?

R.T: Mira, si te fijas, este casco que se ha desmoldado tiene como una pestaña. Esa pestaña la cortamos como aquella de allí. Queda lisa, lisa. Ellos con una máquina de disco van cortando toda la pieza y la dejan ya para... A veces ¿Qué pasa? Esto que ves aquí es que al desmoldear hay alguna zona del molde que no tiene el ángulo de desmoldeo y queda como agarrado. Entonces se quedó machacado. Eso no preocupa porque aquí es donde vamos a pegar los cristales. Entonces no se va a ver. Lo lijamos todo, metemos el adhesivo y pegamos.

J.Z: Y esto con el casco, ¿Con qué adhesivo lo unes?

R.T: Hay unos adhesivos que son estructurales, que ahora incluso... nosotros antiguamente cogíamos caja de zapato, la cubierta y este es el casco. Pones, atornillabas y por dentro laminabas la unión. Pero ahora ya hay adhesivos que tú los pones la parte de dentro de la cubierta y la parte de fuera del casco. Bajas el casco, cubierta, pegas unos tornillos, porque el tornillo lo que te garantiza es que las dos piezas queden unidas, y de esta manera con el adhesivo ya muere.

J.Z: Pero tiene la ventaja de que prácticamente son tres o cuatro piezas todo el barco.

R.T: No, no, son más. Mira esto. Esto es el techo, los techos de las cubiertas, porque así de esta manera tú puedes hacer el barco, la cara interior de calidad fibra. Entonces, de esta manera, ahora lo que haríamos sería sobre la cubierta de este barco, cogeríamos esta pieza y la pegaríamos encima. Le daríamos la vuelta y atendemos el techo.

J.Z: Vale, vale. Y estos agujeros están hechos para poner luz, lámparas...

R.T: Tiene esta forma porque es un barco de náutica deportiva. Y aquí se va a colocar un cristal. Y estas son ventanas que vamos a dejar al camarote.

J.Z: Esto también es un buque de recreo, ¿no?

R.T: Sí. Fíjate que de la misma manera que hicimos con el techo, también lo hacemos con las partes interiores. Tenemos el caso con acabado en fibra. Y después llegamos con esta pieza interior y la metemos.

J.Z: Y este molde que tenéis aquí.

R.T: este es el molde que te decía de 45 metros.

Mira, esto que ves aquí, es hacer el vacío para un mamparo

J.Z: ¿tenéis que hacer el vacío para cada pieza?

R.T: Justo. Evidentemente esto es muy fácil porque tenemos un molde recto. Fíjate, ¿No ves esto que es como una especie de como de plastilina que lo que te hace es asegurarte que...

J.Z: ...que no haya fugas?

R.T: Ahí está. Y este es el plástico del que te hablaba.

J.Z: Esta es la bomba, ¿No?

R.T: Esta es la bomba de vacío. Tenemos aquí el compresor, arrancamos, vemos que llegue hasta un valor, dice vale, ya está. Fíjate que ahí lo que hacemos es...

J.Z: ¿Y dónde está la resina en este caso que me has dicho que se iba metiendo? Ah, ya estaba. Ya está impregnada.

R.T: Sí. Y mira, para colocar en un futuro una puerta. Cuando esté seco, lo sacamos y lo metemos contra el casco.

Lo que me decías antes, podríamos hacerlo de 60 metros; por supuesto.

J.Z: ¿Qué te limita? ¿Lo que me has dicho del dinero?

R.T: A lo mejor este molde te cuesta un millón de euros.

J.Z: Claro, pero ¿Y por qué no una fragata de la Armada no hace sus barcos con PRFV?

R.T: Por qué no nos contratáis, vais siempre a Navantia.

J.Z: Es que ahí ellos se han llevado el pastel.

R.T: Exacto.

¿No ves?, esta cubierta, es una cubierta de 35 metros. Te voy a enseñar ahora un casco de 35 metros.

