



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño conceptual de un mini-submarino tripulado

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Andrés Hernández Gil

DIRECTORES: Pedro Jesús Carrasco Pena

Carlos Pérez Collazo

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño conceptual de un mini-submarino tripulado

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

Este TFG es un proyecto conceptual de un mini-submarino tripulado para el que, en primer lugar, hemos analizado el estado del arte en la materia y analizado las distintas posibilidades que existen a la hora de definir y construir la estructura de este tipo de vehículos. Los materiales principales en la construcción de vehículos submarinos son el acero, los materiales compuestos y hormigón entre otros. En el caso del hormigón, existen estudios que han demostrado que este tipo de estructuras sumergidas en aguas profundas son viables. Este TFG plantea un proyecto en el cual, tras obtener unas dimensiones principales para un mini-submarino, partiendo de una base de datos de distintos sumergibles, nos ha dado por métodos de regresión las dimensiones finales. Estas dimensiones han sido el punto de partida para el dimensionamiento de la estructura del sumergible evaluando su resistencia y viabilidad para su construcción, al igual que un cálculo económico aproximado. En el caso de los submarinos un elemento fundamental es su casco resistente, por lo que la mayor parte de este estudio está orientado a este. Los resultados han demostrado que el casco de hormigón modular con pretensado longitudinal es viable. Además, la construcción modular permite una fácil reparación y mantenimiento. En general, el uso del hormigón en la construcción de submarinos ofrece una alternativa a los materiales tradicionales.

PALABRAS CLAVE

Proyecto conceptual, vehículos submarinos, materiales estructurales, modelado estructural, elementos finitos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, a mi promoción y el profesorado del CUD por estos maravillosos 5 años. Agradecer especialmente al estudio 217 por ser una fuente de motivación constante durante estos dos últimos años.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
1 Introducción y objetivos	11
1.1 Diseño conceptual de submarino	11
1.2 Motivación	11
1.3 Objetivos	11
1.4 Metodología	12
1.5 Estructura del TFG	12
2 Estado del arte	15
2.1 Breve reseña histórica	15
2.2 Componentes de un submarino	17
2.3 El acero en la construcción de submarinos	18
2.4 Los materiales compuestos	19
2.5 El hormigón estructural	20
2.6 El hormigón en la construcción naval	21
2.7 Submarinos de hormigón	22
3 Desarrollo teórico	27
3.1 Análisis estadístico para la elección de las dimensiones del submarino	27
3.2 Pandeo de estructuras cilíndricas sometidas a presión hidrostática	28
3.3 Factores de seguridad	39
3.4 Influencia de la profundidad operativa en el espesor de un casco de hormigón	39
3.5 Estudio de flotabilidad	42
3.5.1 Flotabilidad neutra	42
3.5.2 Flotabilidad positiva	43
3.6 Espesor del casco a partir de condiciones de flotabilidad	45
3.7 Estudio mediante elementos finitos	47
4 Modelo de construcción	53
4.1 Tubos de hormigón armado	53
4.2 Postesado externo no adherente	57
4.3 Propuesta de construcción	57
4.4 Flotabilidad negativa	60
4.5 Detalles de armado	61

4.5.1	Armado frente a momentos flectores	63
4.5.2	Armado frente a cortante	63
4.6	Sobre instalaciones.....	64
5	Conclusión y líneas futuras	65
6	Bibliografía.....	67
Anexo I: Implicaciones económicas.....		71
Anexo II: Implicaciones medioambientales y sociales		73
Anexo III: Cálculo armado momentos flectores		75
Anexo IV: Planos y vistas del diseño del submarino		77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Primer submarino tripulado. [2]	15
Figura 2-2 - Sumergible BEAVER IV.	16
Figura 2-3 - Sumergible BEN FRANKLIN (PX-15). Adaptado de [2].	17
Figura 2-4 – Disposición estándar de un submarino nuclear. Extraída de [5]	18
Figura 2-5 - El Orca 300.....	20
Figura 2-6 - SS Faith [19].....	21
Figura 2-7 - Detalle de armadura del casco de un buque de hormigón [19].	22
Figura 2-8 - Submarino de hormigón [23]	24
Figura 2-9 - Dibujo del NAUTILUS [24]	24
Figura 3-1 - Base de datos de submarinos.....	27
Figura 3-2 - Gráficos Diámetro-Eslora y Tripulación-Eslora con líneas de regresión.....	28
Figura 3-3 - Pandeo de cilindros. Adaptada de [14].....	29
Figura 3-4 - Variación de la curvatura durante la flexión de una sección circular según [28]	30
Figura 3-5 - Primeros modos de pandeo de una sección circular según [14] (para: $R=1$, $C2=R/10$, $EI=10$, $uA=0.1$ y $MA=1$)	32
Figura 3-6 - Ratio Lcr/D en función de D/t para $v=0.2$	33
Figura 3-7 - Evolución de la presión de pandeo para $f_{ck}=45$ MPa.....	34
Figura 3-8 - Comparativa módulo de elasticidad del hormigón.....	35
Figura 3-9 - Diagrama de flujo. Metodología propuesta por Haynes [12]	38
Figura 3-10 - Geometría estudiada	39
Figura 3-11 - Relación espesor de tubo y profundidad operativa para distintos diámetros del cilindro sumergido según la metodología de Haynes [12].	40
Figura 3-12 - Esquema simple. Estado tensional en la sección transversal de un cilindro sumergido	40
Figura 3-13 - Relación espesor de pared y máxima profundidad operativa para distintos diámetros del cilindro sumergido según el modelo mecánico de la Figura 3-13 (ecuación (36)) y a partir de la ecuación (37).....	41
Figura 3-14 - Flotabilidad a) neutra, b) positiva	43
Figura 3-15 - Estudio de flotabilidad a) neutra, b) positiva para el sumergible de 4.5 m de diámetro medio.....	44
Figura 3-16 - Estudio de flotabilidad a) neutra, b) activa para el sumergible de 6 m de diámetro medio.....	45
Figura 3-17 - Predimensionamiento del casco de hormigón a partir de condiciones de flotabilidad	46
Figura 3-18 - Modelo numérico del casco de hormigón	47
Figura 3-19 - Modelo numérico del casco de hormigón sometido a una presión hidrostática unitaria	47

Figura 3-20 - Cuatro primeros modos de pandeo	49
Figura 3-21 - Diagrama no lineal del hormigón propuesto por el EC2 [18]	50
Figura 3-22 - Curva tensión-deformación no lineal del material (tensiones en N/m ²) definida en el modelo numérico.....	50
Figura 3-23 - Tensión principal de compresión (en N/m ²) para los casos: a) D=4.5 m y t=0.35 m y b) D=6 m y t= 0.46 m.....	51
Figura 4-1 - a) Apoyos inferior y superior para el ensayo de aplastamiento. b) Tipos de disposiciones para el ensayo de aplastamiento de tubos circulares. Adaptada de [21].	54
Figura 4-2 - Ficha técnica de un tubo de hormigón armado comercializado por Prefabricados Alberdi [38]	55
Figura 4-3 - Tubo machiembreado de hormigón armado. Adaptado de [38]	55
Figura 4-4 - Junta elástica de estanqueidad para tubo de hormigón comercializada por Algaher [39]	56
Figura 4-5 - Detalle de placa de anclaje en elemento postesado	57
Figura 4-6 - Barra roscada tipo DYWIDAG y esquema de fijación [26]	58
Figura 4-7 - Construcción propuesta y esquema del ensamblaje de los módulos mediante barras roscadas postesadas.....	59
Figura 4-8 - Detalles constructivos de la estructura propuesta. Adaptada de [41].....	60
Figura 4-9 - Características técnicas de las barras DYWIDAG soldables [40], con los valores de carga en MPa.....	60
Figura 4-10 - Flotabilidad negativa. Lastrado para flotabilidad.....	61
Figura 4-11 - Esquema estructural del submarino y un esquema donde se muestra cómo se sumerge y emerge	61
Figura 4-12 - Elemento Shell 181 [34].....	62
Figura 4-13 - Esfuerzos en la rebanada	63
Figura 4-14 - Diseño del submarino estudiado de 6m de diámetro.....	64
Figura A-1 - Estudio de costes para a) D=4.5 m y b) D=6m	72
Figura A-2 - Planta y perfil del submarino diseñado	77
Figura A-3 – Sección trasversal del submarino diseñado diseño	78
Figura A-4 - Módulo 1 del submarino diseñado (cierre estructural de Pr.)	78
Figura A-5 - Módulo 2 submarino diseñado	79
Figura A-6 - Módulo 3 submarino diseñado	79
Figura A-7 - Módulo 4 submarino diseñado	80
Figura A-8 – Módulo 5 submarino diseñado (cierre estructural de popa)	80
Figura A-9 - Submarino diseñado con los módulos unidos	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 - Casos estudiados para $H=152$ m y $f_{ck}=45$ Mpa	41
Tabla 3-2 - Resumen de los valores de las tensiones para el caso estudiado	42
Tabla 3-3 - Resultados del estudio de flotabilidad neutra y activa.....	44
Tabla 3-4 - Tensiones críticas de pandeo de los dos cascos de hormigón estudiados.....	48

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los submarinos son medios navales muy útiles tanto para objetivos civiles como militares. La mayoría de los cascos de los submarinos consisten en una lámina de acero suficientemente rigidizada, dada la inestabilidad de la estructura metálica sometida a compresiones hidrostáticas. Un buen ejemplo es el S-81, bautizado como 'Isaac Peral', que ha sido diseñado y construido en su totalidad en España (Navantia) o los submarinos no tripulados del tamaño de un autobús urbano (2.2 m de diámetro y 12 m de eslora), de los que en breve dispondrá la Marina Real Británica (Proyecto CETUS).

1.1 Diseño conceptual de submarino

El diseño conceptual de un submarino (o buque) es la primera fase en la creación de un submarino [1]. Se centra en establecer los principales parámetros de diseño, como su tamaño, forma y características principales. En esta etapa es donde se establecen los requisitos de rendimiento del barco y donde se definen las especificaciones para llevar a cabo su construcción. Este proyecto consta de varias fases:

1. El primer paso consiste en la identificación de las necesidades del cliente o usuario final del barco. A partir de este punto, el diseñador realiza un análisis detallado de las condiciones de operación del barco.
2. En segundo lugar, se desarrolla un modelo inicial de la plataforma usando software de diseño asistido por ordenador, para así poder visualizar el diseño en tres dimensiones.
3. El proceso de diseño conceptual también implica la selección de los principales sistemas y equipos del barco, como el motor, el sistema de propulsión, los generadores de energía y los equipos de seguridad.
4. Una vez completado el diseño, se elabora un informe detallado que describe las especificaciones técnicas del barco y las condiciones de operación para las que ha sido diseñado.

