



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Javier Mestre Mora

DIRECTORES: Gerardo González-Cela Echevarría
Pedro Carrasco Pena

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio
de estabilidad trasversal y efectos de superficies libres.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado pretende abordar el diseño, construcción y validación experimental de un modelo didáctico de gabarra que tiene como objetivo aproximar los principios básicos de la teoría del buque al alumnado. La memoria comienza con el desarrollo del marco teórico en el que se sustentará el resto del trabajo. En este punto se introducen conceptos fundamentales en el estudio de la estabilidad de una embarcación como el principio de Arquímedes, los centros de carena y gravedad o el metacentro.

En base a estos elementos se ha diseñado un modelo empleando principalmente metacrilato como material constructivo. El modelo cuenta con diferentes sistemas que permiten la variación en su condición de carga, carena y estabilidad inicial. Estos sistemas se basan en un elemento de variación de su centro de gravedad, compartimentos inundables y cascos con diferentes geometrías.

Tras la materialización de la gabarra se han realizado experiencias en el laboratorio con sus diferentes configuraciones, comparando estas experiencias con los cálculos teóricos. El objetivo de este proceso es el de validar las variaciones de calado, escora y situaciones de simulación de averías. Con todo ello, se demuestra la utilidad de este tipo de herramientas en el entorno docente que facilitan la comprensión de conceptos teóricos asociados a la estabilidad de los buques.

PALABRAS CLAVE

Gabarra didáctica, Estabilidad, Teoría del buque, Metacentro, Superficies libres, Flotabilidad, Modelo experimental.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este proceso de investigación ha contado con el apoyo de personas que han prestado una ayuda imprescindible para su culminación.

Me gustaría agradecer en primer lugar a los profesores que me han acompañado y guiado durante estos 5 años, permitiéndome adquirir los conocimientos necesarios para llegar hasta este punto. Especialmente, al CF González-Cela y al CC Carrasco como tutores y al Sr. Antonio Eirís, quien, a pesar de no haber tutorizado este trabajo, ha desempeñado un papel fundamental.

Así mismo quiero agradecer a mis compañeros de la promoción 426-156. Particularmente a aquellos con los que he compartido más momentos este último año y me han apoyado durante partes del camino caracterizadas por tratarse de ámbitos en los que carecía de experiencia alguna.

Finalmente, agradezco profundamente a mi familia, especialmente a mis padres, por los valores que me han inculcado y su incondicional apoyo. Sin ellos, nada de esto hubiera sido posible.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Motivación	7
1.3 Objetivos	8
1.4 Metodología	8
1.5 Estructura	9
2 Estado del arte	10
2.1 Cuerpos flotantes.....	10
2.1.1 La Gabarra	11
2.2 Geometría de la carena.....	13
2.2.1 Centros de Gravedad.....	14
2.2.2 Centros de Carena.....	15
2.2.3 Radio Metacéntrico.....	15
2.3 Estabilidad del buque	16
2.4 Efectos de las superficies libres	17
2.4.1 Averías	18
2.4.2 Libre comunicación	19
2.5 Referencias en el mercado	20
3 Desarrollo del TFG.....	23
3.1 Diseño	23
3.1.1 Selección del material.....	23
3.1.2 Definición dimensional.....	24
3.1.3 Diseño del casco	25
3.1.4 Sistema de variación del centro de gravedad.....	25
3.1.5 Simulación de inundación y compartimentado.....	26
3.2 Construcción	26
3.2.1 Cortado láser.....	27
3.2.2 Impresión 3D	29
3.2.3 Proceso de torneado	30
3.2.4 Mediciones.....	30

3.3 Presupuesto	31
4 Resultados y discusión	33
4.1 Experiencias en el laboratorio	33
4.1.1 Flotabilidad	33
4.1.3 Averías	40
5 Conclusiones y líneas futuras	43
5.1 Conclusiones	43
5.2 Líneas futuras	43
6 Bibliografía.....	45
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	47
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	48
Anexo III: Anidado de planchas de metacrilato	49
Anexo IV: Disposición general y detalles	50
Anexo V: Presupuesto	51
Anexo VI: Obtención de gráficas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Crucero Costa Concordia hundido parcialmente.....	7
Figura 2-1 Evolución de la construcción naval.....	10
Figura 2-2 Gabarra transportando material de reciclaje en un canal.....	12
Figura 2-3 Gabarreros recogiendo arena en el río Urumea.....	13
Figura 2-4 Esquema de definiciones básicas.....	14
Figura 2-5 Ejes de referencia.....	14
Figura 2-6 Desplazamiento del centro de carena con la escora.....	15
Figura 2-7 Comparativa buque estable e inestable.....	16
Figura 2-8 Relaciones de los elementos que intervienen en la estabilidad.....	17
Figura 2-9 Efecto de las superficies libres en el c.d.g.....	18
Figura 2-10 Tanques con carena líquida reducida.....	18
Figura 2-11 Esquema de buque con una avería por el método de adición de pesos.....	19
Figura 2-12 Área de flotación con pérdida por avería.....	20
Figura 2-13 Modelo H2 de TecQuipment.....	20
Figura 2-14 Modelo FL10.2 de DIKON ENGINEERING.....	21
Figura 2-15 Modelos de la empresa ARMFIELD.....	21
Figura 2-16 Modelos de la empresa EDIBON.....	22
Figura 2-17 Modelo HM150.06 de la empresa GUNT HAMBURG.....	22
Figura 3-1 Modelos de gabarra con surcos y railes.....	24
Figura 3-2 Comparativa con medidas de modelos en el mercado.....	24
Figura 3-3 Comparativa de modelos de casco.....	25
Figura 3-4 Elementos de variación del centro de gravedad.....	26
Figura 3-5 Tornillo para orificios de costado.....	26
Figura 3-6 Maquinaria de construcción de la gabarra.....	27
Figura 3-7 Anidado de planchas.....	27
Figura 3-8 Elementos de variación del c.d.g.....	28
Figura 3-9 Proceso de pegado.....	29
Figura 3-10 Elemento de sujeción del casco.....	29
Figura 3-11 Elementos impresos en 3D.....	30
Figura 4-1 Superficies para el cálculo de volúmenes.....	34
Figura 4-2 Área de flotación con casco triangular.....	37
Figura 4-3 Curva de estabilidad transversal con casco triangular.....	38
Figura 4-4 Curva de estabilidad con desplazamiento vertical de pesos.....	38
Figura 4-5 Curva de estabilidad para superficies libres.....	39

Figura 4-6 Área de flotación con casco circular.....39

Figura 4-7 Curva de estabilidad transversal con casco circular 40

Figura 4-8 Curva de estabilidad con corrección por coseno 40

Figura 4-9 Área de flotación con avería 41

Figura 4-10 Variación del CFT 42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relación de piezas por cortado laser	28
Tabla 2 Relación de masas	31
Tabla 3 Áreas de flotabilidad	31
Tabla 4 Centros de flotación de compartimentos	41

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el capítulo actual se aborda la importancia de la estabilidad de los barcos en lo tocante a la seguridad y la operatividad naval, especialmente en el ámbito de la Armada. El conocimiento y dominio de estos conceptos es fundamental para el papel que desarrollaremos como oficiales en las unidades. Es por ello por lo que se pretende, mediante el diseño y la construcción de un modelo a escala de una gabarra, abarcar estos conceptos mediante una metodología didáctica enfocada a un proceso de aprendizaje activo. Para llevar a cabo esta metodología, tras la construcción del modelo, se realizarán experiencias prácticas en el laboratorio, seguidas de la evaluación de los resultados y el estudio de la viabilidad de su desarrollo.

1.1 Introducción

La estabilidad en los buques es una cualidad fundamental en su diseño, construcción y operación debido a que está directamente relacionado con la seguridad y la integridad del barco. La estabilidad de un barco es la capacidad de recobrar su condición de equilibrio inicial tras haber sido perturbada por fuerzas de carácter externo o interno como el viento, el oleaje o el traslado de pesos. Esta característica cobra aún más importancia en el ámbito bélico pues los barcos de guerra deben estar diseñados para mantener esta condición en situaciones de combate, deben ser capaces de resistir los impactos además deben tener en cuenta situaciones que en una embarcación civil no se tienen en consideración. Además de los criterios habituales de diseño se diseñan para soportar situaciones extremas como impactos de proyectiles, minas, misiles, etc. En estos casos el buque debe ser capaz de mantener su estabilidad tras sufrir averías que inunden compartimentos, redistribuyan pesos o favorezcan una pérdida de flotabilidad [1].

En la actualidad, especialmente en los buques de nuestra Armada, el enfrentamiento en combates navales es algo poco común y casi anecdótico. Estamos continuamente adiestrando a nuestras dotaciones para el combate, pero rara vez se llega a producir. Además, la guerra moderna ha evolucionado de tal manera que un ataque a una unidad comienza mucho antes de pulsar el botón de lanzamiento. Se explota de forma más acusada el espacio electromagnético perturbando o negando el uso de los sistemas propios, siendo suficiente en muchos casos para limitar la operatividad de la unidad enemiga y lo más importante, sin hacer uso de proyectiles [2]. Sin embargo, los accidentes en la mar son sucesos inherentes a la propia navegación y no entienden de tiempos de paz o de guerra. Ni los buques militares ni los civiles están exentos de sufrirlos y pueden llevar a la pérdida total de la embarcación en el peor de los casos o, al menos, una variación en detrimento de su capacidad operativa como puede observarse en la Figura 1-1.



Figura 1-1 Crucero Costa Concordia hundido parcialmente

(PxHere)

Algunos estudios afirman que tres de cada cuatro accidente en plataformas navales están provocados debidos al factor humano [3]. Y generalmente se asocian con una mala gestión por parte del personal encargado de su condición de estabilidad. Una mala gestión de la nueva condición de estabilidad puede suponer situaciones irreversibles, suponiendo un gran peligro para la integridad tanto de la plataforma como del personal a bordo.

En el caso de la Armada, la doctrina encargada de abordar este tema es la relacionada con la Seguridad Interior, cuyo fin último es asegurar la supervivencia del buque y garantizar su capacidad de combate. Una de sus máximas fundamentales reside en que el 90% del éxito al enfrentarse a una situación de emergencia como una avería depende de la preparación previa. Es por este motivo que el estudio de estos conceptos, así como su entendimiento y comprensión, es parte fundamental de la materia. La enseñanza tradicional de la teoría del buque puede resultar en numerosas ocasiones abstracta y difícil de interiorizar. La posibilidad del usuario de realizar prácticas de estabilidad y experimentar estos fenómenos representa una gran herramienta de aprendizaje [4].

Lógicamente, el uso de buques reales resultaría una práctica inviable, no solo por sus costes sino también por el riesgo innecesario al que se expondría. Es por ello por lo que se destaca el uso de modelos a escala y maquetas didácticas que permitan su manipulación en ambientes controlados como puede ser un laboratorio. El uso de esta herramienta permite al usuario variar parámetros clave como la posición del centro de gravedad, el centro de carena o las superficies libres de sus compartimentos y observar las consecuencias que tienen estas modificaciones en la estabilidad de la maqueta.

Cabe destacar que el desarrollo de esta herramienta de aprendizaje está alienado con algunos de los objetivos de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID), específicamente dentro del ámbito de Experimentación y Desarrollo de Conceptos (CD&E). En este apartado se trata el uso de simuladores que ayuden a facilitar la comprensión de conceptos que intervengan en el adiestramiento y la toma de decisiones. Se puede entender esta maqueta didáctica como una herramienta que permite realizar experiencias relacionadas con conceptos operativos en un entorno controlado y contribuye a un aprendizaje activo que garantiza una mayor efectividad frente al modelo tradicional pasivo [3] [5].

1.2 Motivación

La razón de haber elegido una gabarra y no otro tipo de buque es la sencillez de su forma que se ajusta perfectamente a las condiciones a las que se va a estudiar en el laboratorio. Generalmente los buques se diseñan de tal manera que además de optimizar el aprovechamiento de sus espacios se consiga la máxima estabilidad y resistencia estructural con su forma. Esto podría interferir en la observación de

su comportamiento, en lo que a nuestro estudio se refiere esto generaría más una desventaja que una ventaja, pues se busca que el usuario pueda observar de forma clara la variación que provoca las acciones que realice en el comportamiento del objeto. La gabarra, debido a su fondo plano y su geometría simple se ajusta perfectamente a los requerimientos para su estudio. Su forma y tamaño facilita la manipulación en el laboratorio pudiendo prescindir de grandes tanques para albergarla. Además, permite cambiar su configuración interna de tal manera que se pueda observar cómo afectan las superficies libres a la estabilidad del buque.

En definitiva, este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta de aprendizaje basada en los conceptos fundamentales de la teoría del buque como los centros de gravedad y de carena, el equilibrio de fuerzas, el radio metacéntrico o las superficies libres. Mediante la manipulación de estos parámetros en una maqueta a escala, se busca alcanzar un mayor nivel de entendimiento por parte del usuario en lo tocante a estos conceptos. Esta comprensión es imprescindible para el futuro oficial de la Armada, que en numerosas ocasiones desempeñará funciones relacionadas con la Seguridad Interior a bordo de los buques, siendo responsable, entre otras tareas, de garantizar la estabilidad de la plataforma en diferentes situaciones. El dominio ágil y preciso de estas variables constituye un requisito indispensable para el ejercicio eficaz de sus responsabilidades.

1.3 Objetivos

Este trabajo de fin de grado (TFG) tiene como objetivo principal el desarrollo de un modelo a escala de una gabarra para permitir su manipulación en el laboratorio y de esta manera facilitar la observación de experiencias de estabilidad por parte de los alumnos que se desarrollarán como oficiales de la Armada. Para ellos, se establecen los siguientes subobjetivos.

1. Revisión bibliográfica de estudios recientes sobre la estabilidad de los buques.
2. Diseño del modelo a través de métodos de Diseño Asistido por Ordenador (CAD).
3. Mecanización de las distintas partes mediante métodos de cortado laser e impresión 3D y ensamblaje del conjunto.
4. Realización de experiencias prácticas en el laboratorio variando sus diferentes configuraciones para comprobar los efectos que tienen en su estabilidad.
5. Estimación del coste de fabricación y comparativa con modelos similares del mercado, considerando la viabilidad de su implantación.

1.4 Metodología

El desarrollo de este trabajo consiste en la realización y seguimiento del proceso integral que abarca desde el diseño de la gabarra didáctica a la manipulación final del usuario en experiencias de laboratorio de tal manera que sea posible cambiar la configuración de sus mamparos para variar las dimensiones de sus compartimentos, así como desplazar transversal y verticalmente la situación de un disco macizo que cambiará el centro de gravedad. Además de tener orificios que conecten con el exterior para poder observar los efectos de la libre comunicación. Para cumplir los objetivos marcados, se seguirá la siguiente metodología:

1. Para la revisión bibliográfica se consultarán libros de referencia de teoría del buque, artículos e informes recientes con el fin de poder establecer un marco teórico adecuado, así como definir los principales conceptos que influyen en la estabilidad de los cuerpos flotantes.
2. El diseño del modelo se hará mediante el uso del software de modelado 3D “Autodesk Inventor” para definir la geometría de la gabarra a través del desarrollo de un modelo digital tridimensional. Además, se utilizará esta misma herramienta para la obtención de los planos del conjunto.
3. En la mecanización de las diferentes partes: se llevará a cabo su fabricación. Previamente se habrán trasladado a un formato bidimensional con la aplicación “RDWorksV8” para permitir el cortado laser de las partes en planchas de metacrilato. Para el cortado laser de las planchas se utilizará el modelo de maquina laser “LP 1060” de la empresa “CNCMaquinariaLaser”. Para las

partes de la gabarra que por su índole no puedan ser desarrolladas a través del método de cortado laser se utilizará una impresora láser.

4. Para la realización de experiencias prácticas en el laboratorio se realizarán diferentes experiencias prácticas para comprobar la validez de los cálculos realizados, variando algunos de sus parámetros como la compartimentación, la situación de sus centros de carena o gravedad y la posibilidad de presentar superficies libres entre otros.
5. Se llevará a cabo una estimación del coste de fabricación de la gabarra teniendo en cuenta los materiales y las herramientas que se han empleado para su realización. Además, se comparará con modelos similares que se encuentran actualmente en el mercado para evaluar si es viable su implantación en la docencia desde el punto de vista económico.

1.5 Estructura

Tras haber contextualizado el trabajo y haber presentado los objetivos que han motivado su realización, se introduce el marco teórico en el que se sustentan los fundamentos de la estabilidad de los cuerpos flotantes. En este apartado se abordan conceptos tales como el principio de flotación, el centro de carena, el centro de gravedad o el metacentro, que representan la base en la que se fundamenta el posterior análisis de la gabarra.

A continuación, se describe el proceso de diseño y construcción de la gabarra. En este apartado se desarrollan conceptos como la obtención del diseño, los materiales empleados y las distintas fases en el proceso de materialización del modelo.

Posteriormente, son presentados los resultados obtenidos a partir de las experiencias realizadas en el laboratorio junto con las demostraciones teóricas que las validan. Para ello, se han llevado a cabo experiencias con diferentes configuraciones de la gabarra de tal modo que fuera posible comprobar cómo afectan las modificaciones a la estabilidad del conjunto.

Por último, se presentan las conclusiones obtenidas del proceso de materialización del modelo, seguido de un apartado enfocado en exponer las líneas de desarrollo que se abren con este trabajo. Todo ello se completa con un conjunto de anexos en los que se presenta información relevante para el desarrollo del estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

En el ámbito de la construcción naval, la arquitectura y el diseño de los buques, ambos englobados en la teoría del buque, representan un pilar fundamental en el conocimiento del comportamiento de las plataformas flotantes tanto en condiciones normales como tras sufrir averías. Para desplazar y acercar estos conceptos a un entorno de aprendizaje existen diversas maquetas simplificadas desarrolladas por empresas especializadas.

2.1 Cuerpos flotantes

La historia del ser humano siempre ha estado estrechamente relacionada con la navegación y, por lo tanto, con los barcos. Estos cuerpos flotantes han permitido el transporte de personas y mercancías entre civilizaciones, la expansión de imperios o la culturización de pueblos desconocidos hasta entonces por el mundo, en definitiva, ha permitido crear enlaces globales. La historia del ser humano no puede entenderse sin la historia de la navegación.

Del mismo modo que la historia del ser humano ha evolucionado, también lo ha hecho la de la navegación. La forma, tamaño y uso de las plataformas flotantes ha variado enormemente en los miles de años de los que se tienen registro de su uso. Han ido evolucionando y adaptándose a las nuevas necesidades y conocimientos que se adquirían como se observa en la Figura 2-1. Teniendo siempre presente que en un planeta cuya superficie de agua representa el 70% de la superficie total, la civilización con mayores avances en este campo ha presentado una clara hegemonía frente al resto.



Figura 2-1 Evolución de la construcción naval

Todo comienza con modelos muy simples en la prehistoria, los cuales se limitaban a simples canoas talladas en troncos para hacer navegaciones reducidas principalmente en aguas fluviales. Posteriormente, se comienzan a utilizar fibras de caña y pieles de animales. Pero estos objetos flotantes estaban muy limitados en cuanto a maniobrabilidad y cargas que podían soportar. La necesidad de subsanar estas limitaciones hizo que se fueran añadiendo nuevas mejoras, técnicas de construcción y materiales.

Es razonable pensar que una de las primeras variaciones en el diseño sería incorporar un método de propulsión como lo fue el uso de los remos. Estos contaban con una doble función. Por una parte, permitían propulsar las embarcaciones y por la otra permitir controlar su rumbo. Si seguimos avanzando nos encontramos con la necesidad de aumentar la permanencia navegando, para lo cual se aumenta el número de remos, y a su vez de remeros, lo que provoca un aumento en el tamaño de las embarcaciones. Esto también provoca que se la construcción de las plataformas cobre una mayor importancia, ya que estas estructuras deben soportar mayores esfuerzos tanto internos (por las cargas vivas e inertes) como externos, debido a que las navegaciones cada vez son más extensas tanto en tiempo como en distancia. Además de todo ellos no podemos pasar por alto el uso de los barcos en las campañas bélicas, pues a estos esfuerzos a los que tenían que hacer frente se les añadió los propios de estas situaciones.

Mientras que en algunas zonas apostaron durante bastante tiempo por la propulsión exclusivamente a remo, en otras se optó por aprovechar la sustentación del viento como principal medio para propulsar las naves, incluso llegando a usar estos dos métodos de forma conjunta dependiendo de las condiciones que se dieran. Un ejemplo de estos métodos de construcción y propulsión se puede ver con las galeras, que dominaron la navegación en el Mediterráneo durante un largo periodo. El uso de uno y otro sistema de propulsión tenía repercusión en la forma de los buques. Mientras que la propulsión a remo estaba relacionada con fondos más planos y de menos calado, la propulsión a vela requiere de una forma más pronunciada en su quilla para poder garantizar su gobierno. Esto hacía que en el caso de las embarcaciones específicamente de vela no era necesario disponer de un espacio específico para albergar a remos y remeros, y permitió aumentar el espacio para las cargas. Liberándose de este modo las navegaciones intercontinentales.