J.Z: pero digo yo que también, se me hace raro pensar que no haya ninguna armada del mundo, que yo sepa, que tenga barcos grandes de PRFV. Habrá algún tipo de propiedad que el acero le supere.

R.T: No, no, mira, esto es un tema de clientes. Las armadas, deberían de tener hasta una cierta eslora. Está pasando, está pasando con vosotros. Es decir, vosotros hasta ahora tenéis barcos de 14, de 20 metros, de 25 metros en acero. Ya tiene una edad entonces, hace dos años, dos, tres años, bajaron una R 66, que son 22 metros y una 101, que es un barco de 30 metros, el *Isla de León*, que son de poliéster o de composite. Se están dando cuenta que primero: el barco puede sacar el barco sin tanta gente, sin tanta dotación. Tú en un barco, imagínate un barco de acero, pues salen con 20 personas o con 18 personas. Y con un barco de estos con 12 personas, con 10 personas, porque es más fácil de manejar, porque es un barco más moderno. Y luego, ahorro de combustible, más velocidad...

J.Z: ¿Tiene mayor ciclo de vida?

R.T: Un barco de composites tiene más operatividad. Con este barco tú sales y tú con un barco de acero tienes una navegación de doce, catorce nudos, con el *Isla Pinto* llegas a treinta nudos. O sea, el tiempo es oro y a nadie le gusta estar dos horas más en el barco mirando para cómo vas navegando y te van adelantando los veleros.

J.Z: ¿Y el ahorro de pintura? ¿Porque claro, te ahorras en pinturas anticorrosivas o hay alguna aplicación superficial que tengas que hacer?

R.T: El antifouling lo tienes que dar, sí o sí

J.Z: Tengo entendido que hay una aplicación que le das al acero que a este tipo de barcos a lo mejor no hace falta.

R.T: Tú el barco de acero lo tienes que pintar cada X tiempo. Esto, solo antifouling.

R.T: A nivel operativo y a nivel de mantenimiento, los costes son muchísimo menor.

J.Z: claro, porque antifouling solo se lo das a la obra viva, ¿no? Y las pinturas de acero se dan también a la obra muerta.

R.T: Y, además, tienes un golpe en acero y tienes que pintar todo el barco. En esto no tienes que pintar porque el gelcoat ya está metido en la propia...

J.Z: y si tienes una avería, bueno, una avería que se te rompe un mamparo, imagínate. Claro, no puedes soldarlo.

R.T: Sí, con normalidad. Y puede soldar: laminamos acero inoxidable en fibra. Lo que pasa que hemos puesto un carrito para poder hacerlo, más pequeños son 37 y el más grande son 45 y el de ahí es el molde del *Isla de León*, del 101. Y ahora vas a ver un casco que es como el “Isla del León”, pero un poquito más, un poquito más grande.

J.Z: ¿Y al PRFV le puedes añadir, porque bueno también en mi trabajo hablo de ello, le puedes añadir grafeno o algún tipo de material de estos para mejorar sus propiedades, como me comentabas antes, con lo de mejorar su comportamiento frente al fuego?

R.T: El problema del grafeno. El grafeno tiene unas propiedades mecánicas buenas. El problema del grafeno es la forma en cómo lo proyectas. El coste de fabricar una pieza en grafeno es mucho más alto que ... Sería incluso más rentable, siendo caro, hacerlo en fibra de carbono. ¿Cuál es el problema

que tiene la fibra de carbono? Que necesita un proceso de post-curado. Es decir, tú haces la pieza y el carbono para que realmente trabaje bien tienes que meterlo en un horno, darle un tratamiento de temperatura para que... digamos que es como un post... La pieza cura y fuerzas a que tenga otro curado adicional. Estas piezas no, estas piezas tú las láminas, curan, no curan en dos días, curan en quince, veinte días. Nosotros, por ejemplo, cuando hacemos una laminación y desmoldamos a los 5 días o a los 15 días o al mes, depende del tamaño de la pieza, nosotros desmoldamos con mamparos y con estructura para que el casco no se deforme, pero el barco seguimos trabajando en él internamente sigue catalizando y sigue endureciendo la pieza, o sea, la pieza acaba de endurecer al 100%. Pues eso, al mes, mes y medio.