El diseño conceptual de un submarino es una etapa crítica en el proceso de diseño, ya que establece las bases para la elaboración de los diseños detallados y la construcción de un submarino [1].

1.2 Motivación

Este TFG busca proponer una plataforma submarina de reducidas dimensiones. Se centrará en el análisis de posibles materiales que podamos emplear en el diseño del casco resistente ya que este elemento es el implicado en la supervivencia de la plataforma submarina. Si bien el acero es un material muy versátil y el más empleado en la construcción de submarinos y que ha dado muy buenos resultados en su construcción, existen otras posibilidades como los materiales compuestos o armados.

1.3 Objetivos

El principal objetivo de este TFG es el estudio de la viabilidad de diseñar estructuras de submarinos. Este objetivo general se desglosa en una serie de subobjetivos que se describen a continuación:

- Realizar una amplia búsqueda bibliográfica: Este objetivo implica buscar y recopilar información relevante sobre el diseño de estructuras submarinas. Esto incluye libros, artículos científicos y otra literatura relacionada. Esta búsqueda nos permitirá comprender aspectos fundamentales del diseño estructural de submarinos y los materiales que se utilizan comúnmente.

- Explorar los materiales de construcción y seleccionar aquel que vayamos a usar para nuestro diseño: Aquí se debe identificar los materiales disponibles para la construcción y evaluar sus propiedades, ventajas y desventajas. La elección del material dependerá de una serie de factores como la resistencia, la durabilidad y el costo.
- Obtener una metodología genérica para el diseño de la estructura que sea extrapolable a cualesquiera dimensiones de la nave: En este último subobjetivo debemos desarrollar una metodología de diseño estructural que pueda ser aplicada a submarinos de distintas dimensiones. Esta metodología debe de ser capaz de garantizar que la estructura cumpla con los estándares de seguridad y resistencia necesarios para soportar su uso previsto.

1.4 Metodología

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG), nuestro primer objetivo es realizar una investigación exhaustiva sobre los diferentes materiales utilizados en la construcción naval para poder seleccionar el más adecuado para nuestro submarino. Para ello, utilizaremos fuentes bibliográficas relevantes.

Una vez hayamos seleccionado el material, emplearemos técnicas de regresión lineal para determinar las dimensiones óptimas del submarino. Nos aseguraremos de que estas dimensiones sean coherentes y estén próximas a las estimaciones proporcionadas por los datos estadísticos.

Seguidamente, llevaremos a cabo una amplia búsqueda bibliográfica para evaluar los diferentes métodos experimentales existentes para el diseño de submarinos. Consideraremos métodos empíricos, así como estudios de pandeo de placas y condiciones de flotabilidad para predimensionar las estructuras de nuestro submarino. Además, debido a la importancia de considerar las imperfecciones en la geometría de la estructura, realizaremos un modelo numérico mediante Elementos Finitos.

En este trabajo se presentará una metodología genérica para el diseño de submarinos, adaptable a cualquier dimensión de la nave. Sin embargo, con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se adoptará una geometría concreta y se analizarán en detalle dos diámetros de casco.

Por último, teniendo en cuenta todos los datos previamente calculados, realizaremos un diseño final a modo de prototipo del submarino, aunque no sea el objetivo de este TFG. Este diseño se basará en los resultados obtenidos a través de las diferentes técnicas y métodos empleados durante la investigación, y se ajustará a las especificaciones y objetivos propuestos en este TFG.

1.5 Estructura del TFG

Este TFG está estructurado en cinco capítulos:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. En este primer capítulo se expone el contexto en el que se desarrolla el trabajo. Se definirá lo que es un proyecto conceptual de submarino. Indicando la motivación para haber propuesto este trabajo y los objetivos que se pretenden alcanzar en él.
- Capítulo 2: Estado del arte. En esta sección del trabajo se da una breve reseña histórica de los submarinos y se habla de los materiales más comunes para su construcción.
- Capítulo 3: Desarrollo. En este tercer capítulo se explican detalladamente todos los parámetros a tener en cuenta en la construcción del submarino. Se irán estableciendo las limitaciones debidas al pandeo, al límite elástico del material y a la flotabilidad.
- Capítulo 4: Modelo de construcción. En este cuarto capítulo se propondrá la construcción de un modelo de un submarino, así como los componentes necesarios para su construcción.

- Capítulo 5: Conclusión y líneas futuras. En este último capítulo veremos el impacto medioambiental que tendría nuestro prototipo y sus repercusiones económicas. Se dará también una conclusión final y posibles líneas futuras de investigación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Breve reseña histórica

La búsqueda del hombre para lograr la movilidad bajo la superficie del mar y a profundidades cada vez mayores ha llevado al diseño y construcción de sumergibles con fines tanto científicos como militares.

Aunque no documentados, existen registros que indican que ya Alejandro Magno desarrolló un sumergible rudimentario que consistía en una caja de madera con ventanas con un tratamiento a base de resina y cera para mantener la estanqueidad del artefacto. Mucho tiempo después, Leonardo da Vinci (1452-1519) afirmó haber desarrollado un sumergible, pero, al contrario de lo que hizo con sus otros inventos, nunca dio detalle alguno sobre él. El siguiente submarino documentado se debe al inglés Cornelius Drebbel, quien en 1620 diseñó, para operar bajo el Támesis por encargo del rey Jacobo I, un bote cerrado con un trozo de cuero engrasado manejado con remos desde dentro y con capacidad para doce hombres (Figura 2-1).



Figura 2-1 - Primer submarino tripulado. [2]

En 1765, Robert Fulton (Lancaster, Pensilvania) desarrolló para el gobierno francés el Nautilus, un sumergible para doce hombres accionado por manivelas que fue presentado en Brest (Francia) en 1802.

En las últimas décadas se han desarrollado gran cantidad de sumergibles autopropulsados. En la mayoría de los casos su uso ha sido como apoyo a la flota pesquera o para labores de investigación oceanográfica. La totalidad de ellos tienen el casco de acero con algunas excepciones que han empleado materiales para el casco tales como: acero de ultra alta resistencia (SHINKAI 2000), titanio (ALVÍN: construido por Litton Systems, Inc. en 1964 para la Oficina de Investigación Naval y el Instituto Oceanográfico Woods Hole), pyroceram de alta resistencia (BENTOS. Desarrollado en 1967 en la Universidad Estatal de Pensilvania y fabricado en Coming Glass Works), aluminio (ALUMINAUTA: construido por Reynolds Metals International en 1964, ENLACE DEL MAR DE JOHNSON: construido en 1969 por Link Division de Singer Compañía con Alcoa), acero inoxidable/fibra de vidrio (GEMINIS: construido en 1989 por Hyco Technologies, Vancouver, B.C., Canadá), materiales compuestos (MARIO: vehículo de la Unión Europea, alimentado por batería y programado para estar operativo a finales de 1994) o plástico acrílico (KUMUKAHI: primer sumergible de casco transparente, construido en 1969 por el Instituto Oceánico, Hawái, NEMO MOD 2000: 1975).

En la Figura 2-2 se puede ver el BEAVER IV, adaptada de [3], construido en 1969 por North American Rockwell Corp.



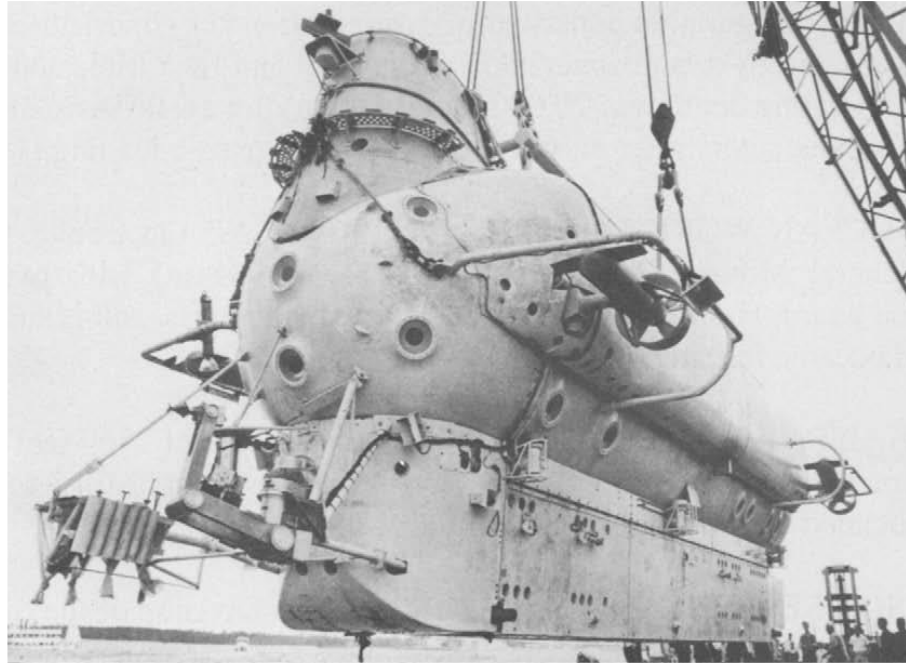
Figura 2-2 - Sumergible BEAVER IV.

La configuración del casco de los sumergibles se elige en base a requisitos estructurales, optimización de espacio y eficiencia hidrodinámica. En general, la relación radio/espesor de la chapa es mucho menor que en el caso de las aplicaciones aeroespaciales, es decir, las chapas del casco de los sumergibles son menos esbeltas que las de los vehículos aeroespaciales. Sin embargo, como la relación radio/espesor suele ser menor que 50, las chapas del casco de los sumergibles se pueden considerar suficientemente delgadas como para considerar válida la teoría de placas y láminas delgadas, ampliamente aplicada en distintas áreas de la ingeniería.