Con la Primera Revolución Industrial se introdujo un nuevo método de propulsión, la máquina de vapor, que transmitía el movimiento a una hélice o rueda, la cual ejercía una fuerza sobre el fluido y la reacción a este generaba el desplazamiento de las embarcaciones. Esto facilitó una nueva evolución en las capacidades de los barcos. Se empezaron a probar nuevos materiales de construcción con el hormigón (que no tuvo mucha permanencia para buques, pero sí para plataformas flotantes estáticas) y el metal. En un principio se forraban los cascos de los buques de guerra para dotarlos de más resistencia a los impactos de los proyectiles, pero luego se pasó a construir las plataformas íntegramente de metal, como se hace en la actualidad. Con nuevos métodos de propulsión con otros combustibles fósiles como el petróleo o la electricidad.

El paso de hacer las estructuras de los barcos de madera a hacerlas de metal ha permitido introducir formas y tamaños específicos para su función. Provocando un mayor estudio y desarrollo en la construcción de los barcos [6].

En la actualidad, las embarcaciones tienen una gran cantidad de usos tales como el comercio, transporte de personas o mercancías, la seguridad o el recreo entre otros muchos. Para cada una de esas funciones se han resuelto mejores prestaciones dependiendo de su forma, tamaño o tipo de propulsión.

2.1.1 La Gabarra

Debido a la numerosa tipología de embarcaciones que se pueden encontrar en la actualidad, se han desarrollado diferentes modos de clasificación en función de ciertas características como su sistema de propulsión, que puede ser mecánica, de vela, por chorro de agua, hidrofoil o por colchón de aire. Por su función pueden ser buques de guerra, buques mercantes, buques de pesca, barcos de recreo y tren naval [7].

Esta última clasificación se divide en varios elementos destinado al trabajo de apoyo en puertos como los remolcadores, petroleras, dragas o gabarras, como la que se puede observar en la Figura 2-2 transportando material de reciclaje, entre otros. Según la Real Academia Española, la palabra gabarra, que es el objeto de estudio de este trabajo, significa embarcación mayor que la lancha, con árbol y mastelero, y generalmente con cubierta. Suele ir remolcada, y cuando no, se maneja con vela y remo, y se usa en las costas para transporte. Sin embargo, entre sus definiciones en diversas fuentes hay algunas variaciones. El Diccionario Marítimo Español [8] la define como especie de barca grande que sirve para cargar y descargar, y lastrar y deslastrar los buques en lo interior de los puertos; algunas hacen cabotaje. Algunos puntos comunes que podemos encontrar entre estas y otras definiciones es que son embarcaciones auxiliares generalmente utilizados en puerto, que carecen de propulsión autónoma y cuentan con tamaños y pesos adecuados para su manipulación, así como formas mayoritariamente cuadriculadas, fondo plano y pueden o no contar con una cubierta o elementos para facilitar el transporte de sus cargas.



Figura 2-2 Gabarra transportando material de reciclaje en un canal

(Wikimedia Commons)

El comienzo de la historia de esta embarcación en España se puede localizar en el norte de la península. Tuvieron una gran importancia durante el siglo XIX para el transporte de mercancías desde tierra a los buques y viceversa. En la Figura 2-3 se puede ver cómo los gabarreros donostiarras trabajan en el río Urumea. Las primeras gabarras se construían en madera y no fue hasta finales de este siglo que se remplazó este material por el acero, ya que las dotaba de mayor resistencia y durabilidad. No obstante, con la llegada de la Primera Guerra Mundial, la industria metalúrgica centró sus esfuerzos en esta empresa y se adoptó la alternativa de botar gabarras de hormigón armado. Estas embarcaciones no presentaban ninguna ventaja frente a sus predecesoras hechas en acero ya que aumentaba su peso y eran más frágiles pero la falta de alternativas provocó que su construcción mantuviera en el tiempo. Con el paso del tiempo y el avance en la construcción de los puertos, que permitían a los barcos embarcar y desembarcar su mercancía sin hacer uso de medios auxiliares, la utilización de las gabarras ha ido tomando menor importancia [9].



Figura 2-3 Gabarreros recogiendo arena en el río Urumea

(Wikimedia Commons)

2.2 Geometría de la carena

Antes de comenzar con la materia de estabilidad, puesto que se va a tratar en el presente trabajo del diseño y construcción de una embarcación, se hace necesario resaltar previamente algunos conceptos básicos. Estos conceptos básicos son en su mayoría definiciones básicas e imprescindibles para el entendimiento del texto.

- Eslora: distancia longitudinal del buque. Dependiendo de donde se tome este valor se puede hablar de longitud entre perpendiculares, total o máxima, en la flotación y entre marcas de calado.
- Manga: distancia transversal del buque. Igual que en el caso anterior varia en cuanto a la referencia usada. Puede ser de carena, en la flotación, de la máxima flotación, de trazado y máxima.
- Puntal: distancia vertical que va desde la quilla a la cubierta principal.
- Calado: distancia vertical entre la quilla y la línea de flotación.
- Perpendicular de proa/popa: línea perpendicular al plano longitudinal en el punto donde el plano de flotación, en condiciones de máxima carga, coincide con la roda/el eje de rotación del timón.
- Perpendicular media: línea perpendicular al plano longitudinal que se sitúa justo en el centro entre las perpendiculares de proa y de popa.
- Cuaderna maestra: es la sección perpendicular al plano longitudinal que tiene mayor área. Suele coincidir con la sección media (∇).
- Línea base: línea paralela al plano de flotación en la quilla de la sección maestra.
- Línea central del buque (ζ): línea perpendicular al plano de flotación que surge de la intersección del plano longitudinal con cualquier plano paralelo al primero [10].

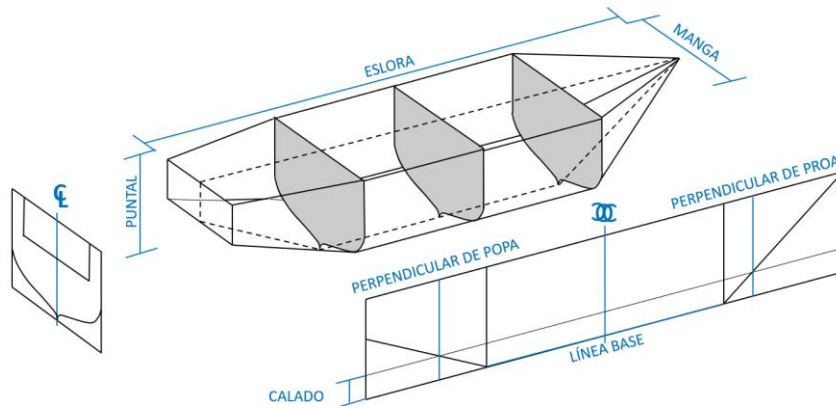


Figura 2-4 Esquema de definiciones básicas

2.2.1 Centros de Gravedad

Una vez definidos estos conceptos previos se puede comenzar a tratar el tema de la flotabilidad y estabilidad de los cuerpos que reposan en un fluido. Para ello, primero debemos hablar de las características inherentes a la plataforma, las cuales no se ven alteradas por el fluido en el que se encuentra.

El centro de gravedad (c.d.g.) hace referencia a un punto ficticio en el cual está concentrada toda la masa del buque y se representa por la letra G , la distancia de este punto a la quilla es KG . En el caso de figuras geométricas y de densidades uniforme su centro de gravedad coincide con su centro geométrico. Debido a las formas particulares que tienen los buques esto raramente se cumple. Para estos casos, su localización se puede hallar haciendo uso de las fórmulas más adelante [7]:

$$\sum w_i \times x_i = W \times LG \quad (1)$$

$$\sum w_i \times z_i = W \times KG \quad (2)$$

$$\sum w_i \times y_i = W \times VG \quad (3)$$

Donde W es el desplazamiento de la embarcación. LG , KG y VG son las distancias del centro de gravedad respecto de la cuaderna maestra, la quilla y la línea central del buque respectivamente. Cuando la embarcación está adrizada el c.d.g. se encuentra en el plano de crujía por lo que el valor de VG es nulo. Los ejes a los que se hace referencia se representan más adelante y se van a respetar durante el desarrollo del trabajo.

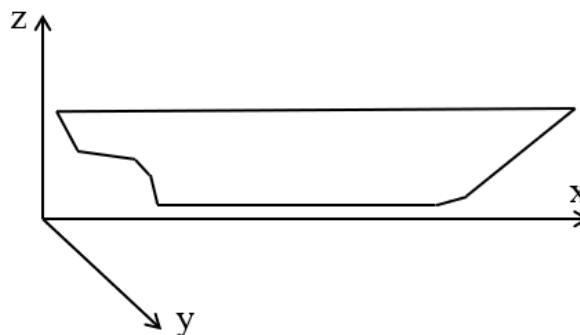


Figura 2-5 Ejes de referencia

Generalmente, en la construcción naval estos valores se calculan analíticamente cuando la plataforma aún está en el astillero para, posteriormente, volverlo a calcular experimentalmente.

2.2.2 Centros de Carena

En este apartado tendremos en cuenta el cuerpo cuando se encuentra situado en el seno de un fluido. Según el principio de Arquímedes un volumen sumergido total o parcialmente sufre una fuerza de empuje (4) que es equivalente al peso del fluido desplazado, esta fuerza de empuje se conoce como flotabilidad.

$$F_B = g \times \gamma \times \nabla \quad (4)$$

Siendo g la gravedad terrestre, γ la densidad del fluido y ∇ el volumen de fluido desplazado, el decir, el volumen sumergido del cuerpo flotante.

Si además aplicamos la segunda Ley de Newton (5) y la igualamos a la fórmula del principio de Arquímedes, ya que estas dos fuerzas están en equilibrio, tenemos que el peso de la embarcación será igual al volumen sumergido de la misma multiplicado por la densidad del fluido(6).

$$F_G = g \times m \quad (5)$$

$$g \times m = g \times \gamma \times \nabla \quad (6)$$

La fuerza de empuje del fluido se aplica en un punto que está situado en la línea vertical que pasa por el centro geométrico del volumen sumergido, al cual se le conoce como carena. Por ello el centro de carena recibe este nombre. Para cada flotación de la embarcación su centro de carena se encuentra en un lugar diferente y se debe calcular. Con el buque adrizado este punto se encuentra en la misma vertical que el c.d.g. Sin embargo, al escorar se desplaza a la banda de escora dando lugar a la aparición del “Par de Adrizamiento”, término que se estudiará con posterioridad. [10] Este punto se denota con la letra B, pero al estar referenciado a la quilla es más común encontrarlo como KB.

2.2.3 Radio Metacéntrico

Cuando el buque sufre una escora determinada la fuerza de empuje del fluido se sigue aplicando en un vector perpendicular a la superficie del fluido, este se desplaza hacia la banda de escora (Figura 2-6), por lo que ya no se encuentra en el plano de crujía. A la intersección entre la fuerza de empuje de los centros de carena inicial y final se le denomina “Metacentro” (M). Este metacentro existe tanto en el plano longitudinal como en el transversal y no tienen por qué coincidir. De hecho, debido a las formas más alargadas que anchas de los buques el metacentro longitudinal está más alejado de la quilla que el transversal.

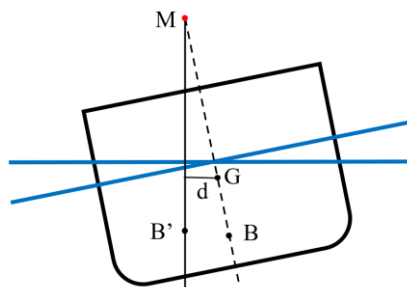


Figura 2-6 Desplazamiento del centro de carena con la escora

La distancia de este punto al centro de carena se conoce como “Radio Metacéntrico” y se suele encontrar como BM. Para pequeñas escoras, inferiores a 10° , el metacentro se puede aproximar a un punto, para ángulos mayores el metacentro describe una trayectoria llamada “evoluta metacéntrica”. Para hallar su valor es necesario conocer el momento de inercia del área de flotación respecto su centro

longitudinal o transversal (dependiendo si se desea conocer el valor del radio metacéntrico transversal (7) o longitudinal (8)) y el volumen sumergido.

$$BM_T = \frac{I_L}{\nabla} \quad (7)$$

$$BM_L = \frac{I_T}{\nabla} \quad (8)$$

2.3 Estabilidad del buque

Una vez definidos los conceptos básicos que sentarán las bases para poder comprender qué caracteriza la estabilidad de un buque, que no es más que la oposición de un buque a ser alterado de su condición inicial por causas externas como la mar o el viento. De tal manera, consideramos que un buque es “Estable” cuando al cesar la fuerza externa recupera su posición inicial e “Inestable” cuando no recupera su posición inicial (Figura 2-7).

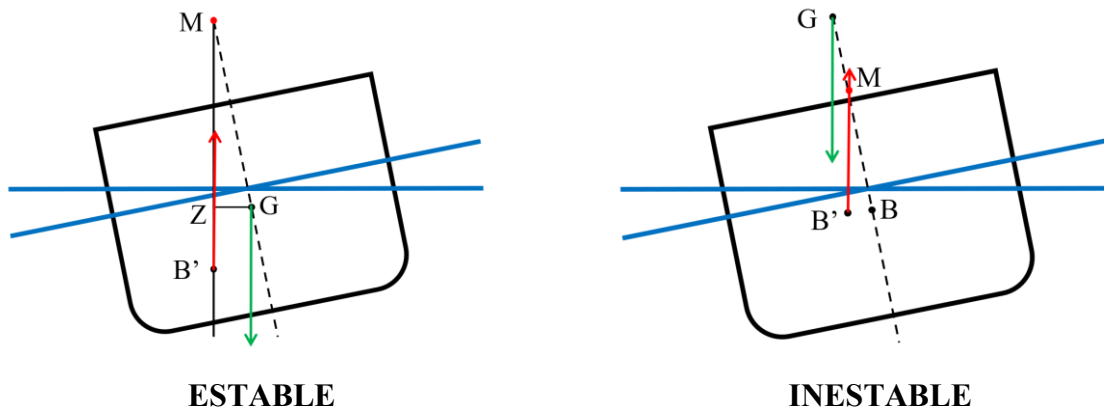


Figura 2-7 Comparativa buque estable e inestable

Cuando el buque escora a una de sus bandas se ha visto que la localización de su centro de carena varía debido a que la forma de la obra viva cambia. Esto provoca que las fuerzas de gravedad y de empuje, que antes estaban alineadas en la vertical, se separen. Al encontrarse dos fuerzas de igual magnitud y sentidos opuestos siendo aplicadas a una distancia (d) la una de la otra se produce un momento. Si este momento facilita que el buque recupere su estado inicial estamos ante un momento adrizante (9) y el par es de adrizamiento, se trata de un buque estable. Sin embargo, si al escorar el barco el momento hace que la escora del barco siga aumentando hasta que de la vuelta el momento y el par son escorantes, el buque es inestable. Al ser las dos fuerzas de igual magnitud, el valor de estos momentos viene dado por el producto de una de estas fuerzas por la distancia a la que están separadas [10].

$$M_{ADR} = G \times d \quad (9)$$

De tal manera, se puede asegurar que, para ángulos de escora dentro de la condición de estabilidad inicial, es decir, menores de 10° , el metacentro se aproxima a un punto en la línea de crujía. La distancia entre este punto y el c.d.g. del buque se denomina “Altura Metacéntrica” y se denota como GM. Cuando el GM es positivo el metacentro está por encima del c.d.g. y el buque es estable, mientras que cuando el GM es negativo es el c.d.g. el que se encuentra por encima del metacentro y el buque es inestable. Además, si el GM es positivo y su valor es alto el momento adrizante será mayor y el buque tenderá a la recuperar su posición inicial rápidamente mientras que si el GM es bajo el buque describirá balanceos más lentos. Para hallar el valor de la altura metacéntrica se deben conocer las posiciones del c.d.g., el

centro de carena y el radio metacéntrico (Figura 2-8). Una vez conocidos, su valor se puede calcular directamente (10).

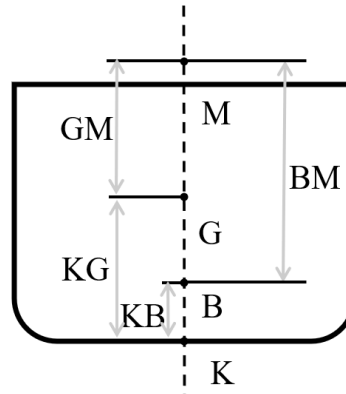


Figura 2-8 Relaciones de los elementos que intervienen en la estabilidad

$$GM = KB + BM - KG \quad (10)$$

Generalmente, tras botar un buque se realiza una experiencia de estabilidad para calcular la altura metacéntrica utilizando un peso (w) que suele estar entorno al 0,5% del peso total y se desplaza alejándolo de la crujía. Este peso genera un momento de escora (12) que al igualarse al momento de adrizamiento (11) nos permite conocer el valor exacto de GM (13) [10].

$$M_{ADR} = W \times GG' = W \times GM \times \sin\theta \quad (11)$$

$$M_{ESC} = w \times d \times \cos\theta \quad (12)$$

$$GM = \frac{w \times d}{W \times \tan\theta} \quad (13)$$

Donde w es el peso que se añade, W el peso total, G' la proyección de G sobre la recta del radio metacéntrico y θ la escora que produce el desplazamiento del peso.

2.4 Efectos de las superficies libres

En la actualidad tanto los buques que están destinados al transporte de mercancías líquidas como los que no, cuentan con tanques ocupados por fluidos como combustible, agua potable, aceites, aguas residuales, etc. Cuando estos fluidos no ocupan por completo el espacio de los tanques para su almacenamiento se generan superficies libres con el movimiento de la embarcación. La superficie del fluido siempre tiende a guardar la horizontal, independientemente de la situación del barco. Esto supone que ante una escora determinada habrá mayor cantidad de fluido en la zona más alejada de la crujía, lo que provocará un desplazamiento del c.d.g. del fluido y, a su vez, una disminución del momento de adrizamiento. Esto genera una reducción en la estabilidad.

Lo que provoca en la estabilidad del buque es un aumento en de su c.d.g. Como se puede observar en la Figura 2-9 el c.d.g. del buque se desplaza con la cuña del fluido. Este desplazamiento no se produce en la línea de crujía, pero debido a nuestro objeto de estudio es brazo de adrizamiento y este es el mismo en el nuevo c.d.g. que en su prolongación sobre la crujía nos valdremos de este. De este modo podemos calcular la variación del c.d.g. con la siguiente ecuación (14) la cual tiene en cuenta el volumen de carena del buque, el momento de inercia del fluido, su densidad y la densidad del agua en la que está el buque.

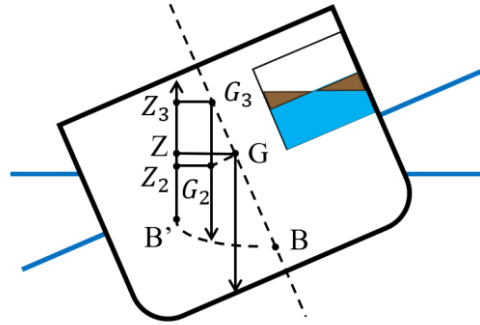


Figura 2-9 Efecto de las superficies libres en el c.d.g.

$$GG_3 = \frac{i \times \gamma'}{\nabla \times \gamma} \quad (14)$$

El efecto que tiene este fluido es que a pesar de que el centro de gravedad se mantenga en su posición, el buque se comporta como si estuviera en la posición que se ha calculado, que al ser más alto reduce el momento de adrizamiento y la altura metacéntrica.

Una manera de reducir este efecto es mediante el uso de mamparos longitudinales que compartimenten el tanque ya que de este modo se consigue reducir el momento de inercia de la superficie libre (15)(16).

$$i = \frac{b^3 \times l}{12} \quad (15)$$

$$i' = \frac{\left(\frac{b}{2}\right)^3 \times l}{12} + \frac{\left(\frac{b}{2}\right)^3 \times l}{12} = \frac{b^3 \times l}{4 \times 12} \quad (16)$$

Por lo tanto, se ha observado cómo un tanque parcialmente lleno puede comprometer la estabilidad de un buque. Para contrarrestar este suceso, ya que a menudo es imposible evitar esta situación como en tanques de combustible que se suelen llenar hasta el 95% de su capacidad, se pueden aplicar técnicas como la compartimentación o mantener una altura de carena líquida pequeña (Figura 2-10). Cuando esto ocurre al aumentar la escora se reduce la superficie libre del fluido al encontrarse con el techo o el suelo del tanque, de tal manera que, aunque la escora aumente el momento de inercia se reduce [10].