J.Z: Y luego que el grafeno le puedes poner muy pequeñísima cantidad.

R.T: No te sabría decir muy bien el tema grafeno, porque no es algo que nosotros estemos... Sé que se han hecho algunos barcos en grafeno.

J.Z: Pero tengo entendido que no te sale rentable

R.T: Lógicamente. Este casco que veis aquí es el casco de la 66.

Le hemos preparado los postizos y todo eso. Y lo que haremos a continuación es laminarlo.

R.T: Esas huellas que ves ahí son las tomas de fondo. En un futuro... Esto que ves aquí son las toberas de las hélices.

J.Z: Tampoco te quiero quitar mucho tiempo. Cuando tú me digas...

R.T: Nada, tranquilo. Esto que ves aquí es el molde de un casco de 35 metros.

J.Z: Y luego para desmoldar.

R.T: Se hace con grúas. Tenemos varios. Enganchamos, laminamos unas asas que luego quitamos, tiramos para arriba. Y bueno, en este caso, los cascos y las cubiertas es muy fácil porque tiene mucha superficie y mucho ángulo de desmoldeo.

J.Z: ¿Y luego todos los motores y equipos y tal, los encargáis o los fabricáis vosotros?

R.T: No, los encargamos.

Mira, vamos a ver este casco por dentro. Cuando desmoldeamos el casco ya desmoldamos con prácticamente todo lo reforzado y con los mamparos para que no pierda la forma. Al desmoldear la pieza se...

J.Z: ¿Y todo esto lo hacéis? ¿Todo el proceso productivo del barco es dentro de la nave?

R.T: De esta nave, de aquella nave y de esta.

J.Z: Y luego lo de añadir equipos, motor y todo eso.

R.T: Aquí en esta también aquí. Y nosotros también hacemos el diseño. No externalizamos nada.

J.Z: ¿Toda la oficina técnica de diseño es vuestra?

R.T: Claro. En este caso, por ejemplo, ves cómo van colocando. Pues eso, los jets. Fíjate, que le han puesto la espuma para proteger del fuego.

J.Z: ¿Cuál es la espuma, perdón?

R.T: Esta plateada. Fíjate cómo integran, por ejemplo, piezas metálicas sobre casco, las ventilaciones y las extracciones ahí arriba. Ves allá al fondo, cuadros eléctricos que están atornillados contra... Ves las canaletas de cableado, que son como las de... después del procedimiento de fabricación, tú desde dentro podrías no saber si es un barco de aluminio, de fibra o de acero, porque los procesos son exactamente iguales Y aquí un poco lo que te comentaba de la unión, fíjate, esto que ves aquí es la pasta que ha quedado ahí...

J.Z: sólo con la unión atornillada ya realmente aguanta

R.T: y atornillamos lo que llamamos a tresbolillo, que no hacemos en la misma línea, lo hacemos en zigzag para que digamos, que garanticemos que la superficie de pegado aguante. Y bueno, por la parte de fuera, pues eso, rejillas, cableados. Una vez que el bajo está acabado, lo ve traemos para esta zona de expediciones aquí, o bien si es un bajo muy grande, a través de esos carros lo bajamos al agua, si no es muy grande, abrimos estas dos puertas, cogemos un traveller y lo llevamos.

J.Z: ¿Y hacéis vosotros las primeras pruebas en navegación?

R.T: Pruebas particulares. Y una vez que vemos que el barco funciona y que no hay ningún problema, hacemos las pruebas con el armador. Ahora estamos en la parte náutica, deportiva, que nosotros separamos lo que es el sector o el tema de producción de lo que va para clientes particulares. Para clientes y profesionales.