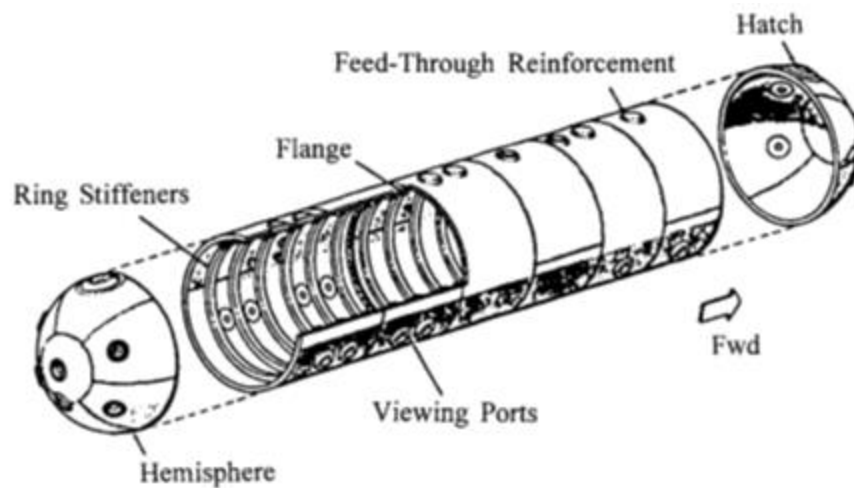
Existen dos particularidades en el diseño de cascos de sumergibles que los diferencian de otros elementos estructurales [4]:

- i) la existencia de imperfecciones geométricas iniciales (i.e. desviaciones de una forma geométrica perfecta, p.e. un cilindro), que pueden inducir flexiones localizadas indeseables en la estructura del casco cuando éste se comprime debido a la acción de la presión hidrostática.
- ii) la existencia de tensiones residuales asociadas a la curvatura de las láminas metálicas que dan forma al casco. Estas tensiones han de sumarse a las inducidas por la carga de presión y, por tanto, este efecto combinado puede provocar la plastificación prematura de la placa.

La mayoría de los sumergibles tienen cascos de acero de configuración aparentemente simple que consiste en un caparazón rigidizado en anillo. Desde el punto de vista estructural, estos elementos de rigidización de las secciones transversales proporcionan una resistencia adicional frente al pandeo de la placa comprimida. En la Figura 2-3b se aprecia el detalle estructural del sumergible BEN FRANKLIN (PX-15) (construido bajo la supervisión de Grumman Aircraft in Monthey, Suiza junto con Jacques Piccard y la U.S. Navy en 1969).



a)



b)

Figura 2-3 - Sumergible BEN FRANKLIN (PX-15). Adaptado de [2].

La diferencia entre submarinos y sumergibles es sutil. El sumergible es el predecesor del submarino y su utilidad principal es para observación. Por el contrario, el submarino se concibe para navegar principalmente bajo el nivel del mar, sea con fines científicos o militares.

2.2 Componentes de un submarino

Los principales componentes de un submarino son [5]:

- **Hélices**, con diferente número de palas y de ejes y cuyo tamaño varía dependiendo de si el submarino es nuclear o convencional.
- **Casco resistente**, ubicado en la parte interior tiene como misión resistir la presión de agua una vez sumergido. En general suele ser un cilindro de acero rigidizado (Figura 2-3b) y compartimentado para alojar los camarotes, comedor, zona de comando, etc. Este casco ha de

ser capaz de mantener el oxígeno y la presión necesaria para que los tripulantes puedan sobrevivir debajo del agua.

- **Casco hidrodinámico**, ubicado en la parte exterior del submarino, tiene la forma hidrodinámica adecuada para que el submarino se pueda desplazar velozmente en el agua.
- **Tanques de inmersión**, normalmente dispuestos a ambos lados del casco, son contenedores que se inundan para lastrar el submarino y permitirle descender en el agua. La cantidad de agua que contienen los tanques es la adecuada para permitir a la nave subir, bajar o navegar entre dos aguas.
- **Timón**, que permite maniobrar la nave.
- **Periscopio**, tubo que permite a la tripulación poder observar la superficie del mar sin tener que emerger al submarino. Los submarinos modernos han reemplazado el sistema óptico de los periscopios por una pantalla de televisión y por una cámara.

En la Figura 2-4 podemos ver una disposición estándar de un submarino de guerra.

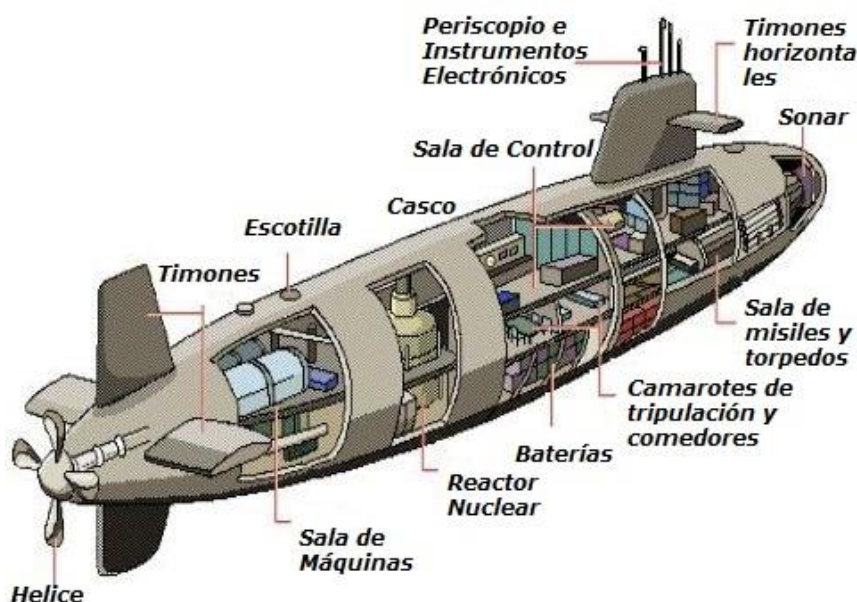


Figura 2-4 – Disposición estándar de un submarino nuclear. Extraída de [5]

2.3 El acero en la construcción de submarinos

El material más común utilizado para construir los cascos de submarinos es el acero. El acero tiene la capacidad de resistir la corrosión y es lo suficientemente ligero como para permitir maniobras rápidas y efectivas bajo el agua. En particular, el acero al carbono es muy resistente y duradero, tiene un costo asumible y un proceso tecnológico muy desarrollado. Permite el laminado en frío o en caliente para la producción de planchas entre otros procesos de conformado, y su unión con remaches o soldadura se puede ejecutar en buenas condiciones. Todo lo anterior lo hace ideal para la construcción de submarinos [6].

La principal desventaja del acero era su baja resistencia a la corrosión, problema que se resolvió mediante pinturas anticorrosivas y antiincrustantes.

Para los cascos submarinos y los buques, se emplean aceros de alta resistencia, soldables (bajo contenido de carbono) y de buena trabajabilidad. Los grados de acero utilizados para la construcción submarina son: NQ1, HY80, HY100, HSLA 80 y 80 HLES. Recientemente se ha desarrollado un nuevo grado de acero soldable sin precalentamiento (550 SSP) [7]. La corrosión sigue siendo un problema,

aunque cada vez menor gracias al galvanizado en frío, el revestimiento con compuestos bituminosos o plásticos, las excelentes pinturas antioxidantes actuales y la protección catódica pasiva —con abundantes ánodos de cinc— o activa —aplicando una microcorriente al casco—[8].

El acero ha sido el material empleado por excelencia para la construcción de cascos tanto de buques como de submarinos durante un siglo. Sin embargo, existen otros materiales que a veces se han utilizado en la construcción de submarinos, tales como el titanio y el aluminio. Las aleaciones de aluminio se usan casi exclusivamente para embarcaciones de alta velocidad, en las cuales la reducción del peso del casco es primordial. El titanio es más resistente que el acero, más ligero y no magnético (lo que es importante para el camuflaje) y se ha usado en submarinos militares, principalmente rusos, y en la construcción de submarinos de alta profundidad. Los cascos de titanio mostraron tener unas muy altas cualidades, pero su producción en serie no se lleva a cabo debido al alto costo, la necesidad de construir talleres especiales y a que requieren de un proceso de construcción largo [8].

El uso al que se vaya a destinar la nave condiciona el tipo de material del que está hecho. Así, mientras que el acero es el material principal utilizado para construir submarinos nucleares. El aluminio, al ser más ligero que el acero, presenta ventajas en algunos tipos de submarinos [6].

Los submarinos que la Armada mantiene operativos en la actualidad son de acero y los que lo estarán en un futuro inmediato también. Los S-80 tienen casco de acero.

2.4 Los materiales compuestos

Los materiales compuestos se consideraron originalmente como una solución ideal alternativa al acero para los cascos de submarinos dado su carácter anticorrosivo [9]. Las principales ventajas de los materiales compuestos son: poco peso, alta resistencia y rigidez, transparencia acústica, amortiguamiento, aislamiento térmico e inmunidad frente a los campos eléctricos y magnéticos.

A principios de la década de 1960, la marina americana estaba decidida a tomar la iniciativa en el desarrollo de materiales compuestos en estructuras marinas [10]. La Oficina de Investigación y Desarrollo de la Armada de EEUU inició un gran programa de I+D para desarrollar fibra de vidrio (GRP, Glass Reinforced Plastic). Este programa, que duró 10 años y contó con una inversión de alrededor de 6 millones de dólares, supuso un gran desarrollo en la tecnología de materiales compuestos y en su respuesta estructural.

Por primera vez en 1966 [11] se consideró la posibilidad de que fuera viable construir cascos de presión de submarinos con materiales compuestos. Aunque el avance hacia un casco de submarino construido en su totalidad con un material compuesto ha sido lento, existen varios sumergibles pequeños construidos en su totalidad con este tipo de materiales, así como vehículos submarinos no tripulados.

Aunque son muchos los materiales compuestos con aplicaciones navales directas [12], los más habitualmente empleados son los basados en fibras de carbono y de vidrio. La fibra de vidrio (GRP, Glass Reinforced Plastic) se ha utilizado ampliamente en la construcción de buques desde la década de 1960 [13].

Hoy en día, los plásticos reforzados con fibra de vidrio (GRP) y los plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP) se utilizan en la construcción de nuevas naves [14] y también en la reparación de naves en servicio, principalmente en las áreas concretas en las que se requiere una transparencia excepcional [9].