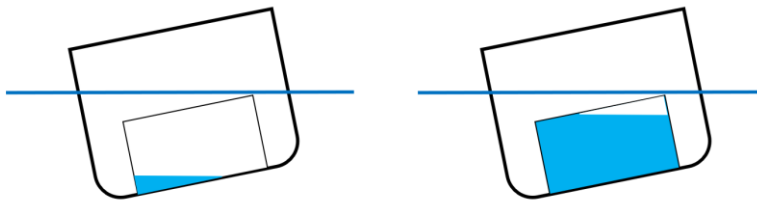


Figura 2-10 Tanques con carena líquida reducida

2.4.1 Averías

Además de las condiciones de estabilidad generales, los buques, y especialmente los buques de guerra, deben diseñarse teniendo en cuenta que pueden sufrir averías que acarreen vías de aguas de origen externo o interno. En este apartado nos centraremos en el segundo tipo. Ante una vía de agua de origen interno se puede, el compartimento cuando sea estanco se comportará como un tanque. Si su inundación es total se trataría como un traslado de pesos pues el fluido que lo ha inundado proviene de

algún circuito del propio buque. Mientras que si la inundación no es completa se estudiaría como una superficie libre y en base a cómo de comprometida se vea la estabilidad del buque se debería valorar la opción de inundarlo por completo.

2.4.2 Libre comunicación

Al hablar de comunicación aparecen dos escenarios posibles. Ya se ha visto la importancia de controlar las superficies libres de los fluidos que transportamos a bordo de los buques, se ha hablado de la opción de emplear mamparos estancos para reducir el momento de inercia, no obstante, existe también la posibilidad de separar físicamente un tanque y situarlo a ambas bandas permitiendo que el fluido de su interior circule de una parte a la otra a través de vasos comunicantes. En este caso, para determinar su momento de inercia se tomaría como una superficie libre que abarca la distancia comprendida entre los mamparos exteriores de los tanques, a la que se le resta la distancia entre sus mamparos interiores (17).

$$I = \frac{(B^3 - b^3) \times l}{12} \quad (17)$$

Como se observa en la fórmula, al realizar esta acción de separar los tanques y comunicarlos aumenta su momento de inercia notablemente con respecto al de los mismos tanques si no estuvieran comunicados, por lo tanto, hay que tener especial cuidado con cómo afecta al c.d.g. virtual del buque.

Por otro lado, tenemos el efecto de la libre comunicación con el exterior. Esto ocurre cuando el buque sufre una avería y aparece una vía de agua de origen exterior. Cuando esto ocurre el problema se puede afrontar desde dos perspectivas diferentes, una que considera el agua que ha inundado el compartimento como un aumento en el desplazamiento del buque y otra es que al inundarse el compartimento con el mismo fluido sobre el que flota supone que la zona que se ha inundado ha dejado de aportar a la flotabilidad total. Al primer método se le conoce como “adición de pesos” y al segundo “pérdida de flotabilidad”. Sin embargo, ambos concluyen en el mismo resultado [10].

Para el estudio de la estabilidad mediante el método de “adición de pesos” (Figura 2-11) se hará teniendo en cuenta el aumento del desplazamiento, que produce un mayor calado. El centro de gravedad se alterará por el nuevo peso añadido, que también generará un cambio de asiento y una escora. En definitiva, un aumento de peso genera una variación del c.d.g., un mayor calado, con la variación del centro de carena, una variación del metacentro y por lo tanto su estabilidad [11].

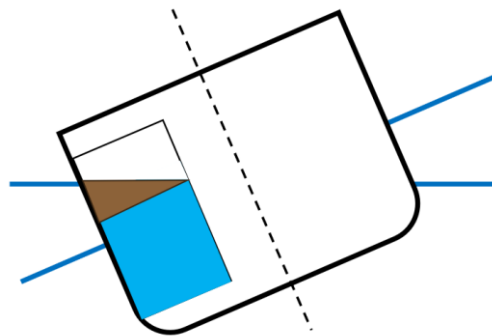


Figura 2-11 Esquema de buque con una avería por el método de adición de pesos

En cuanto al estudio de este suceso por medio del método de la “pérdida de flotabilidad” (Figura 2-12) el desplazamiento se mantiene igual, así como su c.d.g. En este caso es la forma de la superficie de flotación la que varía, esto provoca una reducción de la sustentación que conlleva a un aumento del calado y una nueva posición del centro de carena. Al variar la forma de la superficie de flotación su centro de gravedad varía, igual que los metacentros transversales y longitudinales. Todo ello provoca un cambio en su asiento, su escora y su estabilidad [11].

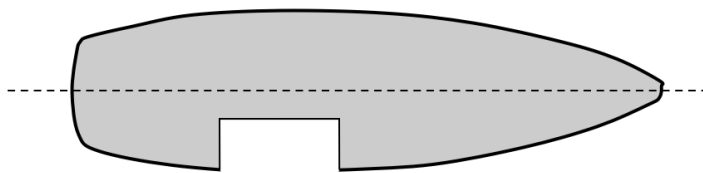


Figura 2-12 Área de flotación con pérdida por avería

2.5 Referencias en el mercado

Como se ha observado anteriormente, conocer la materia de la estabilidad de los cuerpos flotantes es un asunto de vital importancia y el uso de modelos a escala en el laboratorio facilita la comprensión y entendimiento de estos conceptos, que abordados únicamente desde un marco teórico pueden resultar abstractos. Por ello, algunas empresas en el mercado han desarrollado equipos didácticos que simulan embarcaciones.

Encontramos el modelo H2, de la empresa TecQuipment como se observa en la Figura 2-13, destinado a estudiar la estabilidad metacéntrica de un pontón flotante a través de la medición de la altura metacéntrica. Este modelo cuenta con un casco en forma rectangular al que se le acopla un plano transversal con una masa cilíndrica que permite ajustar su posición para variar el centro de gravedad. Las dimensiones del producto son 363×240×382 mm de largo, ancho y alto respectivamente [12].



Figura 2-13 Modelo H2 de TecQuipment

[12]

Otra empresa dedicada a estos trabajos es DIKOIN ENGINEERING. En este caso presentan una alternativa con su modelo FL 10.2, representado en la Figura 2-14, que reemplaza el plano transversal del caso anterior por un perfil metálico vertical acompañado de otro perfil horizontal. Ambos cuentan con dos cilindros compuestos por láminas de pesos que permiten, además de reducir o aumentar la masa con el número de láminas, variar desplazamiento tanto vertical como transversalmente. La forma de su casco es idéntica al caso anterior y sus dimensiones son 350 mm de alto, 200 mm de largo y 100 mm de ancho. En este equipo es posible sustituir la forma rectangular del casco por una formada por media circunferencia o un triángulo invertido [13]. El valor de este producto a través de su comercial de ventas en España es de 1.113,20 €



Figura 2-14 Modelo FL10.2 de DIKON ENGINEERING

[13]

En el caso de la compañía ARMFIELD, aparecen dos alternativas que están plasmadas en la Figura 2-15. Por un lado, contamos con el modelo F1-14 MK II. Este modelo es similar a los anteriores. Cuenta con un casco rectangular, pero permite ser sustituido por uno de forma circular o triangular. En este caso permite desplazar vertical y longitudinalmente los pesos gracias a dos guías que tiene situadas en su interior, pero no da la opción de variar la cantidad de peso que se desplaza. Sus dimensiones son 350×200×475mm. Por otro lado, también está disponible el modelo NA8. Un diseño más realista de barco enfocado al estudio de estabilidad a grandes ángulos para determinar el momento restaurador y ver las consecuencias de la inundación de compartimentos. Las dimensiones de este modelo son notoriamente mayores que las del caso anterior con 2,66 metros de largo, 1,97 de ancho y 2,17 de alto, aunque cabe destacar que estas medidas son con el tanque que viene incluido en el producto [14]. En el caso del modelo F1-14 MKII el precio de mercado es de 2.384,91€ en España mientras que en su modelo NA8, la cantidad asciende hasta los 66.069,63€.



NA8



F1-14 MKII

Figura 2-15 Modelos de la empresa ARMFIELD

[14]

Continuando con la marca EDIBON volvemos a encontrarnos con dos modelos visibles en la Figura 2-16, uno centrado en la estabilidad transversal y la demostración práctica de la altura metacéntrica y otro más profesional que permite analizar estabilidad, vibraciones, hidrostática y empuje del cuerpo. El primer modelo se trata del FME11 y su manipulación es muy similar al resto de productos con masas que permiten su desplazamiento vertical y transversalmente, con cascos intercambiables y dimensiones de 353 mm de largo, 204 mm de ancho y 475 mm de alto. En el caso del modelo USSB permite, del mismo modo que el NA8 de ARMFIELD permite un análisis más exhaustivo de la estabilidad del buque. Cuenta con cuatro variaciones del casco reflejan diferentes tipos de barcos con funciones variadas, así como la posibilidad de añadirle un tanque que permita observar las funciones de las superficies libres. En este caso las dimensiones son 1200×200×150 mm [15]. En el caso del modelo más avanzado tiene un precio de salida de 4.500,00€ en su modalidad más básica, precio que ascendería a 8.000,00€ en su

versión USSB V o a 13.000,00€ en el caso del USSB/TAN. Mientras que el modelo FME11 tiene un valor de 540,00€.



USSB



FME11

Figura 2-16 Modelos de la empresa EDIBON

[15]

Por último, la empresa GUNT HAMBURG propone un diseño que continua con los modelos básicos que ya se han mencionado como se observa en la Figura 2-17. Se trata de HM150.06 y cuenta con un prisma rectangular con una longitud de 300 mm y una anchura de 200 mm que tiene hueco su interior para poder albergar dos raíles (vertical y transversal) los cuales permites desplazar dos masas cilíndricas, dándole al conjunto una altura total de 430 mm [16]. El precio de este artículo en España asciende a los 1.694,00€.



Figura 2-17 Modelo HM150.06 de la empresa GUNT HAMBURG

[16]

Una vez expuesto el marco teórico sobre el que se apoyará el trabajo, la justificación del modelo o tipo de barco seleccionado y la comparativa entre las diferentes maquetas didácticas que se pueden encontrar en el mercado se hace posible abordar el proceso que constituido por el diseño y la construcción de la gabarra.

3 DESARROLLO DEL TFG

El modelo didáctico de la gabarra se ha centrado en garantizar el cumplimiento de los criterios de funcionalidad estructural y sencillez constructiva, frente al realismo de forma para cumplir su fin último, la utilidad docente. Se ha optado por utilizar una configuración de doble plancha de metacrilato de 3 mm de grosor para dotar de rigidez y estanqueidad al conjunto mediante procesos de construcción accesibles desde las instalaciones del Centro Universitario de la Defensa (CUD). La adopción de una geometría prismática y simétrica responde a la necesidad de simplificar el estudio hidrostático y el análisis de la estabilidad. Además, la incorporación de un sistema modular que permite variar el centro de gravedad y un mecanismo para simular averías en sus compartimentos facilita la comprobación experimental de la variación del KG, el metacentro y el efecto de las superficies libres. De tal manera que el dispositivo satisfaga sus requerimientos de acercar al alumno los principios de la teoría del buque.

3.1 Diseño

El diseño de la gabarra se ha realizado aplicando criterios de funcionalidad didáctica, robustez estructural y viabilidad constructiva frente al realismo geométrico de la embarcación, permitiendo la repetibilidad experimental.

3.1.1 Selección del material

Para realizar el diseño constructivo de la gabarra se han explorado diferentes modelos del mercado en la actualidad y se ha optado por un diseño de metacrilato, además de por la sencillez de su mecanizado, por las características que dotan al modelo de un acabado transparente y una estabilidad química adecuada. Para la unión de estas piezas se ha utilizado un pegamento instantáneo.

Inicialmente se valoró la opción de utilizar planchas de 6 mm y realizar surcos y marcos biselados de tal manera que dotara al conjunto un ensamblaje tipo machihembrado. Esta solución presentaba ventajas técnicas claras, entre ellas un incremento de la rigidez estructural global, una mejora en la alineación geométrica durante el montaje y una reducción de las concentraciones de tensiones en las líneas de unión. Sin embargo, debido a la falta de maquinaria CNC de fresado para mecanizar estas operaciones sin comprometer la calidad dimensional y la estanqueidad se acabó desechando.

Como alternativa se valoró la opción de utilizar planchas de 3 mm y para reforzar su unión utilizar marcos perimetrales del mismo material. Utilizar esta técnica supondría un elevado número de uniones que podría incrementar la probabilidad de fallo en las juntas, las concentraciones locales de tensiones y el deterioro progresivo debido a la manipulación continua propia de un equipo docente.

Finalmente se optó por usar una solución con doble capa de planchas de metacrilato de 3mm de tal modo que al unir las su resultado sería equivalente a utilizar planchas de 6 mm con surcos de 3 mm en

las zonas críticas, como se puede observar en la Figura 3-1, donde se comparan las opciones de raíles y surcos. Esta solución supone una mejora en la rigidez a flexión del conjunto, la reducción del número de uniones críticas facilita el control dimensional con medios convencionales y mantiene unas tolerancias compatibles con los requerimientos de estanqueidad y precisión exigidos por el modelo experimental.

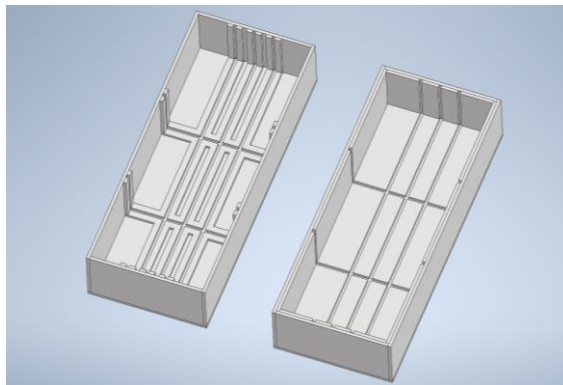


Figura 3-1 Modelos de gabarra con surcos y raíles

La unión se realiza mediante adhesivo siliconado estructural compatible con PMMA, garantizando estanqueidad y absorción de pequeñas deformaciones.

3.1.2 Definición dimensional

Para las dimensiones de la gabarra se realizó un estudio comparativo de las medidas de los modelos comerciales. Este análisis se centró en tres criterios fundamentales:

- Facilidad de manipulación manual del conjunto, considerando su transporte, inmersión y ajuste de pesos en un entorno de laboratorio.
- Relación manga/calado suficientemente elevada que permitiera obtener ángulos de escora claramente apreciables sin comprometer la estabilidad inicial.
- Volumen interno adecuado que posibilitara generar variaciones de desplazamiento significativas al modificar la distribución de masas o simular inundaciones.

A partir de estos condicionantes, se optó por adoptar una dimensión situada en el rango más conservador de los modelos estudiados, garantizando un comportamiento estable pero sensible a las variaciones del centro de gravedad. De este modo, el tamaño seleccionado permite una manipulación cómoda por parte del alumno, así como asegura que los efectos derivados de las distintas configuraciones de carga y de las superficies libres resulten perceptibles durante la experimentación. En la Figura 3-2 se puede observar la relación de las diferentes dimensiones con las de la gabarra (marcada en amarillo).

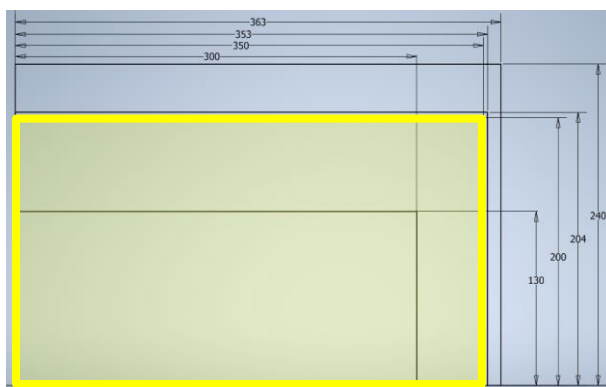


Figura 3-2 Comparativa con medidas de modelos en el mercado

3.1.3 Diseño del casco

El modelado se realizó mediante Autodesk Inventor, en este software se generaron tanto las planchas estructurales como las piezas impresas en 3D y el elemento de variación del centro de gravedad. El uso de este entorno CAD facilitó la definición precisa de tolerancias, espesores, encajes y alineaciones, así como la obtención directa de planos de fabricación coherentes con el diseño conceptual.

Para el diseño del casco se realizó inicialmente una geometría que imitaba la forma de un casco real. No obstante, esta opción provocaba una elevada variabilidad en las curvas hidrostáticas, incrementaba la complejidad del cálculo del metacentro, especialmente en el análisis de estabilidad inicial, y dificultaba la explicación del modelo teórico en el aula, al requerir herramientas matemáticas más complejas para su interpretación.

Puesto que el objetivo de esta gabarra es docente y no representativo, se optó por realizar un casco prismático simétrico proa-popa, con dos variaciones de forma, una de sección triangular y la otra de sección circular como puede observarse en la Figura 3-3. Esta decisión permite simplificar el cálculo analítico del centro de carena y del radio metacéntrico, comparar el comportamiento hidrostático asociado a distintas distribuciones de área de flotación y facilitar la comprensión del concepto de metacentro transversal mediante una interpretación geométrica directa.

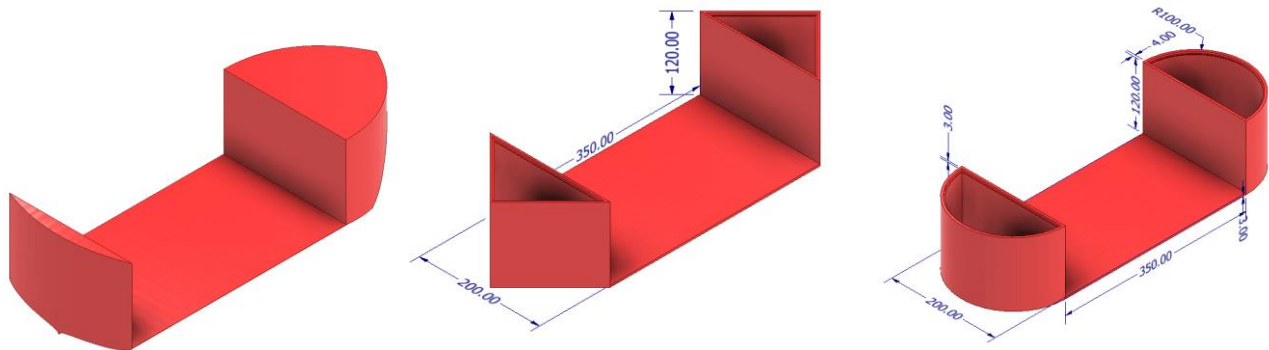


Figura 3-3 Comparativa de modelos de casco

3.1.4 Sistema de variación del centro de gravedad

Se diseñó un sistema modular basado en el desplazamiento a través de raíles de una masa situada en un plano superior transversal con guías internas de tal manera que se permite la posibilidad de generar un movimiento controlado de un lastre considerable sin comprometer la estabilidad geométrica del conjunto ni la repetibilidad de los ensayos.

Para el desarrollo de este plano transversal se diseñaron dos configuraciones, como se puede observar en la Figura 3-4 Elementos de variación del centro de gravedad Figura 3-4. La primera permite la variación horizontal del centro de gravedad mediante el desplazamiento transversal del lastre, generando un momento escorante. Mientras que la segunda configuración posibilita la variación vertical del centro de gravedad, modificando directamente el KG y, por tanto, la altura metacéntrica. Esta doble funcionalidad amplía el rango de situaciones experimentales que pueden reproducirse en el laboratorio.

La razón de haber elegido una geometría triangular responde a un criterio estructural para minimizar la masa no funcional y optimizar la relación rigidez/peso del conjunto. De este modo, se reduce la influencia estructural del propio sistema sobre el KG, asegurando que las variaciones observadas se deban principalmente al lastre móvil.

Las uniones de estos elementos transversales con las láminas longitudinales que conforman los costados de la gabarra se resolvieron mediante piezas impresas en 3D, la cual se puede observar en la Figura 3-4, de tal manera que las cargas se transmitan a las paredes, evitando concentraciones de tensiones en puntos singulares.

Este sistema hace posible la demostración experimental de la influencia de la posición del KG sobre la altura metacéntrica GM, la evaluación de la condición de estabilidad inicial y la observación de la transición hacia estados de equilibrio indiferente o inestable, reproduciendo de forma controlada los principios fundamentales de la teoría de la estabilidad transversal del buque.