J.Z: ¿Tenéis clientes que encargan un barco concreto?

R.T: Sí, lo que te dicen, mira, quiero un R 31 con dos motores por la borda, con una electrónica, con un color de tapicería y todo lo haces a medida, porque esto va por ejemplo, lo puedes hacer con fuera bordas, lo puedes hacer con motores intrabordas... Después bueno, hacemos eso, que quieres colocar un pórtico de jopa, colocamos un pórtico de popa. Quieres meter una grúa para carga, pues exactamente igual.

Después ahora, por ejemplo, una cosa que estamos haciendo y que bueno, no solamente nosotros, sino todo el mundo es, aparte de pintar la obra viva de los cascos, protegemos la parte metálica, la línea del eje, la pintamos con una pintura. Hasta hace unos años no se podía hacer esto porque el giro de la hélice despegaba la pintura de la...

J.Z: Con la cavitación.

R.T: Claro. Entonces ahora en este caso, ahora se agarra muy bien a lo que es el eje y fíjate que ha quedado ya perfectamente.

J.Z: ¿y está es la pintura anti-fouling?

R.T: Esa es la pintura exactamente. Tipo Hempel

J.Z: Universidad. Este barco es para la Uvigo.

R.T: Sí, para investigación. Fíjate cuando esto ya por ejemplo tiene una sonda para temas de batimetrías y esas cosas.

J.Z: Este ya está casi a punto, ¿no?

R.T: este ya está entregado, lo que pasa es que lo han traído aquí para hacer pruebas. Para hacer pruebas, perdón, para mantenimiento.

Te voy a enseñar el laboratorio que tenemos.

ANEXO VII: ENTREVISTA A LA DIRECTORA DEL LABORATORIO DE RODMAN POLYSHIPS

A continuación, se transcribe de forma literal y a partir de una grabación, la entrevista realizada a la directora del laboratorio de producción de composites de Rodman Polyships en Moaña (en adelante D.L.) [100] con el fin de lograr una comprensión global y profunda del caso de estudio en el ámbito concreto de la fabricación y las propiedades de los materiales compuestos

D.L: Aquí tenemos un pequeño laboratorio donde homologamos las resinas y los gelcoat y hacemos también los ensayos mecánicos del composite que hacemos nosotros mismos.

J.Z: ¿Todo el composite es vuestro? ¿No lo encargáis, es todo vuestro?

D.L: Todo lo fabricamos nosotros. Todo lo que ves es fabricado. No se compran como en acero en chapa

No, es más, aunque hacemos barcos y todo el mundo nos llama astillero, nosotros somos industria química porque hacemos transformación química. Nuestro producto en sí es el composite. Es nuestro lo que sabemos fabricar. Después ensamblamos y montamos. Lo que me comentabas antes, yo sé que el grafeno tiene mucha complicación en el proceso de elaboración y los modelos. El grafeno no ha salido adelante porque no es un proceso productivo, digamos. Sí, claro. Para piezas pequeñas sí, pero piezas grandes como las nuestras...Y después los hornos, las autoclaves Es verdad, que mejora porque digamos que con menos capas tienes las mismas propiedades mecánicas.

J.Z: El precio, a lo mejor la viabilidad.

D.L: Haces cosas más ligeras, pero también date cuenta de la aplicación. A lo mejor más ligero para una patrullera no es lo que necesitas. Igual para una Copa América sí. La comparación perfecta es la es la Fórmula 1. La Fórmula 1 que se hace en fibra de carbono. Si lo hicieses en fibra de vidrio, pesaría más porque necesitarías más capas para tener las mismas. Para cumplir la normativa.

Esto es la quilla de una Rodman 111 de Aduanas. Esto es un casco normal, un casco básico. Este es un laminado de un casco básico. Esto es una barbaridad. Porque aquí, al ser una quilla, nos coinciden los solapes de las capas que vienen de un lado y del otro. Y los sobrelaminados. Mira las fibras, la orientación, cada posición.