Como ya se ha comentado, estudios recientes indican que el uso de materiales compuestos en cascos presurizados podría tener ventajas frente al acero. De hecho, un estudio recientemente [15] profundiza sobre la aplicación de materiales compuestos con fibras en la construcción naval, tanto barcos como submarinos.

Los materiales compuestos se han empleado en la construcción de cascos de submarinos de pocos metros de eslora. Un buen ejemplo de este tipo de naves es el submarino de inspección no tripulado Orca 300, [15], Figura 2-5.

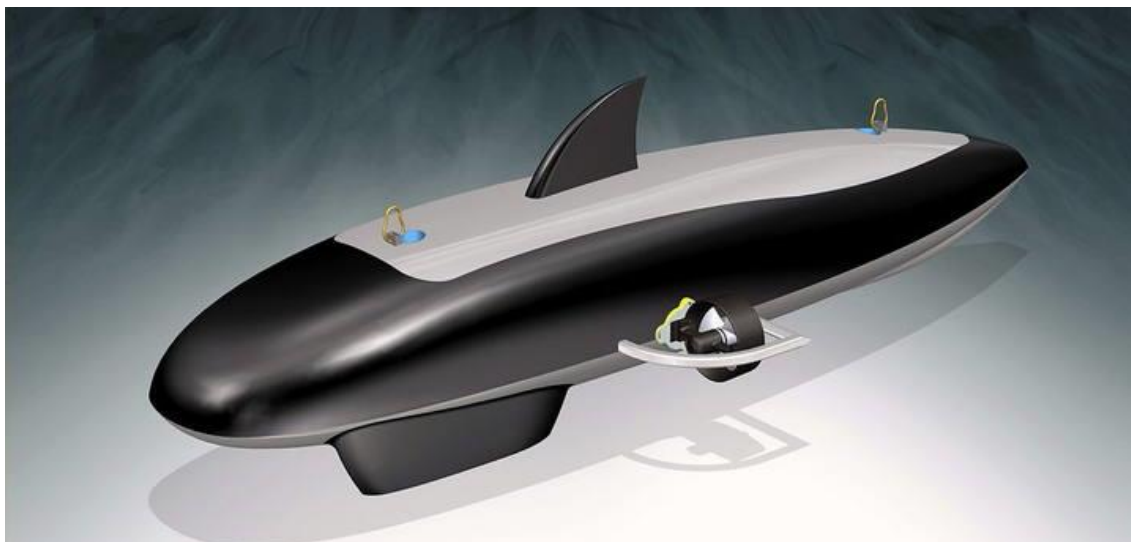


Figura 2-5 - El Orca 300

Sin embargo, pese a que las pruebas realizadas en cascos a escala fabricados con materiales compuestos han demostrado su efectividad para profundidades operativas de 3 a 4 veces mayores que las de los cascos de acero, el uso de materiales compuestos en cascos de submarinos plantea serios problemas tales como: costos de construcción extremadamente altos, baja resistencia al corte entre las láminas que forman la sección del material compuesto (generalmente de tipo sándwich), susceptibilidad al fallo por fatiga bajo compresión y malas propiedades de resistencia al fuego. Debido a tales deficiencias, es poco probable que los materiales compuestos se utilicen alguna vez para la construcción de cascos en grandes cascos de submarinos [15].

2.5 El hormigón estructural

El hormigón es una mezcla de cemento, agua y áridos como componentes principales. Para mejorar algunas de sus propiedades, a veces se le añaden adiciones (hasta un 35% del peso de cemento) y aditivos (<5% del peso de cemento).

La principal característica mecánica de un hormigón es su resistencia a compresión (f_{ck}), obtenida a partir del ensayo de rotura en probeta cilíndrica de 15×30 cm de un hormigón de 28 días y curado a 20°C con el 90% de humedad [17]. La resistencia característica del hormigón a compresión f_{ck} se obtiene a partir de un tratamiento estadístico de resultados de ensayos de compresión y está asociada a una probabilidad del 6.94% de que se presenten resistencias a compresiones inferiores.

La resistencia a tracción del hormigón es, por el contrario, muy pequeña y se define como [18]:

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0.3 f_{ck}^{2/3} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.1 f_{ck}^{1/3} & \text{if } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

El módulo de elasticidad del hormigón se obtiene en función de su resistencia característica a compresión a partir de la expresión propuesta en [18]:

$$E_{cm} = 22000 \left(\frac{f_{ck} [\text{MPa}] + 8}{10} \right)^{0.3} [\text{MPa}] \quad (2)$$

En ingeniería civil, para absorber las tracciones que no pueden ser resistidas por el hormigón, se colocan barras de acero. Estas armaduras pueden ser pasivas o activas (pretensadas o postesadas). El

hormigón protege estas armaduras frente a la corrosión y, por tanto, controlar la fisuración en elementos de hormigón es de vital importancia para proteger al acero de la armadura. Por este motivo, las normativas limitan la anchura máxima de fisura en función del ambiente al que esté expuesta la estructura y establecen unos recubrimientos mínimos de hormigón en torno a las barras.

La resistencia a compresión del hormigón considerada en este estudio será la resistencia a compresión uniaxial obtenida en probeta cilíndrica curada al vapor de manera continuada (condición de humedad correspondiente a una estructura que va a estar sumergida y, por tanto, con hormigón completamente saturado).

2.6 El hormigón en la construcción naval

Aunque ya finales del siglo XIX existían barcasas de hormigón empleadas para la navegación interior en algunos países europeos (Alemania, Gran Bretaña, Holanda...), no fue hasta 1896 cuando se construyó el primer barco de hormigón para la navegación marítima: el *Liguria*, de Carlo Gabellini. Esta práctica se hizo común durante el siglo XX y en 1917 en Noruega se botó el primer barco de hormigón destinado a cruzar el océano Atlántico, el *Namsenfjord* de Nicolay Fougner (26 metros de eslora y 400 toneladas). El éxito del barco hizo que ese mismo año el gobierno de los Estados Unidos invitara a Fougner a liderar un estudio sobre la viabilidad de la construcción de barcos de hormigón en los EEUU. En 1918 se botó el primer barco de hormigón americano (un vapor de 6.125 toneladas llamado *SS Faith*) construido en la San Francisco Ship Building Company en Oakland, California, que estuvo en servicio hasta 1921, ver Figura 2-6.

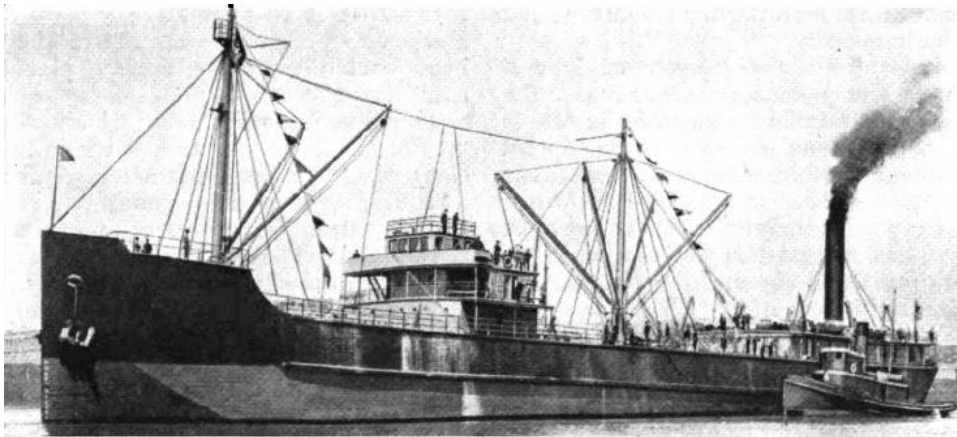


Figura 2-6 - SS Faith [19].

Los barcos de hormigón armado (ver Figura 2-7) tienen la ventaja de que son más baratos, pero tienen el inconveniente de que, al ser más gruesos, tienen menos espacio para la carga y mayores costes operativos. Otro inconveniente del hormigón es el precio de la mano de obra y el tiempo de ejecución asociado a la propia tecnología del hormigón armado.

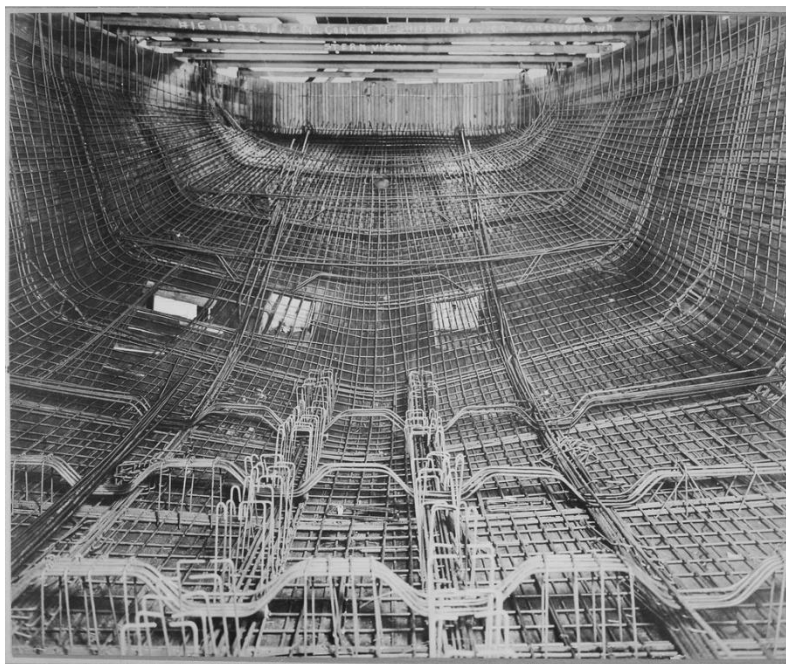


Figura 2-7 - Detalle de armadura del casco de un buque de hormigón [19].

La escasez de acero durante la Primera y Segunda Guerras Mundiales promovió la construcción de buques de hormigón. Sin embargo, en el periodo entre guerras, este tipo de barcos no fueron demandados para uso comercial ni militar. No sólo buques, también se construyeron barcazas de hormigón, algunas de las cuales tenían que ser remolcadas al carecer de motores.