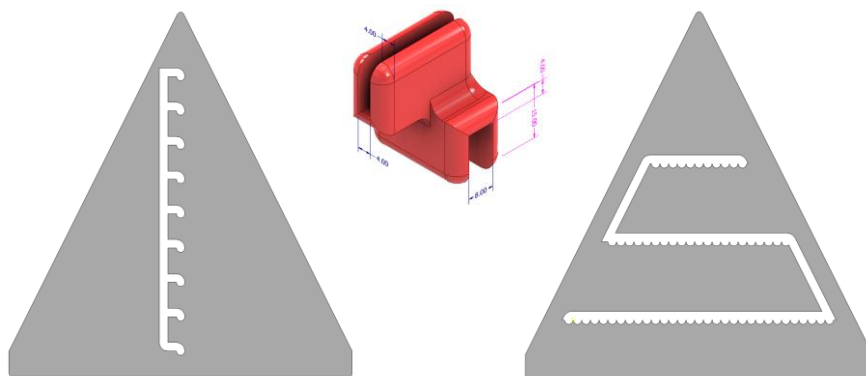


Figura 3-4 Elementos de variación del centro de gravedad

3.1.5 Simulación de inundación y compartimentado

Para simular escenarios de avería e inundación se realizaron orificios simétricos a ambas bandas del modelo, situados a una cota determinada en función de su calado. Este elemento permite la entrada controlada de agua desde el exterior, la generación de ángulos de escora apreciables bajo condiciones de inundación asimétrica y la simulación de pérdidas de estabilidad asociadas al efecto de superficies libres en compartimentos parcialmente inundados.

Estos orificios se sellan mediante tornillos diseñados a medida, con ajuste dimensional para que la estanqueidad esté asegurada. Estos elementos, junto con los mamparos transversales y longitudinales modulares permite alternar entre condiciones sin comunicación con el exterior y situaciones de libre comunicación, manteniendo en todo momento el control sobre las variables experimentales. Esto hace posible la observación de la influencia del compartimentado en la estabilidad, el análisis del efecto de inundaciones asimétricas, la variación de la posición del centro de carena como consecuencia de la variación de la forma de la obra viva, lo que conlleva una reducción de la altura metacéntrica efectiva. En conjunto, el sistema posibilita el estudio comparativo de los métodos de adición de pesos y pérdida de flotabilidad, trasladando al entorno experimental los fundamentos teóricos que se vieron anteriormente.

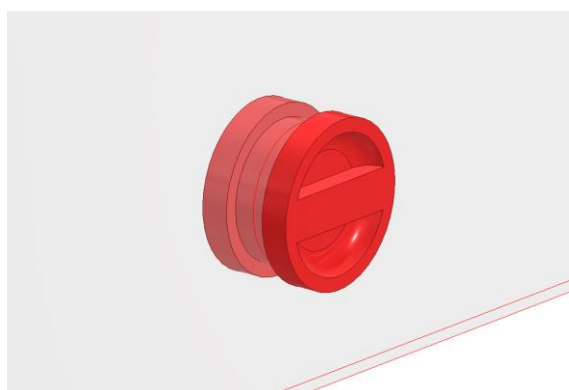


Figura 3-5 Tornillo para orificios de costado

3.2 Construcción

Para el conformado de esta gabarra se pueden distinguir tres métodos constructivos diferentes: la impresión 3D, el cortado laser con las máquinas que se observan en la Figura 3-6 además del torneado. El primer método se ha utilizado para las piezas que transmiten las fuerzas del plano transversal superior

a los costados de la gabarra, los tornillos que obturan los oricios para evitar la entrada de agua en el interior del compartimento y la estructura proa/popa del casco, así como los elementos de sujeción que lo hacen firme al cuerpo principal. El cortado láser se ha empleado para el corte de las piezas de metacrilato que conforman la estructura principal, los mamparos y el elemento destinado a la variación del c.d.g. Por último, el torneado se ha utilizado para conformar el peso circular situado en este último elemento.

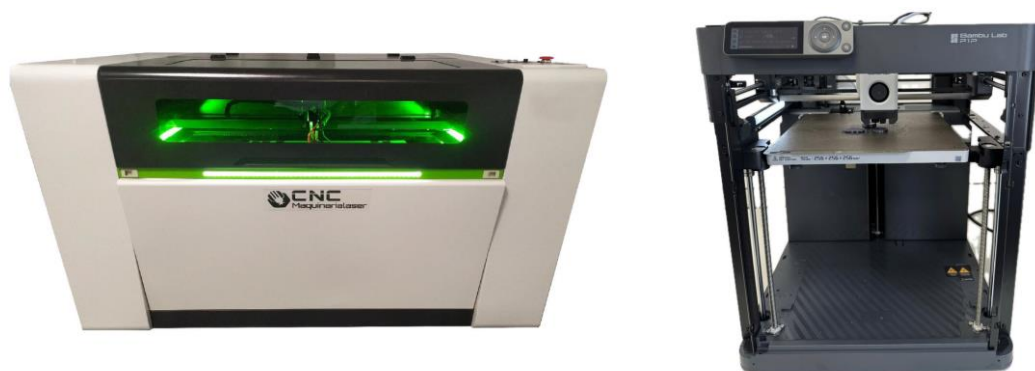


Figura 3-6 Maquinaria de construcción de la gabarra

3.2.1 Cortado láser

Previamente a proceder al corte de las piezas de metacrilato, pasaron por un proceso de optimización del aprovechamiento del material mediante el uso de la herramienta Nesting perteneciente a Autodesk Inventor. El objetivo que se buscaba con este proceso era el de reducir la generación de residuos para optimizar el rendimiento de las planchas comerciales, reduciendo de este modo los costes de producción.

El proceso de anidado permitió distribuir de la forma más eficiente las geometrías sobre planchas de 500×500 mm en función de su forma y dimensión. En la Figura 3-7 se pueden observar tres planchas de estas medidas con todos los elementos obtenidos por cortado láser, a excepción de los dos elementos triangulares que se pueden observar en la Figura 3-8, para los que se usó una plancha independiente de 400×400mm. El anidado completo con los dos modelos de planchas se puede ver en el Anexo III: Anidado de planchas de metacrilato.

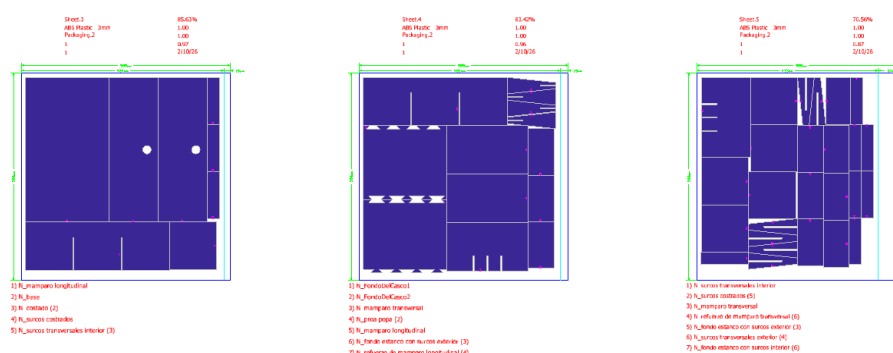


Figura 3-7 Anidado de planchas

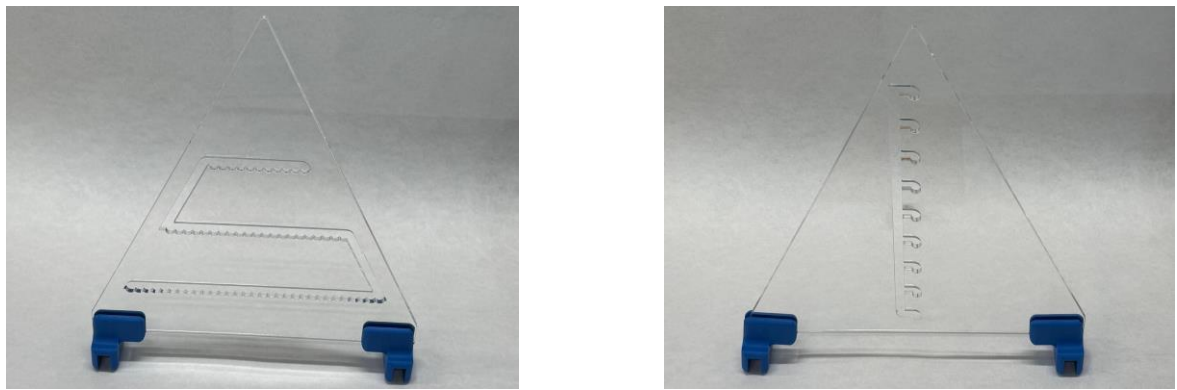


Figura 3-8 Elementos de variación del c.d.g.

En Tabla 1 se recoge una relación detallada del número de piezas obtenidas mediante el proceso se cortado láser.

Pieza	Cantidad
Fondo	1
Triángulo superior	2
Costado	2
Proa/Popa	2
Refuerzos de mamparos	10
Base del casco	2
Surcos transversales	8
Surcos de costados	6
Surcos de fondo	12

Tabla 1 Relación de piezas por cortado laser

Una vez mecanizadas todas las piezas de metacrilato se procedió a la fase del ensamblaje. En primer lugar, se unieron las planchas diseñadas a formar los raíles internos sobre las partes fundamentales del cuerpo principal, es decir, base, costados, proa y popa. Para garantizar la correcta localización y holgura de las ranuras se emplearon elementos separativos con el mismo grosor que las piezas móviles que irán en las ranuras como se puede observar en la Figura 3-9. Tras haber verificado el ajuste y la alineación se realizó la unión definitiva de los cinco elementos fundamentales, configurando así el cuerpo principal de la gabarra, asegurando la continuidad geométrica y la estanqueidad del conjunto.

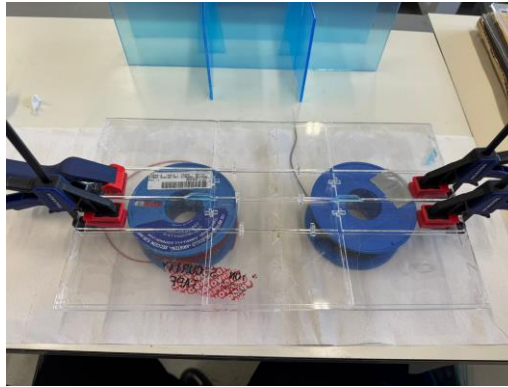


Figura 3-9 Proceso de pegado

Con el objetivo de facilitar la toma de medidas precisas en referencia al calado durante la realización de las experiencias en el laboratorio, se diseñaron marcas de referencia. Estas marcas se plasmaron en los costados mediante la función de grabado de la cortadora láser con el fin de aportar al modelo escalas permanentes con una calidad dimensional destacable sin afectar a su estabilidad.

Estas escalas se han realizado tanto en proa como en popa, en ambos costados del cuerpo principal, con separaciones de 1 mm entre las marcas consecutivas hasta una altura de 80mm. Con esta distribución de las marcas se hace posible la lectura de forma directa de la variación de asiento y el calado medio, mejorando la precisión en la toma de medidas.

3.2.2 Impresión 3D

Continuando con el conformado del casco, la dimensiones de este no permitían su impresión íntegra en una única pieza ya que el tamaño de la placa de trabajo de la impresora está limitado a piezas de 250×250mm. Al separar su conjunto en piezas planas y piezas con volumen se hizo necesario el diseño de un método de sustentación para unir los extremos del casco a la parte central y, además, permitir cambiar sus dos variantes. Con este objetivo, se diseñó un sistema de ensamblaje inferior basado en uniones de tipo cola de milano, que además de asegurar un ensamblaje fiable facilita su modularidad. Este sistema se complementa con otro método de unión en la parte superior el cual consiste en piezas que encajan de tal manera que el casco y el cuerpo principal queden unidos, como se observa en la Figura 3-10.

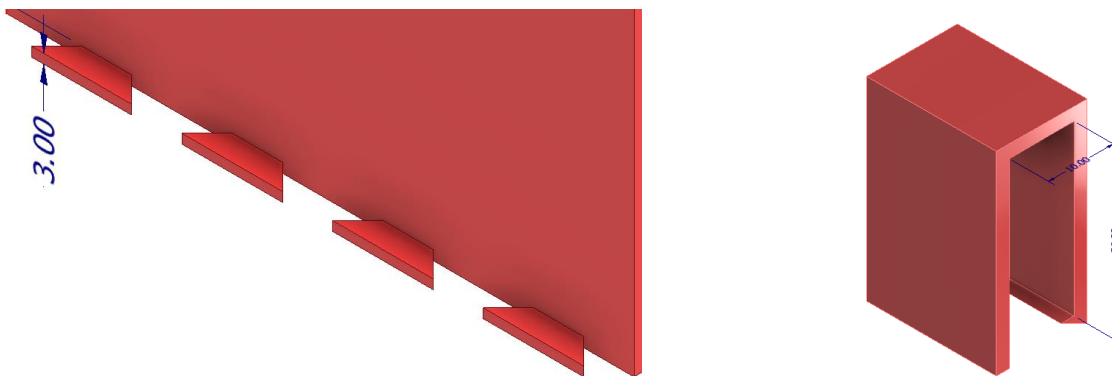


Figura 3-10 Elemento de sujeción del casco

Además de dos unidades de cada modelo de casco, junto con sus respectivos elementos de unión, se realizaron en la impresora 3D los tornillos destinados a obturar los orificios de los costados y los elementos que sujetan el plano transversal superior y lo mantienen firme al cuerpo principal de la gabarra. En la Figura 3-11 se recogen los componentes a los que se ha hecho referencia previamente.



Figura 3-11 Elementos impresos en 3D

3.2.3 Proceso de torneado

Por último, para la masa metálica destinada a la variación del centro de gravedad, se planteó un diseño que garantizara un cambio significativo en la estabilidad de la gabarra al cambiar su posición. Por esta razón se optó por una geometría cilíndrica puesto que al contar con esta geometría proporciona una distribución uniforme de masas y el cálculo de su c.d.g. no introduce una complejidad adicional en los cálculos de estabilidad de la gabarra, permitiendo que el alumno centre sus esfuerzos en la parte fundamental de la experiencia.

Este cilindro ha sido dimensionado de tal manera que permitan su manipulación a través de las guías de los planos transversales de variación del c.d.g. sin comprometer la integridad estructural de estos elementos. Además, permite su modularidad mediante un sistema de rosca en su parte interna, destinado a separar la masa en dos mitades simétricas.

Por último, para el material de este elemento se optó por el acero por su alta densidad, permitiendo concentrar una masa significativa en un volumen reducido, su facilidad de adquisición desde un punto de vista comercial y su facilidad de mecanizado.

3.2.4 Mediciones

Tras haber realizado los procesos de mecanizado (corte láser, pegado, impresión 3D y torneado, según corresponda para cada componente) se ha realizado un pesaje individual de cada uno de los elementos que conforman la gabarra. Este pesaje permite conocer con exactitud el desplazamiento que tendrá en modelo en cada una de sus configuraciones, lo cual es fundamental para el estudio de su estabilidad. Al conocer la masa y el centro de gravedad de cada componente se puede calcular el c.d.g. global y probar la relación entre el modelo teórico y el comportamiento experimental. En la Tabla 2 y en la Tabla 3 se pueden observar tanto la relación de las masas correspondientes a cada una de las piezas fabricadas como las áreas de flotación de la gabarra con cada una de sus configuraciones respectivamente.

Elemento	Peso [kg]
Cuerpo	1,5420
Mamparo transversal	0,0785
Mamparo longitudinal	0,1400
Casco circular	0,1850
Casco triangular	0,1620
Triángulo vertical	0,0750
Triángulo horizontal	0,0700
Tornillos obturadores	0,0050
Refuerzo de mamparo longitudinal	0,0105
Refuerzo de mamparo transversal	0,0100
Soporte de triángulos	0,0130
Pinzas de sujeción de casco	0,0035
Masa cilíndrica	0,2423

Tabla 2 Relación de masas

Elemento	Área [cm ²]
Cuerpo	700
Cuerpo con casco circular	1328,3185
Cuerpo con casco triangular	900
Cuerpo con ambos cascos	957

Tabla 3 Áreas de flotabilidad

Una vez conocidas las dimensiones exactas de los elementos que conforman la gabarra, así como las masas de cada uno de ellos, se hace posible la obtención analítica de parámetros como el desplazamiento, la posición del c.d.g. y, por consiguiente, su estabilidad, generando una base teórica capaz de prever el comportamiento de la gabarra en el laboratorio. Al comparar estos comportamientos teóricos con las experiencias reales el modelo cumple su función didáctica, demostrando los conceptos relacionados con la teoría del buque y actuando como una herramienta práctica para acercar estos conceptos al alumnado.

3.3 Presupuesto

Es un elemento importante en todo proyecto, más aún en una herramienta de docencia. Por ello se ha realizado un cálculo detallado del coste asociado a la fabricación de este equipo, el cual se desarrolla en el Anexo V: Presupuesto.

En el anexo mencionado se observa un desglose de los costes asociados a los materiales empleados, el tiempo de uso de la maquinaria empleada y el coste de la mano de obra referente a un oficial de la Armada. Para la lleva a cabo este desglose se han tenido en cuenta los costes individuales de los materiales empleados, la amortización de cada máquina y herramienta empleada en base a sus horas de uso y el coste de la mano de obra derivado de los procesos que requieren de la presencia del operario.

El resultado obtenido a partir de este desglose establece un coste de fabricación de 322,91 € por unidad fabricada. No obstante, cabe destacar que este valor se vería afectado en etapas posteriores en base a la optimización de proceso de producción en serie, la incorporación de costes indirectos y los márgenes comerciales. Al tratarse de una herramienta docente para este centro no se han tenido en cuenta estos conceptos. Sin embargo, supone una gran diferencia frente a los 540 € del modelo de menor precio del mercado.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras haber realizado los procesos de diseño y construcción de la gabarra se realizan una serie de experiencias en el laboratorio con el fin de estudiar su comportamiento y comprobando su validez a través de los cálculos teóricos. Con este fin se han planteado diferentes situaciones enfrentando las configuraciones para las que se ha diseñado la gabarra, comenzando por situaciones más simples como comprobar el calado del modelo y acabando por situaciones que simulan averías con compartimentos inundados y superficies libres.

4.1 Experiencias en el laboratorio

Para la realización de esas experiencias se ha introducido la gabarra, con sus diferentes configuraciones, en un depósito lleno de agua dulce. Por lo tanto, para el desarrollo de los cálculos analíticos y las demostraciones teóricas se utilizará la densidad del fluido $\rho_{a.d.}=1000 \text{ Kg/m}^3$.

4.1.1 Flotabilidad

Para el estudio de la flotabilidad se han realizado diferentes configuraciones de la gabarra. Estas variaciones se manifiestan principalmente mediante dos modificaciones del sistema:

- Variación de la geometría del casco.
- Alternancia entre los dos elementos de variación del c.d.g. junto con la masa asociada a estos elementos.

A partir de estas combinaciones se han planteado 2 configuraciones principales, a las que se le han realizado diferentes modificaciones. En estas experiencias se observa cómo la variación del área de flotación y la masa del modelo varían su c.d.g. y su centro de carena. Las configuraciones mencionadas se describen a continuación:

1.- Casco triangular y masa situada en la crujía en la cota más baja del modelo vertical del elemento de variación de c.d.g.

En esta configuración la masa total de la gabarra es de 2,5303 Kg mientras que su área de flotación es de 900 cm^2 . Al estar situada la masa a crujía no existen escoras permanentes. Tal como se demostró anteriormente, al introducir un cuerpo flotante en el seno de un fluido la fuerza gravitatoria se iguala con la fuerza de empuje que ejerce el fluido sobre el cuerpo y es equivalente al peso del volumen que desplaza, es decir, equivalente al desplazamiento de la gabarra. Por lo tanto, conociendo el desplazamiento de la gabarra, su área de flotación y la densidad del fluido en el que se encuentra, se puede obtener analíticamente el calado, la posición del c.d.g. y la posición del centro de carena.