Las máximas propiedades mecánicas las van a dar la dirección de la fibra. Por eso, dependiendo la zona del barco, se usa 0,90 o 0,45. Entonces ahí buscas la posición de la fibra para buscar resistencia máxima. Y aquí ves las capas. De hecho, que ves que lleva Kevlar, lo que es la aramida, el nombre comercial es Kevlar. Lleva las capas distintas con la fibra por el medio, con la resina...

Nosotros tenemos una mufla, un horno que llega a 650 grados. Podemos poner un ensayo en el que a partir de 640 grados se degrada la fibra. Para luego hacer el laminado...

J.Z: claro. No sé. Además, que no entendía cómo era el proceso del laminado yo pensaba que el laminado era mucho más industrial. Y he visto ahí a dos operarios que estaban haciéndolo a mano y era súper artesanal.

Hemos hecho también infusiones y hacemos inyección, Pero al final el método, digamos, más rápido y más económico es usar la resina pigmentada, la pintura. Y esta es una resina de viniléster. Entonces ya ves que es completamente líquido.

J.Z: ¿Y cuál es la diferencia?

D.L: Esto es pintura, entonces es la primera capa que se da a los barcos, nosotros los hacemos pintado. El barco sale pintado. Primero pintas Y es que es la misma naturaleza química. Bueno, este ya está un poco espeso. Esta de aquí. Esta es la misma naturaleza química, el gelcoat que la resina, solo que

el gelcoat está pigmentado Y tiene algún componente más también, porque va a ser la primera capa barrera con el agua, resistencia a hidrólisis. Entonces pintamos y una vez que han pasado 8 horas, tenemos que dar la primera capa de resina con fibra. Por eso los barcos de acero lo tienes que pintar cada X tiempo. Esto es una capa más de resina y en el molde es eso. Los barcos nuestros se fabrican al revés, se fabrican de fuera para adentro. Tú en el molde primero pintas el color.

La fabricación del poliéster, pues hay que verla para entenderla, pero no todo el mundo... No te puedes hacer una idea si no lo ves. Eso de ir aplicando capa de fibra con capa de resina ir calculando curando. Y aparte no podemos aplicar todas las capas juntas porque la reacción química, empiezas la reacción química, la resina en el momento que la vas a usar, la catalizas. Entonces ahí tienes un tiempo, un tiempo de uso hasta que llega tiempo de gel, que bueno, con los medios que tenemos aquí, nosotros calculamos aquí en esa y hacemos el apuro para ver el tiempo que tiene la gente para trabajar. Entonces ya la pides cuando le dices a la multinacional que te hace resina yo quiero esta resina con estas características y quiero mi tiempo de gel de 45 minutos para que ya tenga 45 minutos para mojar bien las fibras y que me empiece a tirar. Cuando al endurecer, contrae, porque es exotérmica, suelta calor. Nosotros usamos vasitos de estos de 100 gramos y nos llega a los 150 grados. Para evitar esa contracción damos las capas, como mucho damos dos capas de fibra de vidrio con resina. Date cuenta que en el molde tampoco alcanza esta temperatura porque la disipación del calor es mucho más grande y el espesor es menor que los 100 gramos que nos tenemos aquí. Pero bueno, se dan capas de dos en dos, al día siguiente damos otras dos. Sí, para que no se te contraiga, para que no se te marque la fibra. No sé si fijaste alguna vez en los yates se ven algunos que se marcan los cuadraditos de la fibra por el casco. Eso es por contracción excesiva resina, cosa que se ve mucho más claro en los barcos de metal. Claro, porque si te das cuenta de las fragatas vuestras están todas las chapas todas dobladas. Una del calor de las soldaduras y dos del calor de las misiones. Cada vez que van a las misiones, sol que les pega. Al final sufren y sufren. La fibra es un gran desconocido, que la gente le tiene mucha tal, pero

J.Z: Sí, Y le comentaba a R. que además yo pensaba que se limitaba su uso a buques muy pequeños, pues eso, patrulleros muy pequeños, buques de recreo y tal. Y cuando he visto el molde de buque 45 metros, me ha cambiado un poco la visión.