Aunque la tecnología del hormigón siguió avanzando, lo que permitía hacer cascos más ligeros y a mayor velocidad de ejecución, el hecho de que otros métodos de construcción fueran menos laboriosos decantó la construcción naval hacia cascos de acero.

En relación a los submarinos/sumergibles, allá por 1944 una firma californiana propuso construir un submarino de hormigón para transporte de mercancías, pero el proyecto fue abandonado cuando acabó la guerra. Sin embargo, la idea de construir sumergibles/submarinos de hormigón quedó latente.

2.7 Submarinos de hormigón.

En 1971 el laboratorio civil de Ingeniería Naval Laboratorio americano (NCEL) inició un programa experimental sobre el comportamiento resistente de esferas de hormigón sumergidas en las profundidades del océano durante un largo plazo de tiempo. Los objetivos técnicos de los ensayos eran determinar el fallo a lo largo del tiempo, así como estudiar la permeabilidad y durabilidad del hormigón sometido a esfuerzos hidrostáticos sostenidos durante largos periodos de tiempo. Por un periodo de 13 años se realizaron inspecciones in situ mediante sumergibles y, a edades determinadas, se tomaron testigos de esferas sumergidas seleccionadas para ser analizados en laboratorio [20], [21].

Los resultados más relevantes de este estudio se resumen a continuación:

- i) La resistencia del hormigón se redujo cuando se sumergió debido al cambio de un entorno seco en condiciones ambientales (después de un curado de 28 días, los especímenes se almacenaron al aire libre durante varios meses hasta su inmersión) a un entorno saturado cuando se sumergieron. De hecho, la resistencia del hormigón en condiciones húmedas es de un 10 a un 20% menor que la del mismo hormigón en estado seco [22]. Por el contrario, el hormigón en condiciones de alta humedad aumenta su resistencia con el tiempo y, a la edad 1 año, la resistencia de un hormigón de buena calidad es aproximadamente un 20% mayor que la tenía a los 28 días [22].

- ii) De las cinco esferas recuperadas del océano, dos habían sido recubiertas de material impermeabilizante. Una vez sacadas se comprobó que después de 5.3 años sumergidas en el océano el agua no había penetrado en las esferas impermeabilizadas mientras que en las esferas no tratadas había entrado una pequeña cantidad de agua. Análogas mediciones se hicieron después de 10.5 años de inmersión y la conclusión fue que, si bien el hormigón sin tratar no es completamente impermeable, la cantidad de agua filtrada no era significativa. Según [22], hormigones con relaciones agua/cemento inferiores o iguales a 0.40 presentan excelentes características de permeabilidad.
- iii) En relación a la durabilidad, después de 10.5 años de exposición a las profundidades oceánicas, no se apreció un deterioro visible en el hormigón ni tampoco corrosión de la armadura (que tenía un recubrimiento de 1 pulgada=2.54 cm).

Otro factor importante a tener en cuenta es la posible absorción de agua de mar por el hormigón que, en grandes cantidades, puede suponer un considerable aumento del peso de estructuras prolongadamente sumergidas. A este respecto, experimentalmente se comprobó que un hormigón maduro de alta calidad sumergido absorbe una cantidad insignificante de agua [22].

El posible efecto de los ciclos de presión en el hormigón (debidos a la rápida disminución de presión) fue también experimentalmente estudiado en [22]. La resistencia a compresión uniaxial de probetas de hormigón fue obtenida para hormigones sometidos a distintos ciclos de presión y comparada. El resultado del análisis estadístico concluyó que los ciclos de presión no dañan el hormigón. Por tanto, de acuerdo a [20]–[22], el hormigón armado es un material adecuado para estructuras resistentes sumergidas durante largo tiempo en aguas profundas.

Las estructuras de hormigón en ingeniería civil requieren de una armadura mínima para resistir las tensiones térmicas, de retracción y para control de fisuración. En [22] las estructuras esféricas se armaron de distintas maneras: con mallas de armadura en el interior, en el exterior y en ambas superficies (interior y exterior) y mediante fibras de acero. Los resultados mostraron peor comportamiento en el caso del hormigón con fibras.

Es interesante señalar que los submarinos estudiados en [22] se construyeron pegando con adhesivos epoxi porciones de placa. En el caso de las esferas, se pegaron las dos semiesferas y en el caso de las estructuras cilíndricas los cierres a ambos extremos fueron adheridos al cuerpo central cilíndrico. En ninguno de los especímenes se produjo el fallo asociado a la junta si bien los adhesivos fueron previamente ensayados para garantizar su buen comportamiento sumergidos en agua y las superficies de hormigón a pegar fueron previamente tratadas con chorro de arena para hacerlas rugosas antes del pegado.

En la Figura 2-8 se puede ver un sumergible/submarino de hormigón con forma de huso similar a la del NAUTILUS de Robert Fulton (1800) (Figura 2-9).



Figura 2-8 - Submarino de hormigón [23]

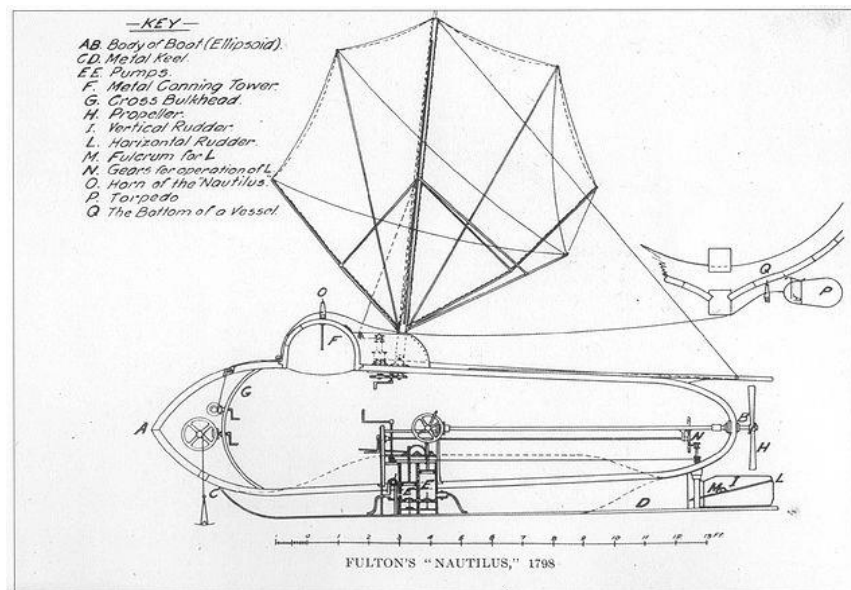


Figura 2-9 - Dibujo del NAUTILUS [24]

En 1974 el Naval Undersea Center (San Diego, CA) encargó un estudio a la Universidad de California en Berkeley (contrato N66001-74-C-0408) sobre la viabilidad de submarinos de hormigón. Para ello realizaron una réplica de un casco de submarino de acero existente con hormigón pretensado. Realizaron un pretensado longitudinal y un pretensado circunferencial del casco y concluyeron que el hormigón pretensado era un material viable para sumergibles de hasta media profundidad. La construcción, que se llevó a cabo uniendo módulos, puso de manifiesto que el hormigón presentaba ventajas frente al acero en: mantenimiento, durabilidad, disponibilidad de materiales, mayor rendimiento frente a impacto y accidentes, el hormigón no se ve afectado por la temperatura, adquiere cualquier forma (dobles curvaturas) y tiene buenas propiedades de aislamiento. El resultado económico fue que el casco de presión de hormigón costaría aproximadamente la mitad que el casco de acero equivalente [25].

Teniendo en cuenta que, en teoría, el hormigón es un candidato idóneo para cascos de estructuras sometidas a compresiones hidrostáticas y los estudios llevados a cabo por [19–21], la elección de nuestro casco de submarino será de hormigón armado.

En este estudio se va a estudiar la viabilidad estructural de unificar los cascos resistente e hidrodinámico en uno único de hormigón y de integrar en la parte inferior de la célula del casco los tanques de inmersión.

3 DESARROLLO TEÓRICO

3.1 Análisis estadístico para la elección de las dimensiones del submarino

En el presente trabajo, se utilizará una base de datos (Figura 3-1) de submarinos provenientes de diversos países y distintas características para llevar a cabo la construcción de dos gráficos mediante la técnica de regresión lineal. El objetivo será analizar si existe alguna relación significativa entre el diámetro y la eslora, así como del diámetro y la tripulación de estos submarinos escogidos.

	Nombre	País	Eslora	Diámetro	Tripulación
0	Type 039A (Yuan)	China	77.00	8.0	70.0
1	Type 212A	Alemania	56.00	6.8	27.0
2	Kilo Class	Rusia	74.00	9.9	52.0
3	Scorpene Class	Francia/India	61.70	6.2	32.0
4	Collins Class	Australia	77.80	7.8	42.0
5	Södermanland Class	Suecia	48.00	6.2	25.0
6	Sauro Class	Italia	54.90	6.8	53.0
7	Gotland Class	Suecia	60.00	6.2	26.0
8	Upholder/Victoria Class	Reino Unido	70.30	7.6	48.0
9	Los Angeles Class	Estados Unidos	110.30	10.1	130.0
10	Turtle	Estados Unidos	2.40	1.8	1.0
11	Type A Ko-hyoteki	Japón	23.00	1.8	2.0
12	Triton 1000/2	Estados Unidos	3.05	1.6	1.0
13	DSRV Avalon	Estados Unidos	21.60	2.6	20.0
14	Midget Submarines clase X	Reino Unido	15.20	1.7	2.0
15	TR-1700	Argentina	34.00	6.2	33.0

Figura 3-1 - Base de datos de submarinos

Con base en los resultados obtenidos, se podrán extraer conclusiones importantes acerca de la relación entre el tamaño de los submarinos y su capacidad de tripulación, lo que tendrá implicaciones relevantes en la selección de la plataforma más adecuada para la creación de un submarino tripulable de pequeño tamaño.

Los resultados obtenidos han mostrado una tendencia en la relación entre la eslora y el diámetro de los submarinos, sin embargo, no se observaron submarinos con diámetros entre 3 y 6 metros, por lo que resulta difícil establecer una correlación clara entre las variables, ver en Figura 3-2.