El cálculo del calado se realiza aplicando la formula (6), en la que se relaciona la fuerza de gravedad con la fuerza de flotación. Si descomponemos ∇ como el producto del área de flotación (A) por el calado (T) y sustituimos por nuestros valores obtenemos el valor de este último al despejarlo(18).

$$T = \frac{m}{A \times \gamma} = \frac{2,5303 \text{ Kg}}{0,09\text{m}^2 \times 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}} = 0,0281 \text{ m} = 2,8 \text{ cm} \quad (18)$$

Una vez determinado el calado de la gabarra, puesto que presenta una forma regular, determinar la posición de su centro de carena (19) se puede hacer directamente dado que se localiza en el centro geométrico del volumen de fluido desplazado.

$$\overline{KB} = \frac{T}{2} = \frac{0,0281\text{m}}{2} = 0,0140 \text{ m} = 1,4\text{cm} \quad (19)$$

Para calcular el c.d.g. o la distancia de este a la quilla ($\overline{KG}$) se deben relacionar todos los volúmenes que componen la gabarra con su centro de masas. Para el cálculo del $\overline{KG}$ se han hecho algunas simplificaciones y solo se han tenido en cuenta el volumen del cuerpo principal (con un mamparo central y dos transversales), el casco proa/popa, el triángulo transversal superior y la masa cilíndrica.

En el caso del cuerpo principal se descompone la pieza en dos volúmenes, base y paredes. El volumen de la base tiene su c.d.g. a 0,45 cm de la quilla, mientras que el volumen de las paredes se localiza a 6,6 cm. Para calcular el volumen de las paredes se ha optado por un método que suprime los volúmenes que generan los compartimentos del cuerpo principal (tal como se representa en la Figura 4-1), al igual que para calcular el c.d.g. del casco.

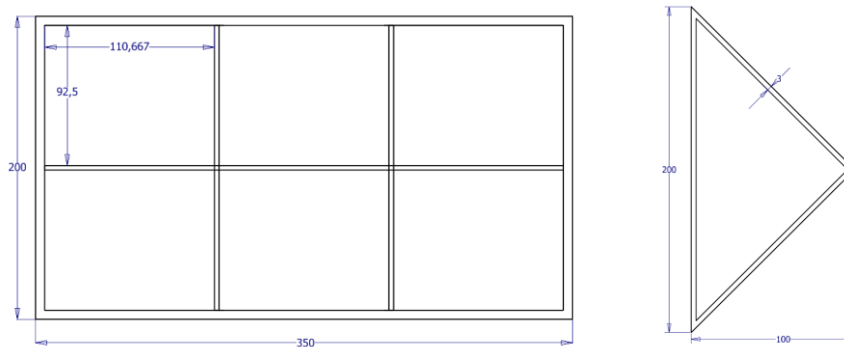


Figura 4-1 Superficies para el cálculo de volúmenes

$$V_{BASE \text{ RECTANGULAR}} = 35 \times 20 \times 0,9 \text{ cm}^3 = 630 \text{ cm}^3$$

$$Z_{BASE \text{ RECTANGULAR}} = \frac{0,9}{2} \text{ cm} = 0,45 \text{ cm}$$

$$V_{PAREDES \text{ CUERPO}} = [35 \times 20 - 6 \times (11,07 \times 9,25)] \times 11,4 \text{ cm}^3 = 978,10 \text{ cm}^3$$

$$Z_{PAREDES \text{ CUERPO}} = \frac{12,3 - 0,9}{2} + 0,9 \text{ cm} = 6,60 \text{ cm}$$

$$V_{BASE \text{ TRIANGULAR}} = \frac{10 \times 20 \times 0,3}{2} \text{ cm}^3 = 30 \text{ cm}^3$$

$$Z_{BASE \text{ TRIANGULAR}} = \frac{0,3}{2} \text{ cm} = 0,15 \text{ cm}$$

$$V_{PAREDES \text{ CASCO}} = \frac{10 \times 20 - 9,28 \times 18,55}{2} \times 12 \text{ cm}^3 = 167,14 \text{ cm}^3$$

$$Z_{PAREDES \text{ CASCO}} = \frac{12}{2} + 0,3 \text{ cm} = 6,30 \text{ cm}$$

$$V_{TRIÁNGULO SUPERIOR} = \left(\frac{20 \times 20}{2} + 1,5 \times 20 \right) \times 0,3 \text{ cm}^3 = 69 \text{ cm}^3$$

$$Z_{TRIÁNGULO SUPERIOR} = 7,20 + 0,8 + 12,3 \text{ cm} = 20,30 \text{ cm}$$

Una vez conocidos los volúmenes de cada elemento junto con la posición de sus centros de gravedad se puede calcular el c.d.g. de cada uno de los materiales para, posteriormente, obtener el c.d.g. global de la gabarra aplicando la fórmula (2) con sus respectivas masas y despejando $\overline{KG}$.

$$Z_{METACRILATO} = \frac{630 \times 0,45 + 978,10 \times 6,60 + 69 \times 20,3}{630 + 978,10 + 69} \text{ cm} = 4,85 \text{ cm}$$

$$Z_{CASCO} = \frac{30 \times 0,15 + 167,14 \times 6,3}{30 + 167,14} \text{ cm} = 5,36 \text{ cm}$$

$$Z_{MASA CILÍNDRICA} = 1,5 + 0,8 + 12,3 \text{ cm} = 14,6 \text{ cm}$$

$$M_{METACRILATO} = 1,914 \text{ Kg}$$

$$M_{CASCO} = 0,324 \text{ Kg}$$

$$M_{MASA CILÍNDRICA} = 0,2423 \text{ Kg}$$

$$\overline{KG} = \frac{1,914 \times 4,85 + 0,324 \times 5,36 + 0,2423 \times 14,6}{1,914 + 0,324 + 0,2423} \text{ cm} = 5,87 \text{ cm}$$

De esta manera, se puede conocer el c.d.g. de la gabarra, denotado como $\overline{KG}$ así como el centro de carena o $\overline{KB}$, propiedades imprescindibles para estudiar su estabilidad.

2.- Casco circular y masa situada a crujía en la cota más baja del modelo horizontal del elemento de variación de c.d.g.

En este caso, a pesar de que se mantienen algunos elementos del caso anterior su configuración es diferente. Este cambio en la configuración supone la necesidad de realizar el estudio analítico de nuevo, respetando los valores para los elementos que se mantienen. Con esta configuración el peso de la gabarra asciende a los 2,5713 Kg debido a la variación del casco y el elemento de variación del c.d.g. Mientras que su área de flotación aumenta hasta los 1328 cm².

Procediendo como en el apartado anterior, se comienza calculando el calado mediante la fórmula (6) y aplicando las particularidades ya expuestas.

$$T = \frac{m}{A \times \gamma} = \frac{2,5713 \text{ Kg}}{0,1328 \text{ m}^2 \times 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0,0194 \text{ m} = 1,94 \text{ cm}$$

Una vez obtenido su calado se puede obtener la posición de su centro de carena ($\overline{KB}$).

$$\overline{KB} = \frac{T}{2} = \frac{0,0194 \text{ m}}{2} = 0,0097 \text{ m} = 0,97 \text{ cm}$$

Para el cálculo del c.d.g. se mantienen las mismas simplificaciones que se utilizaron en el apartado anterior. Esto supone que se tendrán en cuenta los volúmenes del cuerpo principal, el casco, el triángulo superior y la masa que este sustenta. Dado que el casco y el triángulo son los únicos elementos que varían respecto a la configuración del apartado anterior solo se realizarán los cálculos de estas piezas, utilizando los resultados ya calculados para el resto de los elementos.

$$V_{BASE RECTANGULAR} = 630 \text{ cm}^3$$

$$Z_{BASE RECTANGULAR} = 0,45 \text{ cm}$$

$$V_{PAREDES CUERPO} = 978,10 \text{ cm}^3$$

$$Z_{PAREDES\ CUERPO} = 6,60\text{ cm}$$

$$V_{BASE\ CIRCULAR} = \frac{\pi \times 10^2}{2} \times 0,3\text{ cm}^3 = 47,12\text{ cm}^3$$

$$Z_{BASE\ CIRCULAR} = \frac{0,3}{2}\text{ cm} = 0,15\text{ cm}$$

$$V_{PAREDES\ CASCO} = \frac{\pi \times 10^2 - \pi \times 9,7^2}{2} \times 12\text{ cm}^3 = 111,40\text{ cm}^3$$

$$Z_{PAREDES\ CASCO} = \frac{12}{2} + 0,3\text{ cm} = 6,3\text{ cm}$$

$$V_{TRIÁNGULO\ SUPERIOR} = 69\text{ cm}^3$$

$$Z_{TRIÁNGULO\ SUPERIOR} = 20,30\text{ cm}$$

Tras haber conocido los volúmenes y c.d.g. de los elementos que han variado es posible calcular el $\overline{KG}$ de la gabarra con la nueva configuración.

$$Z_{METACRILATO} = \frac{630 \times 0,45 + 978,10 \times 6,60 + 69 \times 20,3}{630 + 978,10 + 69}\text{ cm} = 4,85\text{ cm}$$

$$Z_{CASCO} = \frac{47,12 \times 0,15 + 111,4 \times 6,3}{47,12 + 111,4}\text{ cm} = 4,47\text{ cm}$$

$$Z_{MASA\ CILÍNDRICA} = 3,5 + 0,8 + 12,3\text{ cm} = 17,6\text{ cm}$$

$$M_{METACRILATO} = 1,909\text{ Kg}$$

$$M_{CASCO} = 0,37\text{ Kg}$$

$$M_{MASA\ CILÍNDRICA} = 0,2423\text{ Kg}$$

$$\overline{KG} = \frac{1,909 \times 4,85 + 0,37 \times 4,47 + 0,2423 \times 17,6}{1,909 + 0,37 + 0,2423}\text{ cm} = 6,01\text{ cm}$$

Nótese que, tras haber realizado los cálculos de estos valores fundamentales para el estudio de la estabilidad, se puede comprobar que son relativamente próximos. Esto se debe a que la variación entre los dos modelos de cascos no supone una diferencia muy notable ya que sus volúmenes y áreas se encuentran entre valores muy cercanos.

4.1.2 Estabilidad

Para determinar si un cuerpo flotante es estable o no se debe estudiar su altura metacéntrica ($\overline{GM}$). Conocer la altura metacéntrica nos permite diferenciar un buque estable ($\overline{GM} > 0$) de uno que no lo es ($\overline{GM} < 0$). El cálculo de este parámetro se consigue a través de la fórmula (10), en la que se relaciona el $\overline{KG}$, $\overline{KB}$ y el radio metacéntrico ($\overline{MB}$). De estos tres elementos, el único que resta conocer en el caso de la primera experiencia es el $\overline{MB}$, el cual se obtiene a través del momento de inercia de la superficie flotante y el volumen de carena, según la fórmula (7). Tal como se muestra en la Figura 4-2, el momento de inercia se calcula respecto a la línea de crujía, pues se está estudiando la estabilidad transversal.

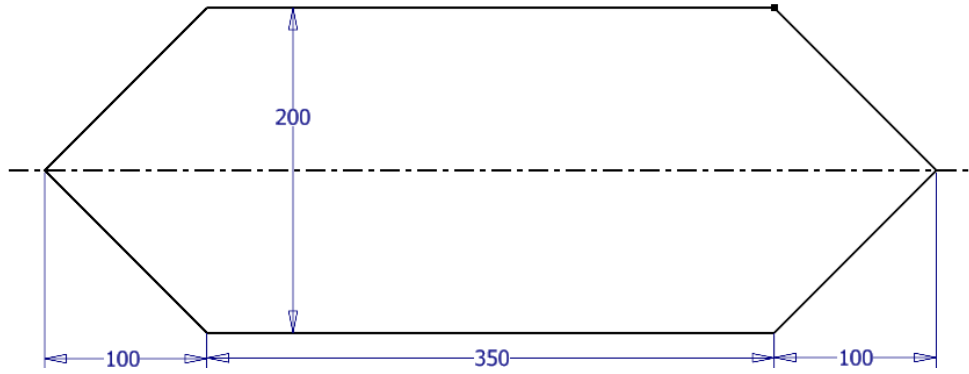


Figura 4-2 Área de flotación con casco triangular

Para facilitar el cálculo del momento de inercia se divide el área en tres piezas, un rectángulo y dos triángulos, como se observa en la fórmula (20).

$$I_L = \frac{35 \times 20^3}{12} + 2 \times \frac{10 \times 20^3}{48} \text{ cm}^4 = 26666,67 \text{ cm}^4 \quad (20)$$

Una vez conocido el momento de inercia del área de flotación junto con el volumen de carena, que se obtiene mediante el producto del calado y esta misma área, se puede obtener el $\overline{BM}$.

$$\nabla = A \times T = 900 \times 2,8 \text{ cm}^3 = 2520 \text{ cm}^3$$

$$\overline{BM}_T = \frac{26666,67}{3060} \text{ cm} = 8,71 \text{ cm}$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula (10) se obtiene la altura metacéntrica del modelo.

$$\overline{GM} = 1,4 + 8,71 - 5,85 = 4,26 \text{ cm} > 0$$

De esta última ecuación se puede afirmar que la gabarra con la disposición de la primera experiencia presenta estabilidad transversal inicial.

Con estos datos, además de poder diferir si una embarcación es o no estable, se puede conformar la gráfica de la curva de estabilidad transversal. En esta gráfica se enfrenta el brazo adrizante frente al ángulo de escora. Para pequeños ángulos se puede utilizar la fórmula (21) ya que la posición del metacentro es prácticamente estable. Sin embargo, para mayores ángulos esta fórmula deja de ser efectiva y es necesario corregir esta simplificación con el brazo KN (22).

$$GZ = KG \sin \theta \quad (21)$$

$$GZ = KN - KG \sin \theta \quad (22)$$

Al sustituir estos parámetros con los valores de la gabarra se obtiene la gráfica que se observa en la Figura 4-3 Curva de estabilidad transversal con casco triangular. En ella se puede observar cómo hasta los 15 ° de escora aproximadamente ambas fórmulas avanzan de forma pareja, esto se debe a que para pequeños ángulos el metacentro se puede simplificar como un único punto y se puede utilizar la ecuación(21). A partir de este punto las gráficas se separan. Además, la curva que representa la ecuación(22) deja de ascender cuando el ángulo de escora se aproxima a los 25°. Esto se debe a que la gabarra comienza a perder la estabilidad y el brazo adrizante que antes la devolvía a su posición inicial se está reduciendo hasta que a los 55° se anula y pasa a ser par escorante.

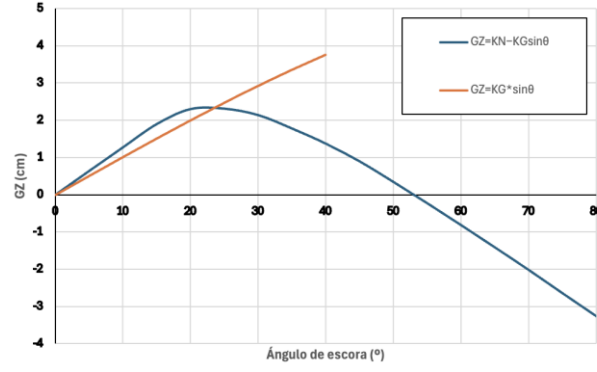


Figura 4-3 Curva de estabilidad transversal con casco triangular

En caso de variar su condición de carga sin variar su desplazamiento, es decir, trasladando la masa, la gráfica sufriría una variación. Al desplazar la masa cilíndrica a su punto más alejado de la quilla su centro de masa se desplazaría y esto provocaría a su vez una disminución de la estabilidad. Para conocer la nueva curva de estabilidad se han de aplicar las fórmulas (23) y (24). En la Figura 4-4 se representa esta curva frente a las ya mencionadas anteriormente para demostrar la reducción de la estabilidad.

$$GZ' = KN - (KG + GG_1)\sin\theta \quad (23)$$

$$GG_1 = \frac{w \times d}{W} = \frac{0,2423 \times 16}{2,5303} \text{ cm} = 1,53 \text{ cm} \quad (24)$$

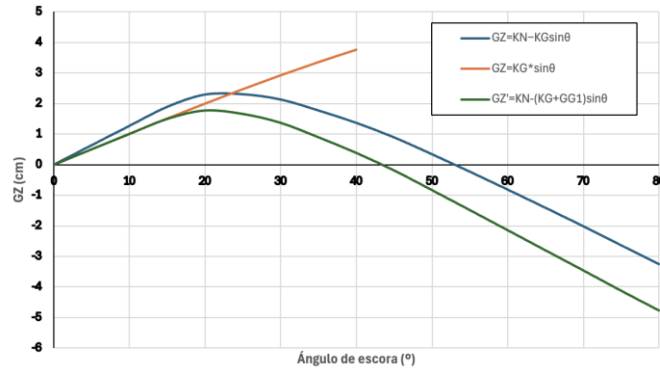


Figura 4-4 Curva de estabilidad con desplazamiento vertical de pesos

En el caso de que uno de los compartimentos se inundara parcialmente, como se puede observar en la Figura 4-5, daría lugar a una superficie libre en su interior. Esta superficie libre provoca un aumento del $\overline{KG}$, que a su vez se traduce en una pérdida de estabilidad de la gabarra. Para conocer esta nueva situación de estabilidad es necesario calcular la nueva posición del c.d.g. del conjunto. Para ellos se hace uso de la ecuación (25), siendo cociente el momento de inercia de la superficie libre (26) y su denominador el volumen de carena. Tras conocer la nueva situación del c.d.g. se procede con el mismo procedimiento que se utilizó para corregir el GZ por el traslado de pesos. En este caso, al aplicar la ecuación (27) da como resultado la curva que se observa en la Figura 4-5.

$$GG_2 = \frac{i}{\nabla} = \frac{730,12}{2520} \text{ cm} = 0,29 \text{ cm} \quad (25)$$

$$i = \frac{b^3 \times l}{12} \text{ cm}^4 = \frac{9,25^3 \times 11,07}{12} \text{ cm}^4 = 730,12 \text{ cm}^4 \quad (26)$$

$$GZ'' = KN - (KG + GG_2)\sin\theta \quad (27)$$

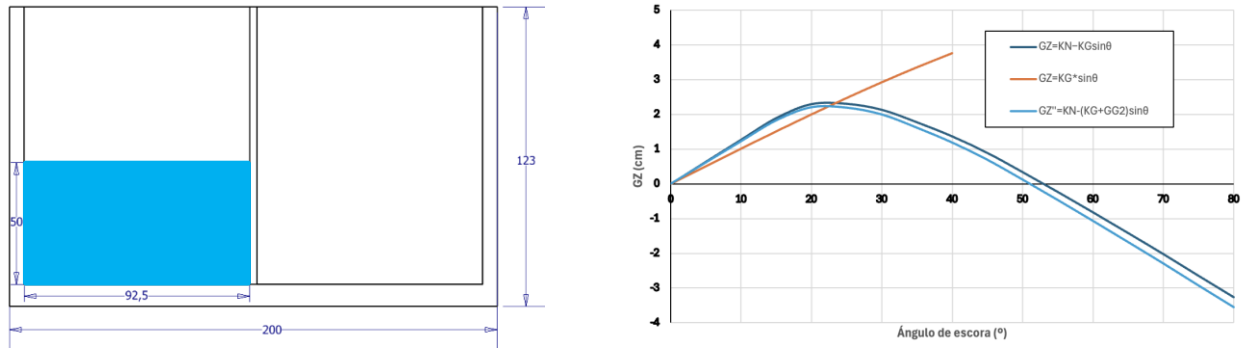


Figura 4-5 Curva de estabilidad para superficies libres

Continuando con la segunda disposición de la gabarra, es decir, utilizando el casco circular, se repite el procedimiento de la configuración anterior. En este caso el área de flotación de la gabarra en su posición inicial es la de la Figura 4-6.

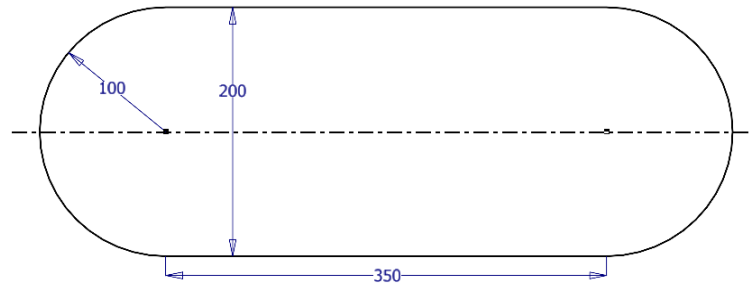


Figura 4-6 Área de flotación con casco circular

Para calcular el momento de inercia se divide el área en tres piezas, un rectángulo y dos semicircunferencias.

$$I_L = \frac{35 \times 20^3}{12} + 2 \times \frac{\pi \times 10^4}{8} \text{ cm}^4 = 31187,31 \text{ cm}^4$$

Una vez se ha obtenido el momento de inercia, es posible calcular el radio metacéntrico transversal. Para ello previamente se determina el volumen sumergido mediante el producto del área de flotación y el calado del modelo.

$$\nabla = A \times T = 1328 \times 2,33 \text{ cm}^3 = 2576,32 \text{ cm}^3$$

A partir del valor obtenido se calcula el radio metacéntrico.

$$\overline{BM}_T = \frac{31187,31}{2576,32} \text{ cm} = 12,11 \text{ cm}$$

Por último, al haber calculado los valores del $\overline{BM}$, el $\overline{KG}$ y el $\overline{KB}$ es posible conocer el $\overline{GM}$.

$$\overline{GM} = 0,97 + 12,11 - 6,01 = 7,07 \text{ cm} > 0$$

Puesto que el valor de $\overline{GM}$ es positivo se puede afirmar que la gabarra con esta nueva disposición continúa siendo estable.