D.L: y de hecho ahora es curioso que por lo El minado del estrecho de Ormuz, ahora están todas las noticias porque hablan de las fantásticas características del PRFV, porque claro que contra las minas es muy bueno. Y de todas las marinas de Europa, que España es el único que tiene los cazaminas de PRFV.

Los rusos, hace un par de años nos habían enseñado el chico, el que venía a hacer las infusiones, estaba haciendo un cazaminas de 85 metros por el procedimiento de infusión y veías, nos enseñó imágenes del casco. El molde era en acero, porque era tan grande que era un barco enorme y estaba haciendo en fibra.

J.Z: Es perfectamente viable.

D.L: Tú lo puedes hacer hasta 100 metros, pero el problema es hacer el molde. Lo costoso en esas cosas es hacer el molde. Pero si hay alguien que te lo paga...

Para patrullera, sobre todo, y catamaranes y tal, la verdad es que funciona,

J.Z: compensa. Bueno, hacerlo de acero no tiene mucho sentido. Un catamarán, hacerlo de acero no tiene ningún sentido.

D.L: Aluminio gusta también, pero yo lo que digo siempre es, al final la fibra, te olvidas de la corrosión. Tú al final con un barco de acero, de aluminio, sobre todo de aluminio. Hablando de armadas, también la americana, se hicieron uno y salieron por patas. La forma que tienen que trabajar todas las armadas es el barco, estar continuamente trabajando y os acercáis a otro y no andas con cuidado, vais a golpe. Entonces el casco sufre. Si lo haces de aluminio, por ejemplo, el aluminio no puedes trabajar de una determinada manera.

El poliéster tiene cualquier golpe, eliminas las capas dañadas y lo reconstruyes. Y la reparación puede ser de un casco, si es muy pequeño, estamos hablando, puede ser un par de semanas. ¿Cuánto tiempo tardas en reparar un casco de aluminio? Suelen pasar con las que tiene el aluminio, que es que la gente como cuando piensa en oxidación, piensa en color ocre, pero el óxido del aluminio es blanco. Entonces la gente cuando ve un casco de mí, yo no tengo ningún problema con todo ese polvo blanco que tiene ahí en la esquina. Y la gente no se da cuenta. Gente con experiencia que lleva muchos años navegando y ven un barco de aluminio.

Hay esloras en las que los materiales son competitivos, como el *Isla Pinto*. Os habéis dado cuenta de que barcos muy pequeños, bajas de veinte metros en acero no es operativo porque son velocidades de doce, catorce nudos, que tienen un mantenimiento muy costoso. Tienen el mismo barco en fibra de vidrio, van a 30 nudos, y nos los suben cada año, cada dos años.

J.Z: Y el *Isla Pinto*, aunque a lo mejor es más caro a priori hacerlo de PRFV que acero. El mismo barco te sale supongo, rentable al medio plazo por combustible, por ahorro de mantenimiento... hay un periodo de retorno.

D.L: Por supuesto, eso es así... Muy bien, ¿Alguna cosita más?

J.Z: Nada, que muchísimas gracias.

D.L: Gracias a ti por venir. Cualquier cosa que necesites me dices.

ANEXO VIII: INFORME DE PROPIEDADES DEL PRFV DE RODMAN POLYSHIPS

En el presente documento se indican las principales propiedades mecánicas del PRFV. Los valores indicados se corresponden con los genéricos indicados por BV para sus cálculos (siendo similares para otras Sociedades de Clasificación). Estos valores son una estimación conservadora, con los reales generalmente algo superiores.