Dicho lo anterior, considerando nuestro objetivo de diseñar una plataforma de submarino tripulable de pequeño tamaño, nuestra elección se enfocará en submarinos que tengan una eslora alrededor a los 40 metros, lo que permitirá evaluar su posible compatibilidad con submarinos de diámetros en torno a los 5 metros, de los cuales no tenemos datos. La plataforma será construida para albergar aproximadamente 20 tripulantes siguiendo la recta de regresión.

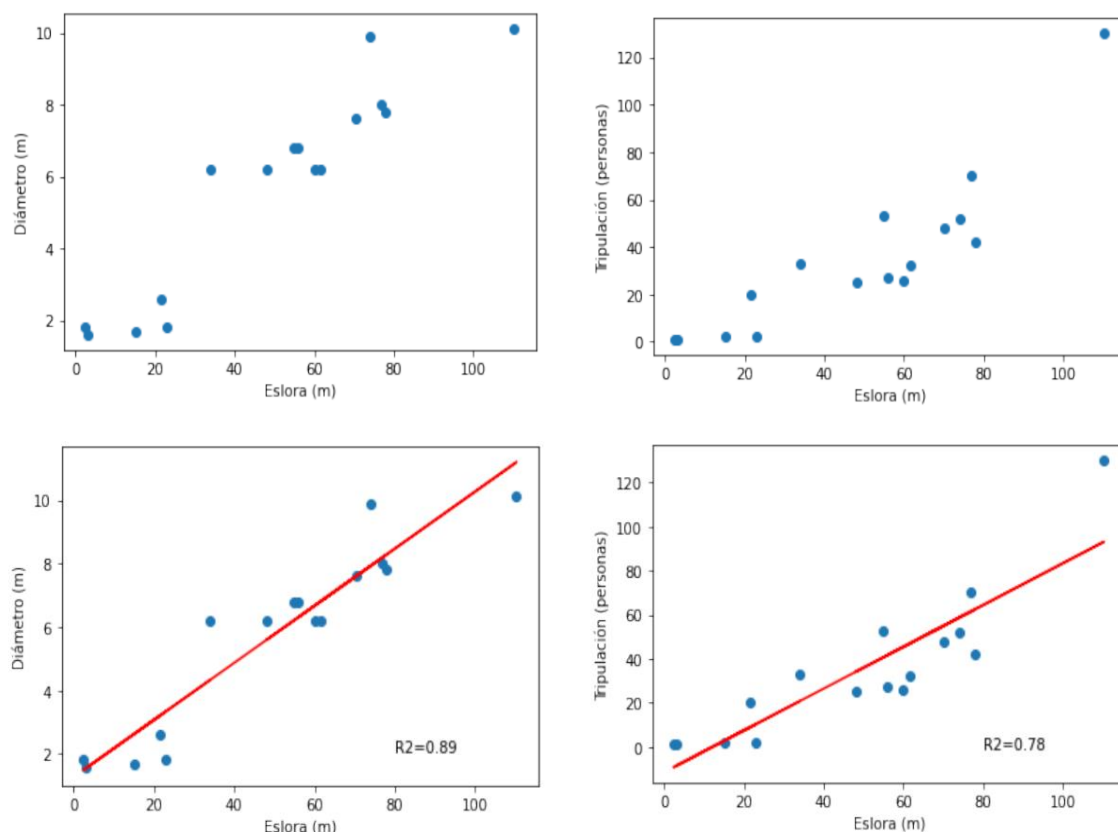


Figura 3-2 - Gráficos Diámetro-Eslora y Tripulación-Eslora con líneas de regresión

3.2 Pandeo de estructuras cilíndricas sometidas a presión hidrostática

Los cascos de submarinos suelen tener una estructura de acero cilíndrica rigidizada con anillos circulares equidistantes entre sí que generalmente se sueldan al casco [4]. Estos anillos suelen ser secciones estructurales en I (alas inclinadas), secciones WF (alas paralelas), o secciones en T que se disponen a lo largo de la longitud del cilindro. Desde el punto de vista estructural, la existencia de estos rigidizadores modifica sustancialmente el comportamiento de la estructura del casco.

Como en [26], en este estudio se supone que la presión hidrostática sobre la pared del elemento estructural es uniforme en todos los puntos de la superficie exterior. Por tanto, la diferencia de carga hidrostática entre las partes superior e inferior de la estructura se desprecia. Además, el peso propio de la estructura no se considera en el cálculo de las tensiones sobre la estructura puesto que es despreciable frente al valor de la carga de presión. Experimentalmente se ha comprobado [26] que estas hipótesis son válidas para estructuras de hormigón en aguas profundas, en las cuales la presión total es como mínimo 20 veces la diferencia de presión entre las parte superior e inferior de la estructura.

En este informe nos vamos a centrar en estructuras de hormigón resistentes a la carga de presión hidrostática. En este caso, al contrario de lo que sucede en las estructuras de acero, no son necesarios rigidizadores transversales. Este tipo de estructuras, con formas esférica y cilíndrica, han sido ampliamente estudiadas [22], [27]. Al contrario que en las estructuras esféricas, en las que las tensiones son idénticas en todas las direcciones circulares, en el caso de estructuras cilíndricas la tensión circunferencial es mayor que la longitudinal por lo que será la primera la tensión de referencia. En ambos casos la tensión varía en el espesor de pared desde cero en el interior hasta el nivel de presión hidrostática aplicada en la superficie exterior.

Como en [4], se considera una estructura cilíndrica perfectamente circular y libre de imperfecciones geométricas iniciales (sin carga) y de tensiones iniciales asociadas a los procesos de fabricación.

La sección circular de la Figura 3-3, como consecuencia de la presión exterior a la que está sometida, se deforma tal y como se indica con línea discontinua.

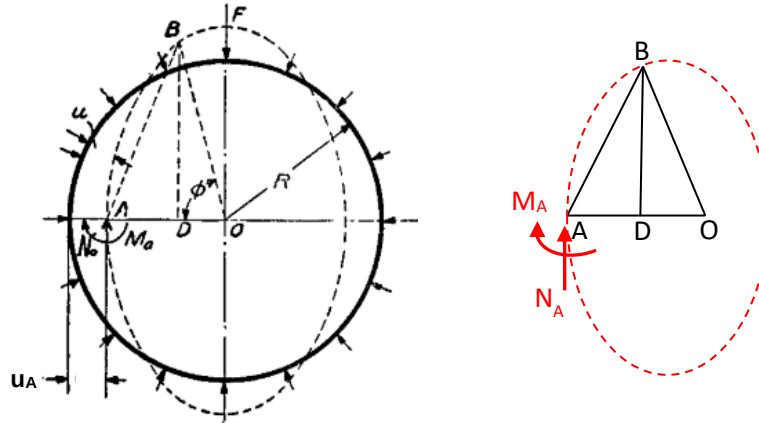


Figura 3-3 - Pandeo de cilindros. Adaptada de [14]

Sea σ la presión exterior por unidad de longitud de arco, R el radio y u el desplazamiento radial de un punto de la sección debido al pandeo. Sean M_A y $N_A = \sigma(R - u_A)$ el momento flector y la fuerza de compresión (en la dirección del arco) en un punto de referencia de la sección transversal (punto A).

Por trigonometría del triángulo aislado de la Figura 3-3:

$$\begin{aligned} \overline{BD}^2 &= \overline{AB}^2 - \overline{AD}^2 \quad \text{y} \quad \overline{OD} = \overline{AO} - \overline{AD} \\ \overline{BO}^2 &= \overline{OD}^2 + \overline{BD}^2 = \overline{OD}^2 + \overline{AB}^2 - \overline{AD}^2 = \overline{AO}^2 - 2\overline{AO}\overline{AD} + \overline{AB}^2 \Rightarrow \\ \frac{1}{2}\overline{AB}^2 - \overline{AO}\overline{AD} &= \frac{1}{2}(\overline{BO}^2 - \overline{AO}^2) = \frac{1}{2}((R-u)^2 - (R-u_A)^2) \end{aligned} \quad (3)$$

Si se admite la hipótesis de pequeñas deformaciones, los términos en u^2 de la expresión anterior se pueden despreciar y por tanto:

$$\frac{1}{2}\overline{AB}^2 - \overline{AO}\overline{AD} = R(u_A - u) \quad (4)$$

Por otro lado, el momento en un punto genérico B de la sección de la Figura 3-3 se puede expresar en función del momento en el punto de referencia A como:

$$M = M_A + \sigma\overline{AO}\overline{AD} - \sigma\frac{\overline{AB}^2}{2} \quad (5)$$

Introduciendo la ecuación (4) en la ecuación (5):

$$M = M_A - \sigma R(u_A - u) \quad (6)$$

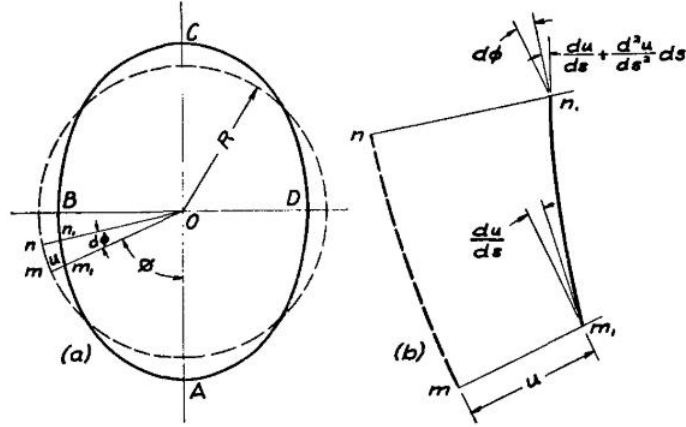


Figura 3-4 - Variación de la curvatura durante la flexión de una sección circular según [28]

Si consideramos el aro deformado de la Figura 3-4, el arco $ds=mn$ (antes de la deformación) se puede expresar en función del radio R y del ángulo $d\phi$ como:

$$ds = R d\phi \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{d\phi}{ds} \quad (7)$$

Por tanto, la curvatura del segmento deformado m_1n_1 será:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{d\phi + \Delta d\phi}{ds + \Delta ds} \quad (8)$$

El incremento de longitud del segmento mn durante la deformación se puede obtener como:

$$\Delta ds = (R - u) d\phi - R d\phi = -u d\phi \quad (9)$$

que, teniendo en cuenta la ecuación (7) se puede expresar como:

$$\Delta ds = -u \frac{ds}{R} \quad (10)$$

Por otro lado, de la Figura 3-4 se desprende que:

$$\Delta d\phi = \frac{d^2 u}{ds^2} ds \quad (11)$$

Introduciendo las ecuaciones (10) y (11) en (8):

$$\frac{1}{R_1} = \frac{d\phi + \frac{d^2 u}{ds^2} ds}{ds - u \frac{ds}{R}} \quad (12)$$