Para conformar la gráfica de estabilidad se seguirá el mismo procedimiento que se utilizó para la disposición anterior del modelo, calculando el GZ mediante el $\overline{KG}$ y la corrección por el KN. De este modo, aplicando las ecuaciones (21) y (22), se obtiene la gráfica representada en la Figura 4-7.

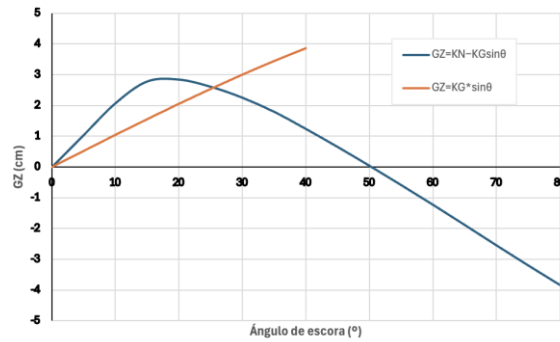


Figura 4-7 Curva de estabilidad transversal con casco circular

En este caso, la masa se desplaza en sentido transversal al punto más alejado de crujía, esto supone un desplazamiento de 7,3 cm. Para calcular la nueva curva de estabilidad se procederá de forma similar al caso anterior. Se vuelve a aplicar la ecuación (24) cambiando el desplazamiento vertical por el horizontal (29). Sin embargo, al variar el peso en el sentido de la manga la corrección que se aplica es con el coseno de la escora, como se observa en la ecuación (28).

$$GZ''' = GZ - GG_3 \cos \theta \quad (28)$$

$$GG_3 = \frac{w \times d}{W} = \frac{0,2423 \times 7,5}{2,5713} \text{ cm} = 0,71 \text{ cm} \quad (29)$$

Tras haber aplicado esta corrección se obtiene la curva de la Figura 4-8, en ella se puede ver que la gabarra presenta una escora inicial permanente. Esta escora es debida a la masa que se ha desplazado a la banda.

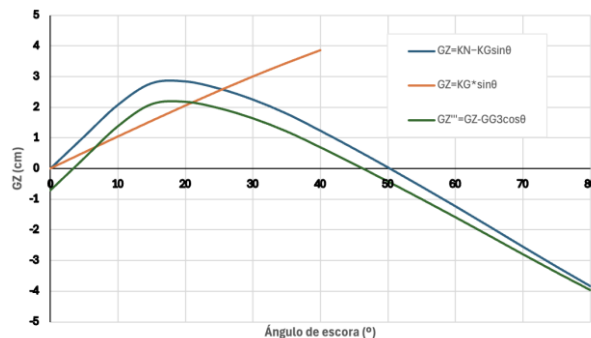


Figura 4-8 Curva de estabilidad con corrección por coseno

De este modo, queda constancia de cómo se comporta un cuerpo flotante al ser sumergirlo en un fluido, evidenciando la relación que existe entre el volumen sumergido y el empuje hidrostático generado. Además, se puede comprobar la importancia de la distribución de las cargas que porta, así como la geometría de su carena. Esto se debe a que estos parámetros son condicionantes para la determinación de su estabilidad inicial.

4.1.3 Averías

Para realizar las experiencias de averías se retoma la primera configuración de casco triangular y elemento de variación del c.d.g. vertical. Sin embargo, en esta experiencia se elimina el tornillo obturador de uno de los costados, lo que causa la inundación parcial del compartimento contiguo al exterior del casco.

En el estudio de este suceso se utilizará el método de “pérdida de flotabilidad” de tal manera que la nueva área de flotación será como en la Figura 4-9, donde se observa el compartimento 3 dañado.

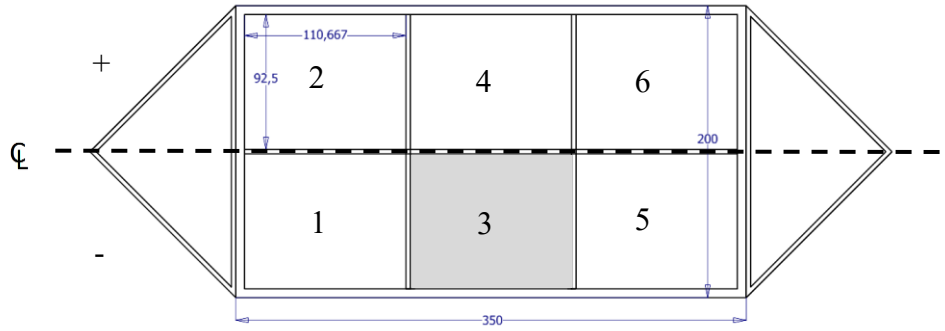


Figura 4-9 Área de flotación con avería

Con el objetivo de conocer el ángulo de escora que provoca la avería reflejada se seguirán una serie de pasos, comenzando por hallar el nuevo calado tras dicha pérdida de flotabilidad. Los datos principales que utilizar coinciden con los de la gabarra de la primera experiencia en su configuración inicial, con un calado de 3,4 cm y un $\overline{KG}$ de 5,39 cm. El nuevo volumen de carena deberá coincidir con el pasado, de tal manera que al disminuir el área de flotación deberá aumentar el calado, dando como resultado la relación de la ecuación (30).

$$\nabla = \nabla_{NUEVO} \rightarrow A \times T = A_{AVERIA} \times T_{NUEVO} \quad (30)$$

$$T_{NUEVO} = \frac{A \times T}{A_{AVERIA}} \text{ cm} = \frac{900 \times 2,8}{900 - 9,25 \times 11,07} \text{ cm} = 3,16 \text{ cm} \quad (31)$$

Tras haber obtenido el nuevo calado con la ecuación (31), se procede a calcular el nuevo centro de flotación transversal (CFT). Para ellos el sistema de referencia que se utilizará será la línea de crujía (LC) con coordenadas positivas a babor y negativas a estribor como se observa en la Tabla 4.

Compartimento	Área [cm ²]	LC
1	$b \times l$	$-b/2$
2	$b \times l$	$b/2$
3	Dañado	Dañado
4	$b \times l$	$b/2$
5	$b \times l$	$-b/2$
6	$b \times l$	$b/2$

Tabla 4 Centros de flotación de compartimentos

Una vez especificados estos parámetros se está en disposición de conocer la situación del nuevo CFT mediante el sumatorio de momentos individuales como se observa en la ecuación (32).

$$TCF_{NUEVO} = \frac{3(b \times l) \times \left(\frac{B}{2}\right) - 2(b \times l) \times \left(\frac{b}{2}\right)}{5(b \times l)} \text{ cm} = \frac{b}{5} \text{ cm} = \frac{9,25}{10} \text{ cm} \quad (32)$$

$= 0,93 \text{ cm a babor, desde la LC}$

A continuación, se define el valor del nuevo radio metacéntrico (34), para el cual es necesario conocer la inercia del área dañada respecto al nuevo CFT (33), siendo d y d_t las distancias a este lugar desde la LC y el centro del compartimento inundado respectivamente, como se puede observar en la Figura 4-10.

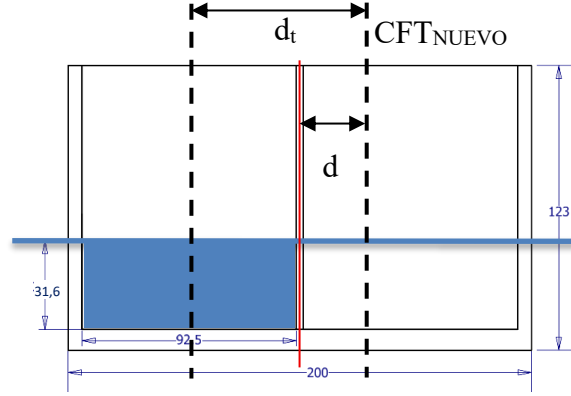


Figura 4-10 Variación del CFT

$$I_{AVERÍA} = I_L + d^2 \times B \times L - \left(\frac{l \times b^3}{12} + d_t^2 \times b \times l \right) cm^4 \quad (33)$$

$$= 26666,67 + 778,41 - (769,49 + 3159,78) cm^4 = 23515,81 cm^4$$

$$\overline{BM}_{AVERÍA} = \frac{I_{AVERÍA}}{\nabla} cm = \frac{23515,81}{2520} cm = 9,33 cm \quad (34)$$

Para calcular la nueva altura metacéntrica se aplica la ecuación (36) con los nuevos valores, de los cuales el único que aún no es conocido es el nuevo centro de carena. Una vez conocido el valor del nuevo $\overline{KG}$ (35) se está en disposición de cocer el nuevo $\overline{GM}$.

$$\overline{KB}_{AVERÍA} = \frac{T_{NUEVO}}{2} = \frac{3,16}{2} cm = 1,58 cm \quad (35)$$

$$\overline{GM}_{NUEVO} = \overline{KB}_{AVERÍA} + \overline{BM}_{AVERÍA} - \overline{KG} = 1,58 + 9,33 - 5,85 cm = 5,06 cm \quad (36)$$

Si comparamos este resultado con el $\overline{GM}$ antes de sufrir la avería se ve cómo este suceso ha provocado un aumento en la estabilidad de la gabarra. Esto sucede debido a que al aumentar el calado de la gabarra se ve favorecida su estabilidad.

Por último, para conocer el ángulo de escora que provoca la inundación de este compartimento se hará uso de la ecuación (11), ya que el momento adrizante del conjunto se ha de igualar con el momento escorante (12) que provoca la masa de agua derivada de la inundación del compartimento. De este modo, tenemos que para pequeños ángulos el valor de θ se puede aproximar a la ecuación (37).

$$W \times GM \times \sin\theta = w \times d_t \times \cos\theta \rightarrow \theta = \frac{w \times d_t}{W \times GM} = \frac{0,2621 \times 5,55}{2,5303 \times 5,06} = 0,1136 \quad (37)$$

$$\theta = 6,5 \text{ grados}$$

Con esta última experiencia se concluye el proceso enfocado en la demostración del efecto que provocan diferentes condiciones operativas en la estabilidad de los barcos, llevado a un entorno didáctico a través del uso de la gabarra. Estos fenómenos pueden ser la variación de la geometría del casco, que afecta directamente a la carena del modelo, el desplazamiento de pesos en sentido vertical y horizontal, así como la inundación de compartimentos por averías de origen interno o externo. Todos ellos reproducidos de forma práctica con dicho elemento didáctico.

La reproducción de estos ensayos hace posible trasladar los principios teóricos de la estabilidad naval a un ámbito accesible para el alumnado, facilitando la comprensión de estos gracias a la observación directa del comportamiento de la gabarra.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El objetivo de este TFG era el desarrollo del diseño, la fabricación y la validación experimental de un modelo didáctico enfocado en el estudio y demostración de los principios fundamentales de teoría del buque, específicamente en su condición de estabilidad. El proceso que se ha seguido para llegar a este fin abarca desde el análisis teórico de conceptos fundamentales en este ámbito, hasta la materialización y validación de un dispositivo apto para su uso en el laboratorio capaz de reproducir estos fenómenos de forma controlada.

Su diseño fundamentado en una geometría prismática simple es adecuado para alcanzar la función docente para la que fue diseñado. Gracias a esta configuración es posible observar los efectos que provocan en el modelo las variaciones en la distribución de pesos, la forma de la carena y la pérdida de flotabilidad por causa de averías. Todo ello contribuye a facilitar la comprensión de conceptos claves como los centros de gravedad y carena, su relación, el metacentro o la altura metacéntrica.

Mediante la realización de los ensayos propuestos se ha conseguido establecer una relación de semejanza entre los cálculos teóricos y el comportamiento real de la gabarra. Especialmente la relación entre el desplazamiento y el centro de carena, la influencia de la posición del centro de gravedad en la estabilidad del conjunto y la reducción de esta última con la aparición de superficies libres y vasos comunicantes con el exterior.

Pasando a un ámbito constructivo, mediante el proceso de materialización de este modelo se deja patente la importancia de tener presente aspectos como la precisión dimensional, para lo cual ha sido fundamental el uso de maquinaria CNC. La solución adoptada basada en un empleo de capas dobles de metacrilato ha contribuido en la robustez del modelo, requisito indispensable para su uso reiterado en el laboratorio.

En resumen, este proceso analítico y constructivo demuestra la posibilidad de diseñar y mecanizar un modelo experimental capaz de reproducir experiencias prácticas en el laboratorio, constituyendo así una herramienta fundamental en la enseñanza de conceptos fundamentales en la ingeniería naval.

5.2 Líneas futuras

A pesar de haber obtenido unos resultados satisfactorios, surgen diversas líneas destinadas a mejorar y ampliar las capacidades experimentales del modelo didáctico.

En primer lugar, una de las mejoras más destacadas sería la de rediseñar el sistema de compartimentación interna, de tal manera que permita cambiar la distribución de los compartimentos

manteniendo la estanqueidad de los mimos. El desarrollo de un sistema de compartimentación desmontable y estanco haría posible el estudio de un mayor número de experiencias con compartimentos simétricos y asimétricos respecto a la línea de crujía.

En segundo lugar, se podría utilizar el modelo para realizar estudios y experiencias de estabilidad longitudinal mediante la adición de pesos en zonas no simétricas o el empleo de cascos con geometrías variables con el fin de observar cómo afectan estos al asiento de la gabarra.

Otra posible línea de continuación, enlazando con la anterior, sería la obtención completa de las curvas hidrostáticas de la gabarra en sus diferentes configuraciones de casco. De este modo se consigue acercar el proceso de construcción naval al alumnado, dotando el proceso de mayor realismo y dándole continuidad a la fase de botadura de un buque.

Por último, otra posible línea de desarrollo sería dotar al modelo didáctico de un sistema digitalizado de adquisición en tiempo real de datos como el calado, la escora, la posición del metacentro. En definitiva, un sistema preciso y automatizado que facilite el análisis de los conceptos ya estudiados.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Villa Caro, «La importancia de la experiencia de estabilidad en los buques,» *Revista General de Marina*, pp. 721-732, 2015.
- [2] F. Supervielle Bergés, *Táctica Naval. Guerra en la mar en el siglo XXI*, Federico Supervielle Bergés, 2023.
- [3] K. Johansen y B. M. Batalden, *Active Learning for Enhanced Understanding of “Ship Damage Stability”*, International Institute of Social and Economic Sciences, 2018.
- [4] A. Hernández de la Fuente, «Nueva doctrina de Seguridad Interior D-CP-01 (B),» *Revista General de Marina*, 2022.
- [5] Ministerio de Defensa, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID – 2015),» Secretaría General Técnica, Madrid, 2016.
- [6] H. Ekdahl Espinoza, *Los Barcos y el Mundo*, Canopus Editorial Digital Sa, 2024.
- [7] I. Barbudo Escobar, *Fundamentos de Maniobra (Tomo I del Tratado de Maniobra)*, Fragata Libros Náuticos, 2004.
- [8] T. O'Scanlan, *Diccionario Marítimo Español*, Imprenta Real, 1831.
- [9] J. Villar Ibáñez, *Embarcaciones portuarias y de tráfico interior en los puertos de Bilbao y Pasajes*, Itsas Memoria. Revista de Estudios Marítimos del País Vasco, 1998.
- [10] Armada Española, I-CP-03. Estabilidad, Centro de Doctrina de la Flota, 2018.
- [11] J. Olivella Puig, *Teoría del Buque. Estabilidad, varada e inundación*, Edicions UPC, 2004.
- [12] «TecQuipment,» [En línea]. Available: <https://www.tecquipment.com/es/>. [Último acceso: 22 enero 2026].
- [13] «DIKON ENGINEERING,» [En línea]. Available: <https://dikoin.com/?lang=es>. [Último acceso: 22 enero 2026].
- [14] «ARMFIELD,» [En línea]. Available: <https://armfield.co.uk/>. [Último acceso: 22 enero 2026].

- [15] «EDIBON,» [En línea]. Available: <https://www.edibon.com/es/>. [Último acceso: 22 enero 2026].
- [16] «GUNT HAMBURG,» [En línea]. Available: <https://www.gunt.de/en/>. [Último acceso: 22 enero 2026].
- [17] J. Romero Fernández De Landa, Reglamentos de maderas necesarias para la fábrica de los Baxeles del Rey (SIN COLECCION) - Tapa blanda, Editorial Maxtor, 2008.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo de una gabarra didáctica estudiar su estabilidad transversal y comprobar el efecto que tienen las superficies libres conlleva una serie de implicaciones en los ámbitos social, económico y ambiental. Contextualizar este proyecto en un ámbito más amplio permite demostrar cómo la ingeniera trata de contribuir de forma responsable al desarrollo de la sociedad.

Desde el punto de vista social, la gabarra constituye una herramienta didáctica enfocada en facilitar la adquisición de conceptos por parte del alumnado que pretende desarrollarse en un ámbito profesional en el que estos conocimientos toman un papel imprescindible.

En el ámbito económico, desarrollar este modelo con maquinaria a disposición del Centro Universitario de la Defensa y materiales de fácil adquisición permite reducir los costes para acceder a este tipo de herramientas didácticas. Además, el uso de programas CAD hace posible adaptar el modelo a las necesidades específicas de este centro docente sin que eso lleve consigo costes significativos adicionales.

Por último, desde una perspectiva ambiental, el modelo presenta un impacto reducido al tratarse de un modelo de pequeñas dimensiones. Sin embargo, durante el proceso de producción de sus elementos se ha tratado de optimizar el uso de recursos, reduciendo la generación de residuos. Por otra parte, su diseño robusto permite la utilización en múltiples prácticas de laboratorio, contribuyendo a prolongar su vida útil y suprimir la necesidad de fabricar nuevos dispositivos.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

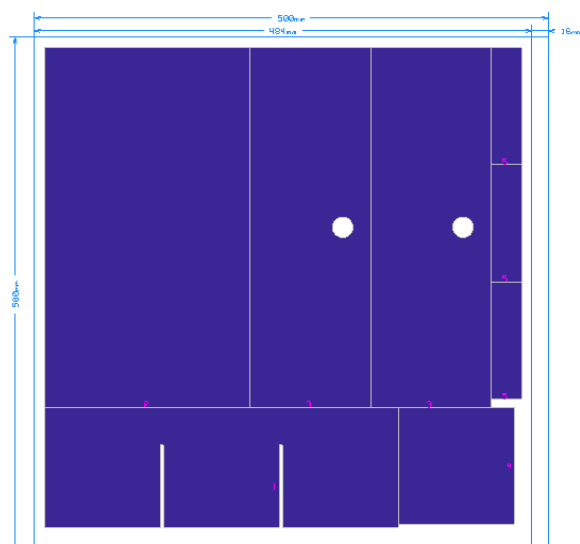
El desarrollo de un modelo didáctico destinado a estudiar la estabilidad de buques cuenta con un claro objetivo formativo. Comprender y manejar con soltura los principios que rigen el comportamiento de las embarcaciones tiene un papel fundamental para poder garantizar la seguridad en la navegación y prevenir situaciones que puedan suponer un riesgo para la integridad de la embarcación sus tripulantes o el entorno marítimo. Es por ello por lo que el empleo de herramientas didácticas que faciliten el aprendizaje de estos conceptos contribuye directamente con la formación de los futuros oficiales de la Armada.

Por otro lado, el ámbito de la ingeniería naval está cada vez más relacionado con la gestión responsable de recursos y respeto por el medio marino. Esto se puede comprobar con el desarrollo de modelos de casco que permitan aumentar la eficiencia de las embarcaciones y la reducción de accidente en este entorno, así como los impactos ambientales derivados de estos.

Finalmente, cabe destacar la importancia de compromiso ético en el ámbito de la ingeniería, llevada a cabo bajo criterios de honestidad y responsabilidad profesional. Esto se traduce en un uso responsable de los recursos a nuestro alcance, así como el reconocimiento adecuado de las fuentes utilizadas y la presentación fiel de los resultados obtenidos. Adoptar estos principios ayuda, además de cumplir con la calidad del trabajo, a constituir una base científica orientada al progreso de la sociedad.