Se incluye en la siguiente tabla los valores genéricos para tejidos Mat, Roving y unidireccional, laminados con resina de poliéster:

Tipo de tejido (Laminado con resina poliéster)	Módulo elástico (MPa) A 0º y 90º (E1, E2)	Tensión de rotura (MPa) A 0º y 90º (σ_1 , σ_2)	Módulo de cortadura en el plano (MPa) (G12)	Coefficiente de Poisson v12
MAT	8937	110,82	3437	0,300
ROVING	15802	227,55	2212	0,109
UNIDIRECCIONAL	25688 (a 0º, E1)	554,86 (a 0º, E1)	2212	0,301
	5655 (a 90º, E2)	23,98 (a 90º, E2)		

Se indica en la siguiente tabla los valores de un tejido Rovimat, (en este ejemplo, compuesto por un Mat de 300 g/m² y un Roving de 790 g/m²).

Tipo de tejido (Laminado con resina poliéster)	Módulo elástico (MPa) A 0º y 90º (E1, E2)	Tensión de rotura (MPa) A 0º y 90º (σ_1 , σ_2)	Módulo de cortadura en el plano (MPa) (G12)	Coefficiente de Poisson v12
ROVIMAT (M300+T790)	12500	203	2602	0,163

Los tejidos tipo Rovimat y mat son los principales que se emplean en la construcción de nuestras embarcaciones. Los valores indicados para el Rovimat se podrían considerar una buena media para el laminado de PRFV

ANEXO IX: INFORME DE AVANZARE MATERIALS

AVANZARE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA S.L.

Informe técnico interno

Caracterización mecánica de nanocompuestos de PRFV reforzados con nanoplaquetas de grafeno (GNP). Documento técnico de laboratorio.

Propiedad	Unidad	PRFV 0%	PRFV 0,5%	Variación
Densidad	g/cm ³	1,86	1,87	+0,5 %
Resistencia interlaminar	MPa	24,8	31,5	+27 %
KIC	MPa·m ^{1/2}	1,05	1,36	+29 %
Conductividad térmica	W/m·K	0,31	0,46	+48 %
E (GPa)	GPa	12,50	11,03	
σ _u (MPa)	MPa	203	285	
Conductividad eléctrica	S/m	1×10 ⁻⁹	3,2×10 ⁻⁴	↑
Absorción agua (30 d)	%	0,84	0,68	-19 %
Resistencia fatiga (10 ⁶ ciclos)	% σ _u	47	59	+26 %

Material	E ₁ =E ₂ (MPa)	G ₁₂ (MPa)	ν ₁₂	X _t =X _c (MPa)	S ₁₂ (MPa)	ρ (kg/m ³)	V _f (%)	T _g (°C)	Abs. H ₂ O 24 h (%)
Gelcoat	3500	1300	0,38	50	90	1180	—	84	0,31
Mat base	7000	2800	0,32	203	90	1560	31	102	0,22
Mat GNP 0,5 %	6900	2800	0,32	285	95	1570	31	108	0,18
Tejido biaxial 0°/90° 600 g/m ²	20000	4500	0,13	280 / 200	25	1680	52	111	0,14

ANEXO X: IMÁGENES OBTENIDAS DURANTE LAS VISITAS TÉCNICAS

Rodman · Moldes y laminación



Imagen 1. Casco en construcción ubicada en el exterior del astillero Rodman.



Imagen 2. Molde de cubierta en el área de fabricación de materiales compuestos.



Imagen 3. Molde de casco de PRFV preparado para operaciones de laminación.



Imagen 4. Plano técnico de escantillonado y zonas de laminación de cubierta.

Rodman · Cascos y estructura



Imagen 5. Proa de una embarcación en fase de acabado, con medios auxiliares de acceso.



Imagen 6. Interior de buque de PRFV con configuración de refuerzos estructurales.