Operando convenientemente en la expresión anterior y despreciando infinitesimales de orden superior al segundo se obtiene la siguiente expresión para la variación de la curvatura de la sección, $\Delta\rho$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_1} &= \frac{\left(\frac{d\phi}{ds} + \frac{d^2u}{ds^2}\right)\left(1 + \frac{u}{R}\right)}{\left(1 - \frac{u}{R}\right)\left(1 + \frac{u}{R}\right)} \approx \left(\frac{d\phi}{ds} + \frac{d^2u}{ds^2}\right)\left(1 + \frac{u}{R}\right) = \frac{d\phi}{ds}\left(1 + \frac{u}{R}\right) + \frac{d^2u}{ds^2}\left(1 + \frac{u}{R}\right) \approx \\ &\approx \frac{1}{R}\left(1 + \frac{u}{R}\right) + \frac{d^2u}{ds^2} \Rightarrow \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R} = \Delta\rho = \frac{u}{R^2} + \frac{d^2u}{ds^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de la elástica queda que:

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R} = -\frac{M}{EI} = \frac{u}{R^2} + \frac{d^2u}{ds^2} \quad (14)$$

Introduciendo la ecuación (6) en la ecuación (14) queda:

$$\frac{u}{R^2} + \frac{1}{R^2} \frac{d^2u}{d\phi^2} = -\frac{M}{EI} = -\frac{1}{EI} (M_A - qR(u_A - u)) \quad (15)$$

cuya solución general es del tipo:

$$\begin{aligned} u(\phi) &= C_1 \sin \kappa\phi + C_2 \cos \kappa\phi + \frac{-M_A R^2 + \sigma R^3 u_A}{EI + \sigma R^3} \\ \text{con } \kappa^2 &= 1 + \frac{\sigma R^3}{EI} \end{aligned} \quad (16)$$

Las constantes de integración se obtienen imponiendo condiciones de contorno. Por simetría:

$$\begin{aligned} \left. \frac{du}{d\phi} \right|_{\phi=0} &= 0 \Rightarrow C_1 = 0 \\ \left. \frac{du}{d\phi} \right|_{\phi=\pi/2} &= 0 \rightarrow \sin \kappa \frac{\pi}{2} = 0 \rightarrow \kappa \frac{\pi}{2} = n\pi \rightarrow \kappa = 2n \rightarrow \kappa^2 = 1 + \frac{\sigma R^3}{EI} = 4n^2 \end{aligned} \quad (17)$$

El valor menor de la carga, que corresponde a $n=1$, es la presión de pandeo:

$$\kappa^2 = 1 + \frac{\sigma R^3}{EI} = 4 \rightarrow \sigma_{cr} = \frac{3EI}{R^3} \quad (18)$$

A partir de las ecuaciones (16) y (17) se pueden representar los modos de pandeo para los distintos valores de n , tal y como se puede ver en la Figura 3-5.

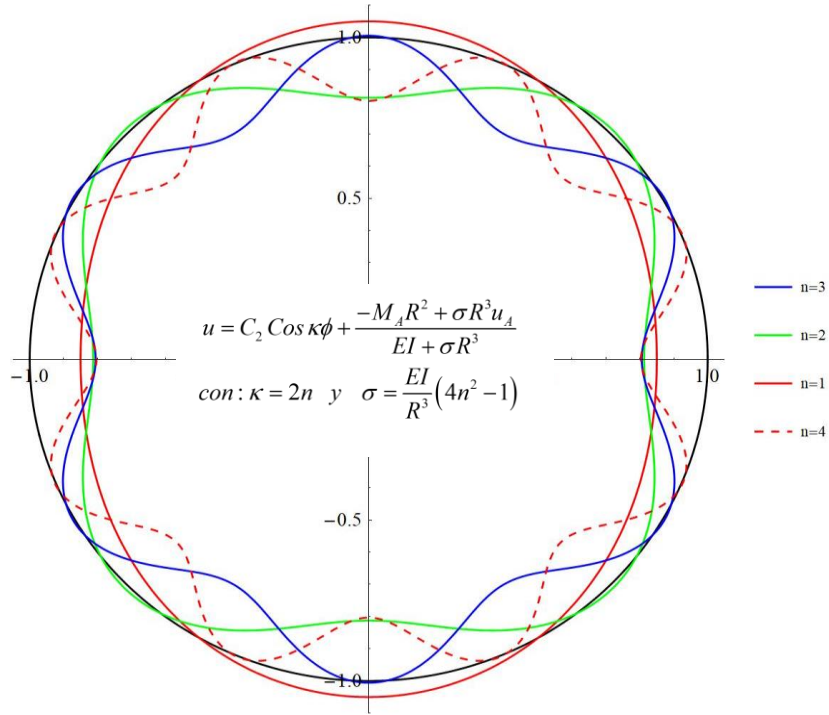


Figura 3-5 - Primeros modos de pandeo de una sección circular según [14] (para: $R=1$, $C_2=R/10$, $EI=10$, $u_A=0.1$ y $MA=1$)

La formulación anterior, obtenida para un anillo circular, se puede extender a tubos cilíndricos. Sea t el espesor del tubo, el momento de inercia de un segmento de tubo de longitud unidad es:

$$I = \frac{1t^3}{12} \quad (19)$$

y admitiendo que la sección transversal no se distorsiona durante el proceso de flexión, la ecuación (18) queda:

$$\sigma_{cr} = \frac{3}{R^3} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1t^3}{12} = \frac{1}{4} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{R} \right)^3 = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (20)$$

con $D=2R$ y E y ν el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson respectivamente.

La expresión dada en la Ecuación (20) fue deducida por Timoshenko [28] y corresponde a la presión externa para la cual se produce el pandeo elástico de un tubo infinitamente largo de sección circular.

La fórmula de Timoshenko sirve para obtener la presión de colapso de cilindros largos, para los cuales la presión de colapso no depende de la longitud. En la práctica, la expresión de Timoshenko [28] se considera válida si la longitud del cilindro es mayor a determinada longitud, denominada longitud crítica, L_{cr} .

La longitud crítica se define como la longitud mínima de una estructura cilíndrica para la cual la presión de colapso es independiente de las condiciones de contorno de los extremos y, por tanto, de cualquier incremento de longitud. Por el contrario, si la longitud es inferior que L_{cr} , la presión de pandeo o de implosión aumenta considerablemente. En [29] se propone la siguiente expresión para determinar la longitud crítica (ver Figura 3-6):

$$L_{cr} = k D \sqrt{D/t} \quad (21)$$

$$\text{con } k = \frac{4\sqrt{6}\pi}{27} \sqrt[4]{1-\nu^2}$$

Desde el punto de vista teórico, cualquier placa cilíndrica con una longitud mayor que la longitud crítica se puede considerar como de longitud infinita ya que su presión de colapso no se ve afectada por un aumento en la longitud [30]. En [30] se considera que el cilindro tiene una longitud infinita en los casos en los que $2L/R > 50$ (para cualquier relación D/t), siendo L la longitud del cilindro y D su diámetro medio.

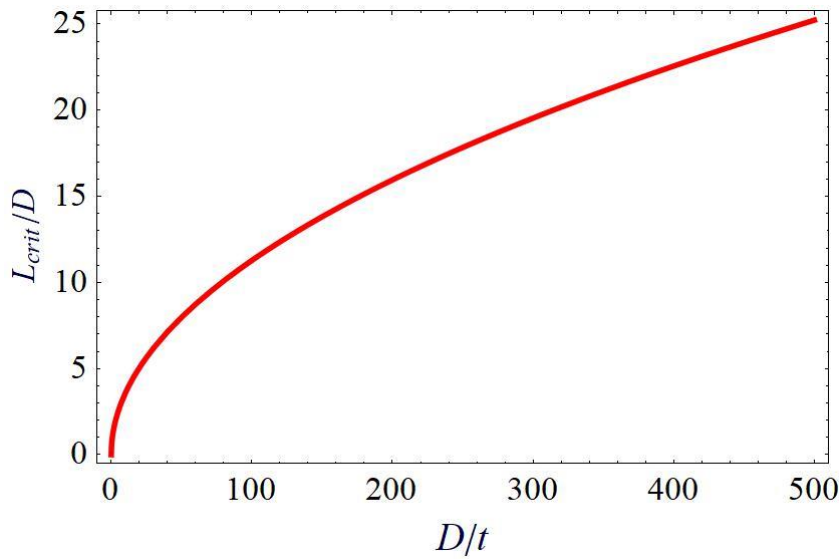


Figura 3-6 - Ratio L_{cr}/D en función de D/t para $\nu=0.2$

Como ya hemos dicho, la ecuación (20) no es aplicable para determinar la presión de colapso de estructuras cilíndricas de longitud moderada (i.e. inferior a la longitud crítica) sometidas a presión externa [30]. El primer estudio de pandeo de una estructura cilíndrica delgada considerando las condiciones de contorno de los extremos fue desarrollado por von Mises en 1914, quien inicialmente consideró sólo la presión radial que actúa sobre el exterior de un cilindro de longitud moderada. En 1929, con objeto de representar más adecuadamente el efecto de la presión hidrostática, von Mises extendió su formulación original considerando la carga axial además de la radial [4].

Son muchos los estudios hechos en relación a la presión para la cual se produce el pandeo de tubos cilíndricos de longitud moderada sometidos a una presión externa. En [29] se propone una expresión para calcular la presión de colapso de láminas cilíndricas delgadas con una longitud menor que la crítica sujeta a:

- i) una presión externa radial uniforme:

De entre todas las fórmulas existentes [29], [31] en este estudio vamos a adoptar la propuesta por [31] para un tubo simplemente apoyado y que fue verificada experimentalmente.

$$\sigma_{cr} = \frac{8\sqrt{6}\pi}{27} \frac{E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \frac{(t/D)^{3/2}}{L/D} \quad (22)$$

La ecuación (22) corresponde a una hipérbola para cualquier relación t/D constante y queda del lado de la seguridad ya que se comprobó que, de media, da valores de la presión de implosión un 12 por ciento más bajos que los obtenidos a partir de la fórmula de von Mises. Además, debido a las hipótesis adoptadas por [31], la ecuación (22) tiende a cero en lugar de a la ecuación (20) cuando L tiende a infinito. Por lo tanto, su aplicabilidad se limita a estructuras con longitudes inferiores a la crítica.

ii) presión externa radial y axial:

$$\sigma_{cr} = \frac{2.42E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \frac{(t/D)^{3/2}}{\frac{L}{D} - 0.45\left(\frac{t}{D}\right)^{1/2}} \quad (23)$$

La ecuación (23), desarrollada en U. S. Experimental Model Basin, es una aproximación a la fórmula propuesta por Von Mises en 1929. Según [29], ambas expresiones se diferencian en un uno por ciento.