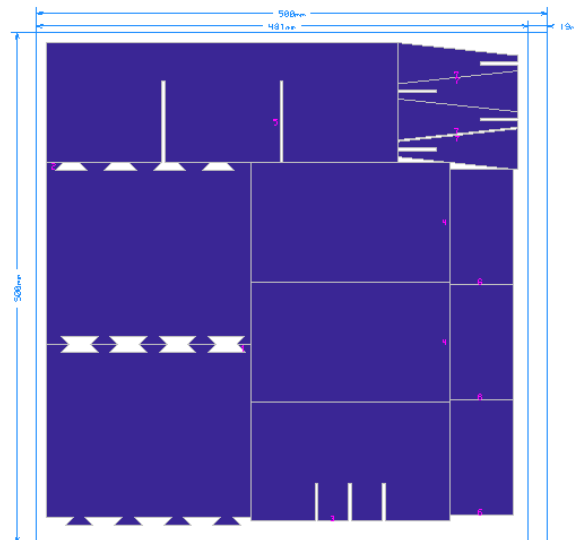
ANEXO III: ANIDADO DE PLANCHAS DE METACRILATO

Sheet name : Sheet.3 Efficiency : 85.63%
Material : ABS Plastic - 3mm Packaging cost : 1.00
Packaging : Packaging.2 Total cost : 1.00
Sheet quantity : 1 Total nested cost : 0.97
Stack size : 1 Date : 2/10/26



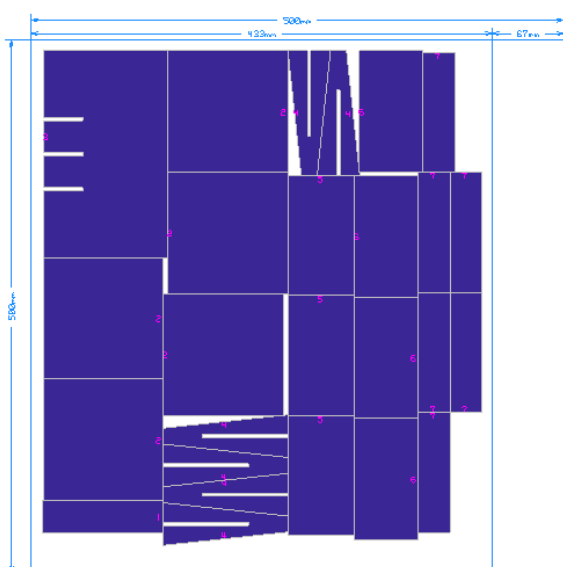
- 1) N_mamparo longitudinal
- 2) N_base
- 3) N_costado (2)
- 4) N_surcos costrados
- 5) N_surcos transversales interior (3)

Sheet name : Sheet.4 Efficiency : 83.42%
Material : ABS Plastic - 3mm Packaging cost : 1.00
Packaging : Packaging.2 Total cost : 1.00
Sheet quantity : 1 Total nested cost : 0.96
Stack size : 1 Date : 2/10/26



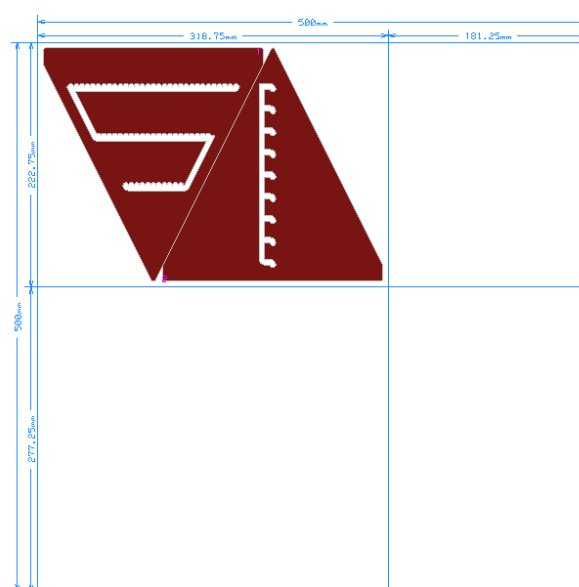
- 1) N_FondoDelCasco1
- 2) N_FondoDelCasco2
- 3) N_mamparo transversal
- 4) N_proa popa (2)
- 5) N_mamparo longitudinal
- 6) N_fondo estanco con surcos exterior (3)
- 7) N_refuerzo de mamparo longitudinal (4)

Sheet name : Sheet.5 Efficiency : 70.56%
Material : ABS Plastic - 3mm Packaging cost : 1.00
Packaging : Packaging.2 Total cost : 1.00
Sheet quantity : 1 Total nested cost : 0.87
Stack size : 1 Date : 2/10/26



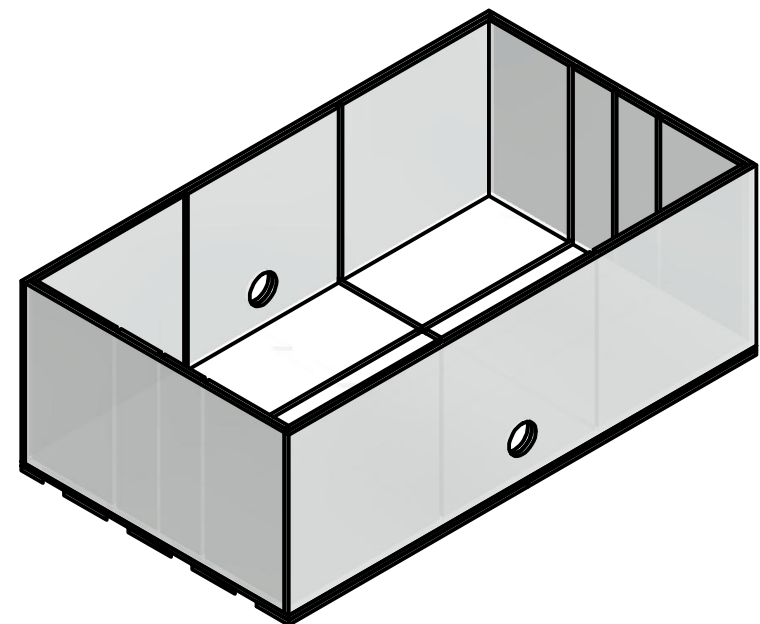
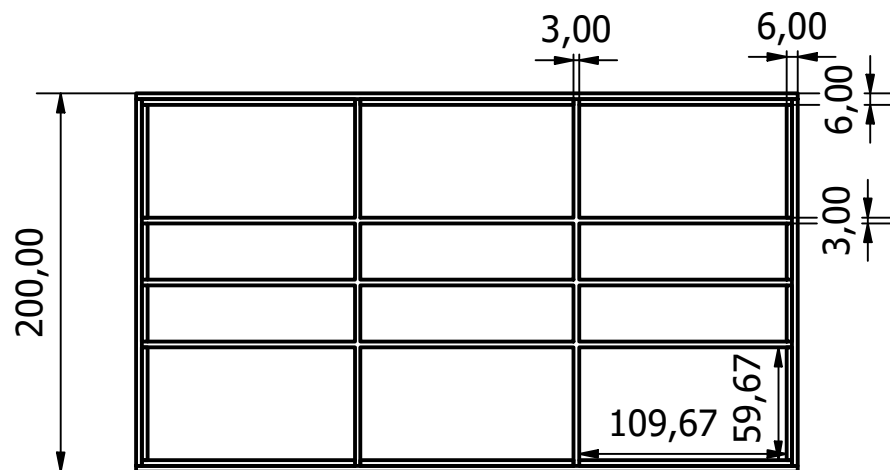
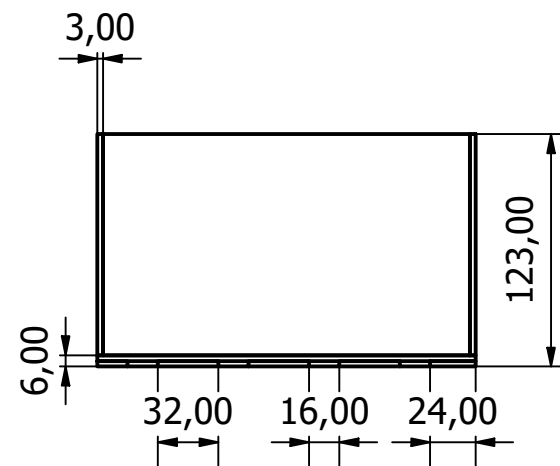
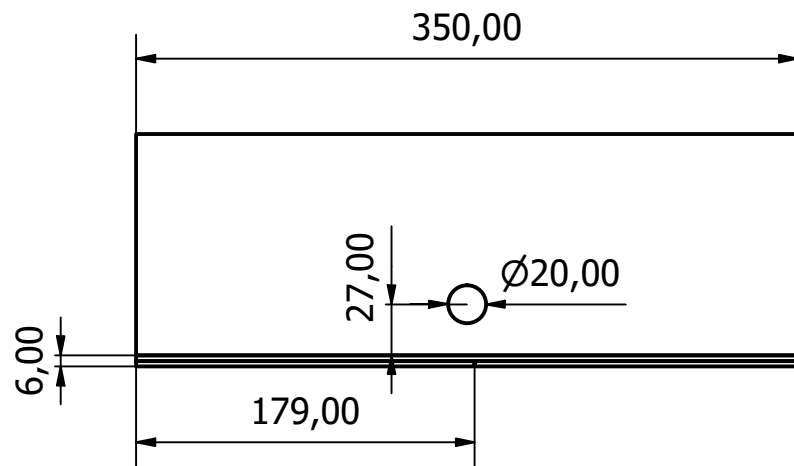
- 1) N_surcos transversales interior
- 2) N_surcos costrados (5)
- 3) N_mamparo transversal
- 4) N_refuerzo de mamparo transversal (6)
- 5) N_fondo estanco con surcos exterior (3)
- 6) N_surcos transversales exterior (4)
- 7) N_fondo estanco con surcos interior (6)

Sheet name : Sheet.1 Efficiency : 16.80%
Material : ABS Plastic - 3mm Packaging cost : 1.00
Packaging : Packaging.2 Total cost : 1.00
Sheet quantity : 1 Total nested cost : 0.28
Stack size : 1 Date : 2/10/26

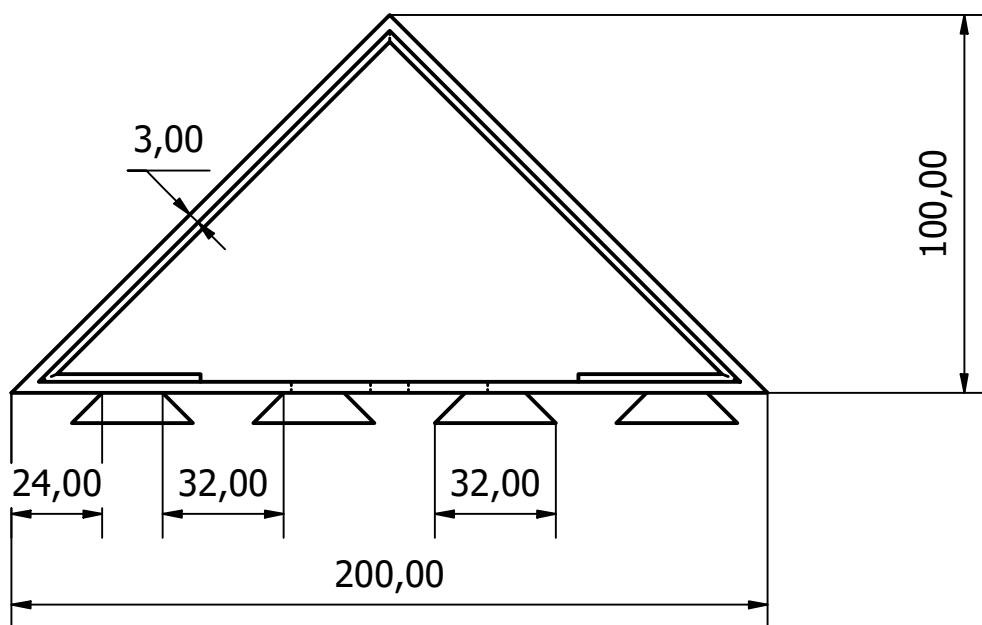
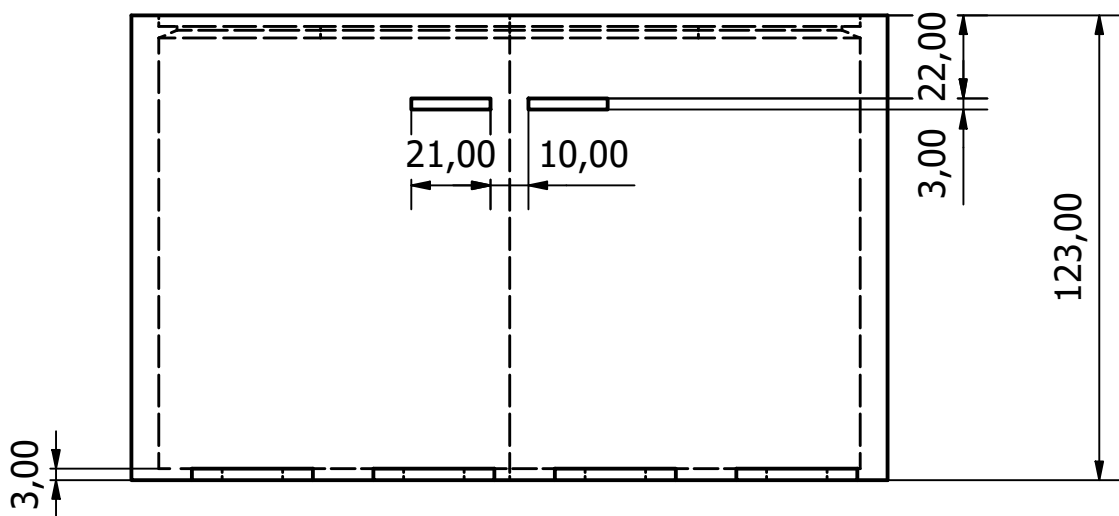


- 1) N_TriánguloHorizontal
- 2) N_TriánguloVertical

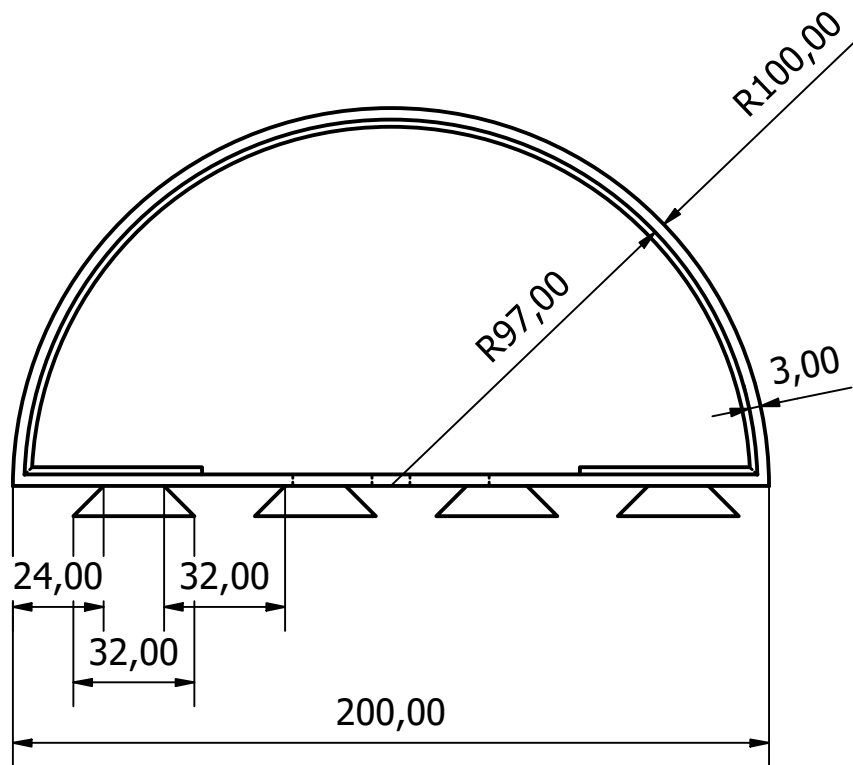
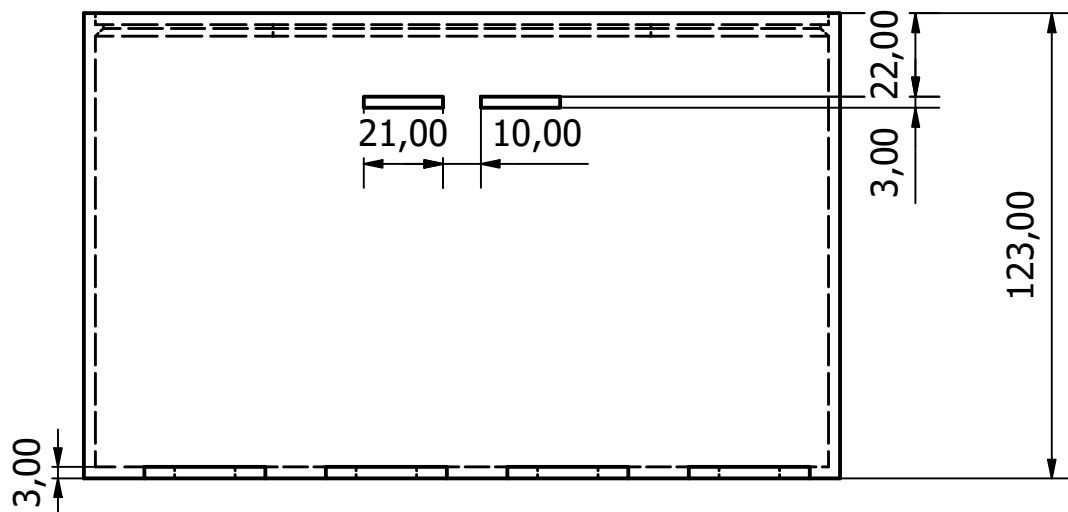
ANEXO IV: DISPOSICIÓN GENERAL Y DETALLES



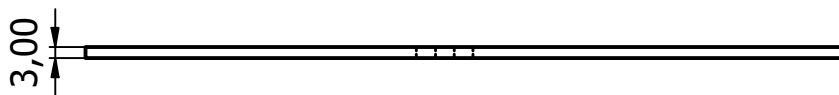
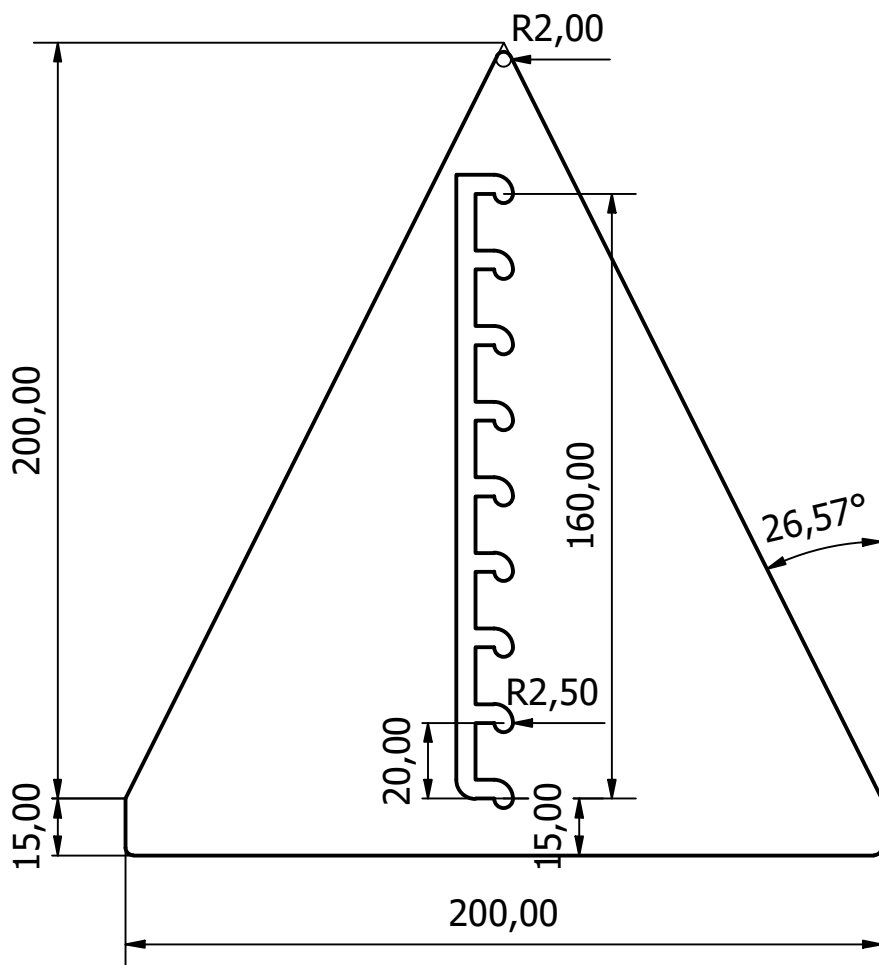
Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 1 : 4	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Cuerpo Principal		
			Edition	Sheet 1