Imagen 7. Recipiente auxiliar asociado a la instalación de vacío.



Imagen 8. Bomba de vacío utilizada durante operaciones de infusión.

Rodman · Infusión y proceso productivo

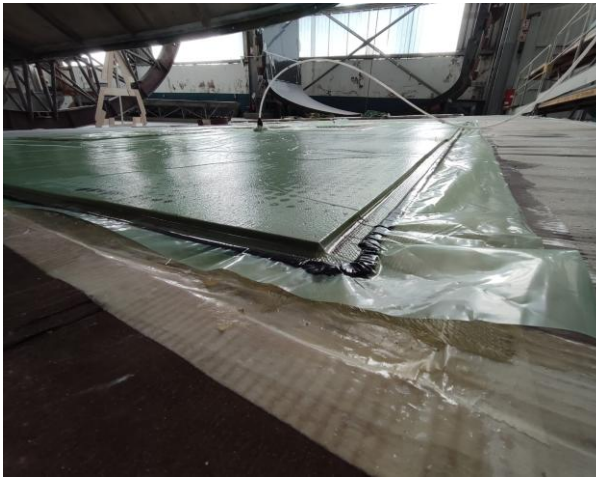


Imagen 9. Panel laminado mediante proceso de infusión al vacío.



Imagen 10. Molde de gran eslora dispuesto para la fabricación de una estructura naval.



Imagen 11. Bocina de ejes de componentes mecánicos instalados en la popa de una embarcación de PRFV.



Imagen 12. Acceso a la nave principal del astillero Rodman.

Rodman · Producción y materiales



Imagen 13. Vista general de la nave de ensamblaje y acabado de embarcaciones.



Imagen 14. Embarcación CIM UVIGO finalizada, vista de popa.



Imagen 15. Muestra de resina empleada en la preparación del material compuesto.

Armón · Construcción naval en acero



Imagen 16. Pórtico de varada y zona de transferencia de embarcaciones al agua en Astillero Armón.



Imagen 17. Buque de acero atracado en el área industrial y portuaria del astillero.



Imagen 18. Dique seco y entorno portuario equipado con grúas de gran capacidad.



Imagen 19. Taller o área de acopio y prefabricación de chapas de acero.

ANEXO XI: DECLARACIÓN SOBRE USO RESPONSABLE DE HERRAMIENTAS IA

Durante la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado se han utilizado herramientas de Inteligencia Artificial de propósito general como apoyo puntual en distintas fases del proceso de redacción y revisión del documento. Su uso se ha limitado a funciones auxiliares relacionadas con la mejora formal del texto, la consulta terminológica y la organización del contenido, sin sustituir el desarrollo técnico, los cálculos ni el análisis realizado por el autor.

En particular, estas herramientas se han empleado para:

- Revisión gramatical, ortográfica y de estilo en textos previamente redactados por el autor.
- Sugerencias de reformulación en fragmentos concretos con el fin de mejorar la claridad expositiva o el tono académico.
- Ayuda en la traducción de fragmentos entre español e inglés.
- Comprobación básica de coherencia en unidades, notación y expresiones matemáticas ya desarrolladas (P.ej: apoyándose en estas herramientas para reestructurar formalmente ecuaciones)
- Consulta de definiciones técnicas y terminología especializada.
- Revisión de la coherencia formal del documento, incluyendo la correspondencia entre figuras, tablas y referencias en el texto.
- Revisión última y general del trabajo para detección de errores de forma.
- Generación de parte de la Figura 2-14 para explicación más clara de conceptos. El resto de imágenes han sido, o bien obtenidas *in situ* por el autor, o bien elaboradas por el mismo.
- Uso de la herramienta *Turbo Scribe* para la transcripción de las entrevistas de este TFG.

El contenido final del trabajo, así como el planteamiento, los cálculos, el análisis y las conclusiones, han sido desarrollados y revisados por el autor en todo momento.