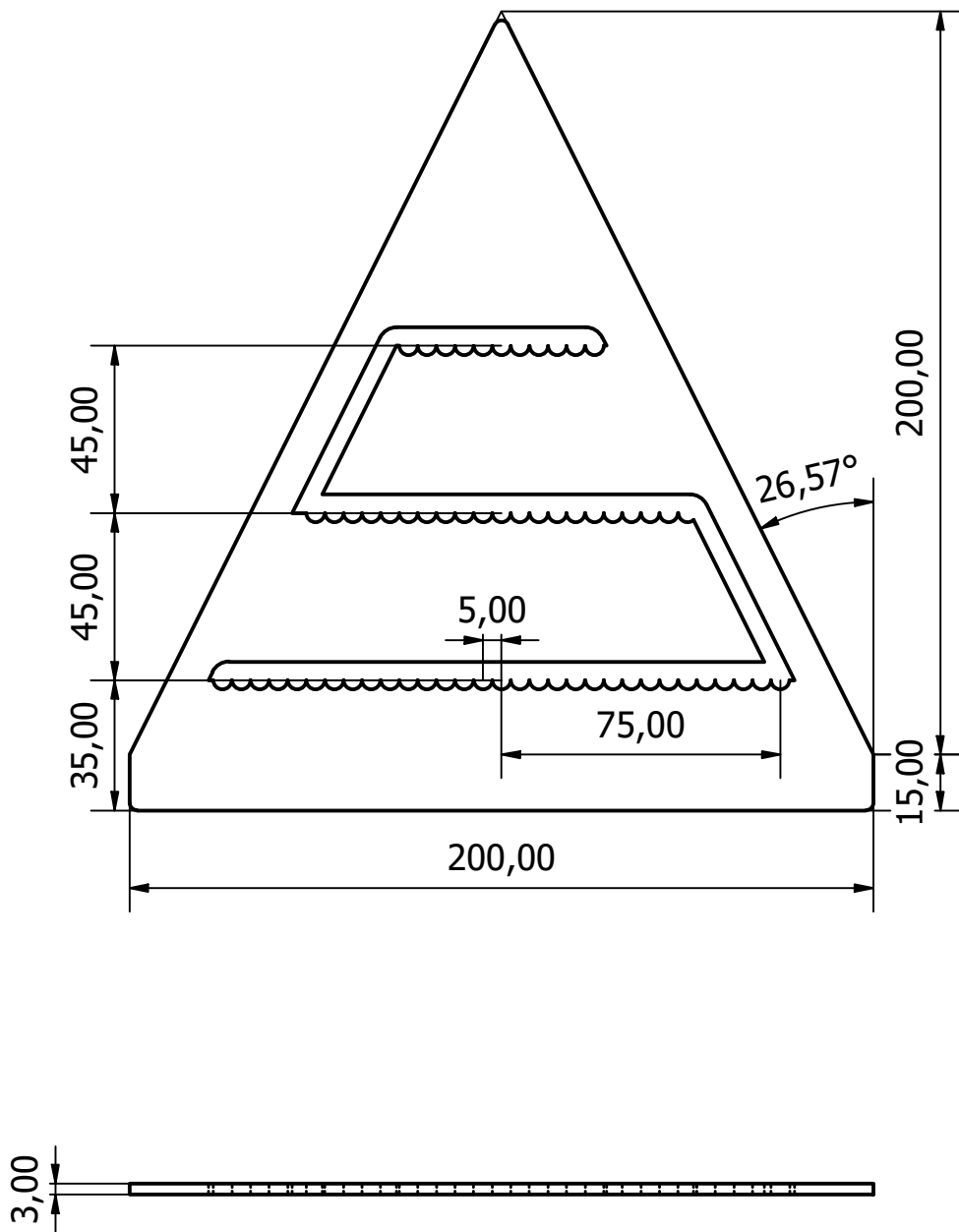
Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date	Date 05/03/2026	
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		CascoTriangular		
			Edition	Sheet 2



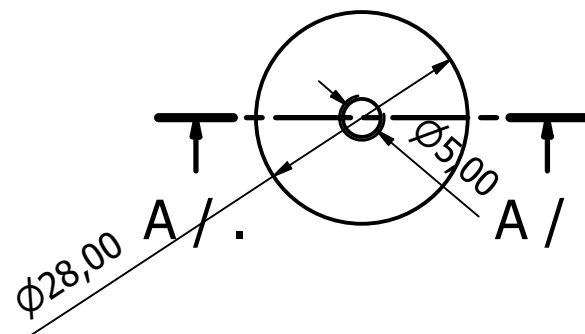
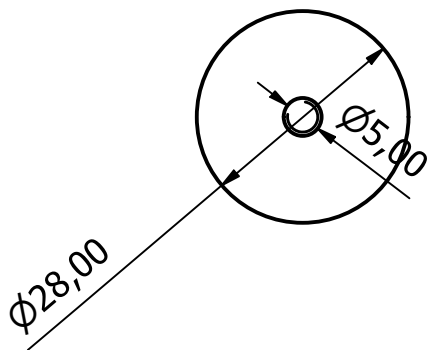
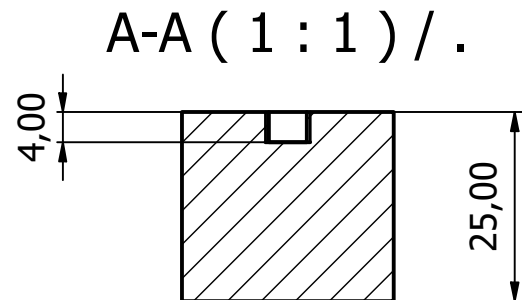
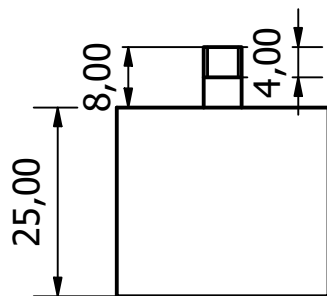
Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 1 : 2	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Casco circular		
			Edition	Sheet 3



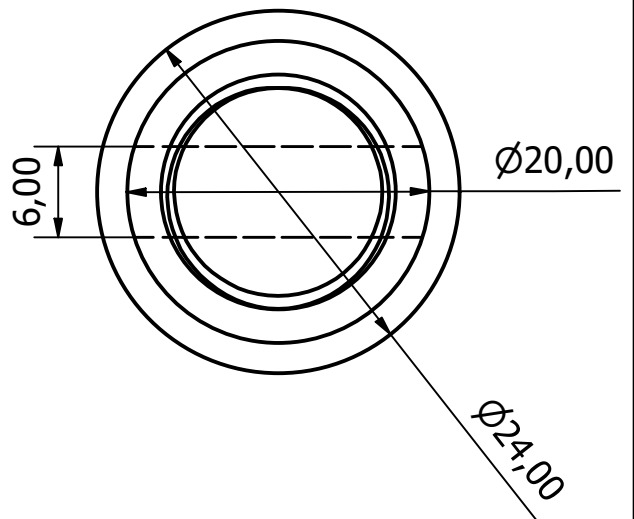
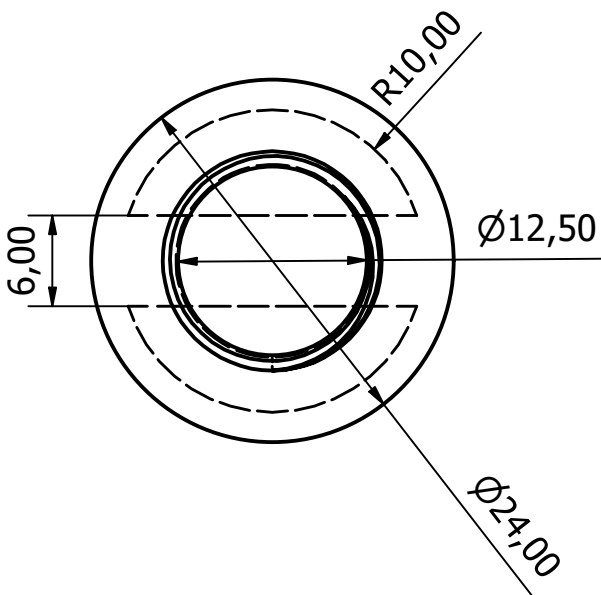
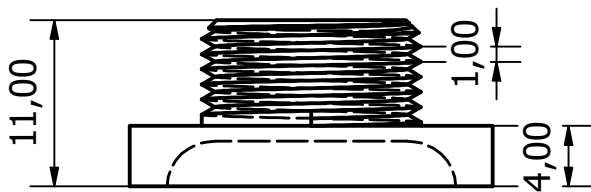
Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 1 : 2	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Triángulo vertical		
			Edition	Sheet 4



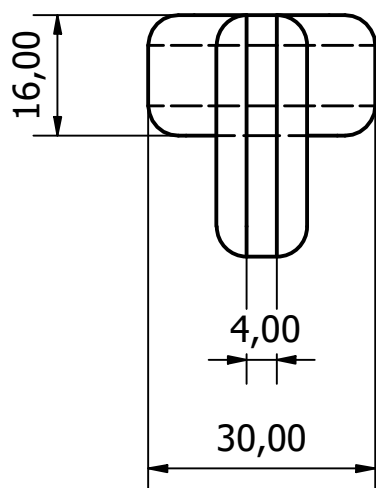
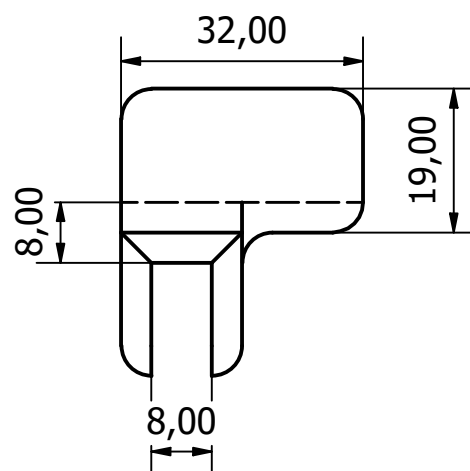
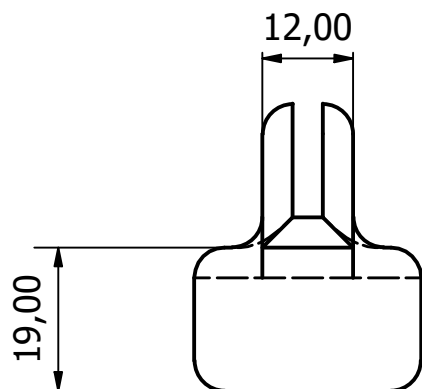
Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 1 : 2	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Triángulo horizontal		
			Edition	Sheet 5



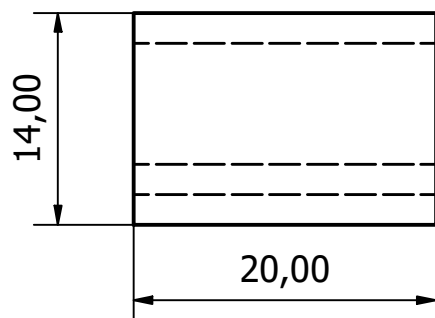
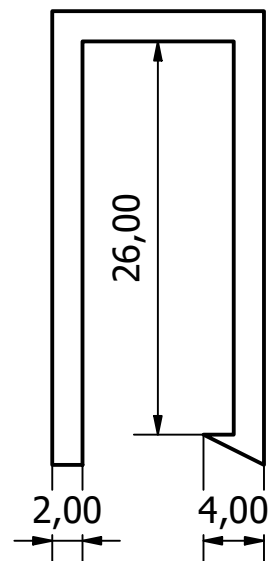
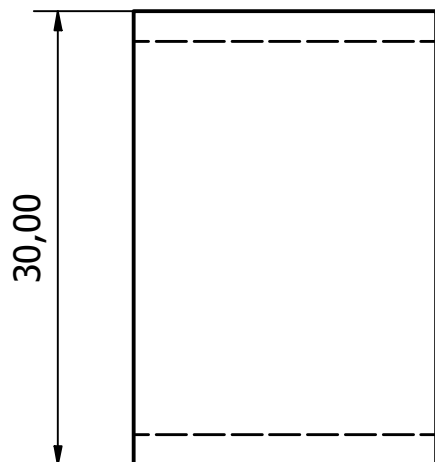
Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 1 : 1	Date 04/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Masa cilíndrica		
			Edition	Sheet 6



Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 2 : 1	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Rosca obturadora		
			Edition	Sheet 7



Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 1 : 1	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Soporte de triángulo		
			Edition	Sheet 8



Designed by JAVIER MESTRE MORA	Approved by	Date 2 : 1	Date 05/03/2026	A4
Diseño y construcción de una gabarra didáctica para el estudio de estabilidad transversal y efectos de superficies libres.		Pinza de casco		
			Edition	Sheet 9

ANEXO V: PRESUPUESTO

MATERIALES	Precio/Ud.		Unidades empleadas	Total
Planchas de metacrilato 500x500 mm	13,95 €		3	41,85 €
Planchas de metacrilato 400x400 mm	8,93 €		1	8,93 €
Bobina PLA 1 Kg	22,99 €		0,8	17,89 €
Adhesivo Instantáneo	24,32 €		1	24,32 €
Adhesivo para metacrilato	19,95 €		1	19,95 €
Pintura	3,09 €		1	3,09 €
Cilindro de acero	1,76 €		0,4	0,62 €
Tornillos (pax.)	2,39 €		1	2,39 €
				119,03 €
MAQUINARIA	Precio	Amortización	Horas empleadas	Total
Cortadora	7.500 €	1,50 €	0,3	0,50 €
Impresora 3D	575,00 €	0,12 €	17	1,96 €
Torno	1.999,99 €	0,27 €	2	0,54 €
Útiles de trabajo	17,29 €	0,05 €	1	0,05 €
				3,05 €
MANO DE OBRA	Precio/h		Horas empleadas	Total
Cortado láser	50,00 €		0,7	33,33 €
Impresión 3D	50,00 €		0,4	17,50 €
Torneado	50,00 €		1	50,00 €
Montaje	50,00 €		2	100,00 €
				200,83 €
			Coste/Ud.	322,91 €

ANEXO VI: OBTENCIÓN DE GRÁFICAS

MODELO 1		Casco Triangular						
Manga B	20,0000		θ (°)	θ (rad)	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$\tan\theta$	
Calado T	2,8000		0	0	0	1	0	
KG	5,8500		5	0,08726646	0,08715574	0,9961947	0,08748866	
Masa	2,5303		10	0,17453293	0,17364818	0,98480775	0,17632698	
GM	4,2600		15	0,26179939	0,25881905	0,96592583	0,26794919	
BM	8,7100		20	0,34906585	0,34202014	0,93969262	0,36397023	
GG1	1,53		25	0,43633231	0,42261826	0,90630779	0,46630766	
GG2	0,29		30	0,52359878		0,5	0,8660254	0,57735027
			35	0,61086524	0,57357644	0,81915204	0,70020754	
			40	0,6981317	0,64278761	0,76604444	0,83909963	
			45	0,78539816	0,70710678	0,70710678	1	
			50	0,87266463	0,76604444	0,64278761	1,19175359	
			55	0,95993109	0,81915204	0,57357644	1,42814801	
			60	1,04719755	0,8660254		0,5	1,73205081
			65	1,13446401	0,90630779	0,42261826	2,14450692	
			70	1,22173048	0,93969262	0,34202014	2,74747742	
			75	1,30899694	0,96592583	0,25881905	3,73205081	
			80	1,3962634	0,98480775	0,17364818	5,67128182	
			Grandes ángulos	Pequeños ángulos	Desplazamiento vertical		Superficies libres	
yB	KB=T/2	KN=KBsin θ +yBcos θ	GZ=KN-KGsin θ	GZ=KG*sin θ	GZ'=KN-(KG+GG1)sin θ		GZ''=KN-(KG+GG2)sin θ	
0	1,4	0,000	0	0	0,0000		0,0000	
1,031	1,4	1,149	0,639233679	0,509861095	0,5059		0,6140	
2,078	1,4	2,290	1,27369612	1,015841839	1,0080		1,2233	
3,158	1,4	3,413	1,898649009	1,514091414	1,5027		1,8236	
4,068	1,4	4,301	2,300679944	2,000817838	1,7774		2,2015	
4,625	1,4	4,783	2,31102225	2,472316831	1,6644		2,1885	
5,038	1,4	5,063	2,138035984	2,925	1,3730		1,9930	
5,286	1,4	5,133	1,777622564	3,355422153	0,9001		1,6113	
5,525	1,4	5,132	1,371990685	3,760307517	0,3885		1,1856	
5,716	1,4	5,032	0,895197185		-0,1867		0,6901	
5,837	1,4	4,824	0,343053506		-0,8290		0,1209	
5,957	1,4	4,564	-0,228431766		-1,4817		-0,4660	
6,077	1,4	4,251	-0,815313047		-2,1403		-1,0665	
6,199	1,4	3,889	-1,413259048		-2,7999		-1,6761	
6,324	1,4	3,479	-2,018696776		-3,4564		-2,2912	
6,391	1,4	3,006	-2,64425741		-4,1221		-2,9244	
6,456	1,4	2,500	-3,261321866		-4,7681		-3,5469	

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA GABARRA DIDÁCTICA PARA EL ESTUDIO DE
ESTABILIDAD TRANSVERSAL Y EFECTOS DE SUPERFICIES LIBRES

MODELO 2	Casco Circular							
Manga B	20,0000		$\theta (^{\circ})$	$\theta(\text{rad})$	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$\tan\theta$	
Calado T	1,9400		0	0	0	1	0	
KG	6,0100		5	0,08726646	0,08715574	0,9961947	0,08748866	
Masa	2,5713		10	0,17453293	0,17364818	0,98480775	0,17632698	
GM	7,0700		15	0,26179939	0,25881905	0,96592583	0,26794919	
BM	12,1100		20	0,34906585	0,34202014	0,93969262	0,36397023	
GG3	0,7100		25	0,43633231	0,42261826	0,90630779	0,46630766	
			30	0,52359878		0,5	0,8660254	0,57735027
			35	0,61086524	0,57357644	0,81915204	0,70020754	
			40	0,6981317	0,64278761	0,76604444	0,83909963	
			45	0,78539816	0,70710678	0,70710678		1
			50	0,87266463	0,76604444	0,64278761	1,19175359	
			55	0,95993109	0,81915204	0,57357644	1,42814801	
			60	1,04719755	0,8660254		0,5	1,73205081
			65	1,13446401	0,90630779	0,42261826	2,14450692	
			70	1,22173048	0,93969262	0,34202014	2,74747742	
			75	1,30899694	0,96592583	0,25881905	3,73205081	
			80	1,3962634	0,98480775	0,17364818	5,67128182	
			Grandes ángulos		Pequeños ángulos		Desplazamiento horizontal	
yB	KB=T/2	KN=KBsin θ +yBcos θ	GZ=KN-KGsin θ		GZ=KG*sin θ		GZ ^{cor} =GZ-GG3cos θ	
0	0,97	0,000	0		0		-0,71	
1,488	0,97	1,567	1,043072767		0,523806014		0,335774532	
2,999	0,97	3,122	2,078251636		1,043625548		1,379038131	
4,236	0,97	4,343	2,787213813		1,555502461		2,101406476	
4,865	0,97	4,903	2,847823078		2,055541061		2,180641317	
5,235	0,97	5,154	2,614525226		2,539935753		1,971046697	
5,516	0,97	5,262	2,256996127		3,005		1,642118091	
5,723	0,97	5,244	1,79718191		3,447194382		1,215583959	
5,848	0,97	5,103	1,240178351		3,863153534		0,696286796	
5,964	0,97	4,903	0,653366666				0,151320851	
6,073	0,97	4,647	0,04278516				-0,413594043	
6,177	0,97	4,338	-0,585544656				-0,992783926	
6,279	0,97	3,980	-1,225268035				-1,580268035	
6,355	0,97	3,565	-1,882052193				-2,182111159	
6,402	0,97	3,101	-2,546437851				-2,789272153	
6,449	0,97	2,606	-3,199142143				-3,382903665	
6,498	0,97	2,084	-3,835065217				-3,958355423	

MESTRE
MORA
JAVIER -
29621913Y

Firmado
digitalmente por
MESTRE MORA
JAVIER -
29621913Y
Fecha: 2026.03.26
09:08:57 +01'00'