La ecuación (23) tiene la ventaja de que es una fórmula muy simple e independiente del modo de pandeo.

En la Figura 3-7 se representa el valor de la presión crítica o de implosión en función de la relación D/t obtenido a partir de las expresiones anteriores para distintos valores de la longitud L : $L = L_{cr}/3$, $2L_{cr}/3$, L_{cr} y $1000 L_{cr}$.

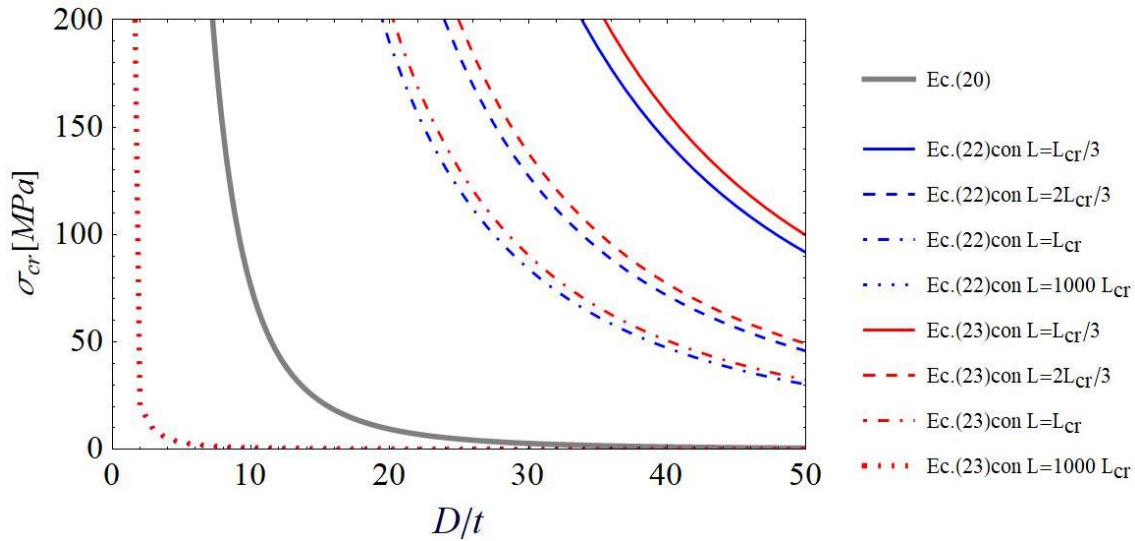


Figura 3-7 - Evolución de la presión de pandeo para $f_{ck}=45$ MPa

En la Figura 3-7 se ha representado también la ecuación (20), aplicable a cilindros de gran longitud, para facilitar la comparación de resultados.

Haynes [26] propuso una metodología para calcular el factor de seguridad respecto a la presión de implosión de cilindros de hormigón con tapas semiesféricas sumergidos. Para cilindros de longitud moderada, Haynes [26] considera la ecuación de Donnell para el cálculo de la presión de implosión:

$$\sigma_{cr} = \frac{0.855E_c}{(1-\nu^2)^{3/4}} \left(\frac{t}{R}\right)^{3/2} \frac{R}{L} \eta \quad (24)$$

particularizando la ecuación anterior para $\nu=0.2$ y $R=D/2$ queda:

$$\sigma_{cr} = \frac{1.25E_c}{L/D} (t/D)^{3/2} \eta \quad (25)$$

Para cilindros largos, por el contrario, Haynes [26] propone obtener la presión de implosión a partir de la ecuación de Bresse:

$$\sigma_{cr} = \frac{E_c}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{R} \right)^2 \eta \quad (26)$$

que para $\nu=0.2$ y $D=2R$ queda:

$$\sigma_{cr} = 1.04E_c \left(\frac{t}{D} \right)^2 \eta \quad (27)$$

Respecto al módulo de elasticidad del hormigón, Haynes [26] propone obtener el valor de E_c a partir de la ecuación (28), ajustada a partir de datos experimentales en el rango de resistencias a compresión del hormigón indicado en la ecuación, en lugar de emplear la expresión propuesta por la normativa americana de hormigón estructural (ACI):

$$E_c = 530 f'_c \approx 530 f_{ck} \text{ [psi]} \quad 6000 < f'_c < 10000 \text{ psi} \quad (28)$$

(con 1psi=0.007MPa)

En la Figura 3-8 se comparan los valores del módulo de elasticidad del hormigón obtenidos a partir de las expresiones propuestas por Haynes [26] y por el Eurocódigo 2 [18]. La Figura 3-8 muestra que la expresión propuesta por Haynes [26] conduce a valores inferiores de E_c (i.e., hormigón menos rígido) en todo el rango de resistencias fijado en ecuación (28).

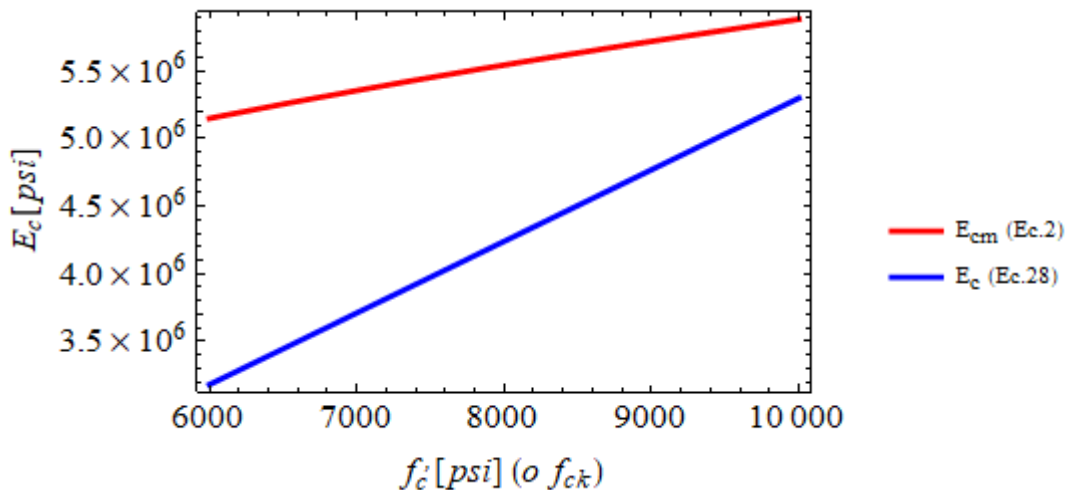


Figura 3-8 - Comparativa módulo de elasticidad del hormigón

El coeficiente de reducción por plasticidad η en las ecuaciones (24) a (27) viene dado por:

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{\sigma_{cr}}{f'_c} \geq 1.0 \\ \eta_1 = 1.65 - 1.25 \left(\frac{\sigma_{cr}}{f'_c} \right) & \text{si } 0.52 < \frac{\sigma_{cr}}{f'_c} < 1.0 \\ 1 & \text{si } \frac{\sigma_{cr}}{f'_c} \leq 0.52 \end{cases} \quad (29)$$

Haynes [26] propone que la tensión radial media en la pared de la estructura cilíndrica de hormigón sumergida en el instante de la implosión ($\sigma_{wall,imp}$) está relacionada con la tensión de pandeo bajo condiciones hidrostáticas (σ_{cr}) mediante la expresión:

$$\sigma_{wall,imp} = \sigma_{cr} \left(\frac{D}{2t} \right) \quad (30)$$

Además, Haynes [26] establece que σ_{imp} se puede obtener en función de la resistencia del hormigón multiplicando ésta por un factor k_c que depende de la esbeltez del cilindro de hormigón:

$$\sigma_{wall,imp} = k_c f'_c \quad \text{con} \quad (31)$$
$$k_c = \begin{cases} 1.25 - 0.12 \left(\frac{L}{D} \right) & \text{si } \left(\frac{L}{D} \right) < 2 \\ 1.0 & \text{si } \left(\frac{L}{D} \right) \geq 2 \end{cases}$$

Por tanto:

→ si $\sigma_{cr} \geq f'_c$, el cilindro de hormigón se puede considerar de pared gruesa y la tensión de implosión de la estructura de hormigón cilíndrica sumergida se obtiene combinando las ecuaciones. (30) y (31) como:

$$\sigma_{wall,imp} = \sigma_{cr} \left(\frac{D}{2t} \right) = k_c f'_c \Rightarrow \sigma_{cr} = 2k_c f'_c \left(\frac{t}{D} \right) \quad (32)$$

→ si $\sigma_{cr} < f'_c$, el cilindro de hormigón se puede considerar de pared delgada y la tensión de implosión se obtiene:

i) si $L \leq L_{cr}$ (ecuación (21)) : introduciendo las ecuaciones (25) y (28) en la ecuación (30):

$$\sigma_{cr} = \frac{1320\eta f_c' \left(\frac{t}{D}\right)^{2.5}}{\left(\frac{L}{D}\right)} \quad (33)$$

ii) si $L > L_{cr}$ (ecuación (21)): introduciendo las ecuaciones (27) y (28) en la ecuación (30):

$$\sigma_{cr} = 1100\eta f_c' \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (34)$$

con el valor de η dado por la ecuación (29) en función del valor del factor σ_{cr} / f_c' .

La metodología propuesta por Haynes [26], basada en resultados experimentales de laboratorio, se resume en el diagrama de flujo de la Figura 3-9.

En la Figura 3-9 el factor de seguridad se obtiene como la relación entre la presión de implosión y la operacional [26] (otros autores, lo definen como la relación entre la profundidad de implosión y la operacional [32]).

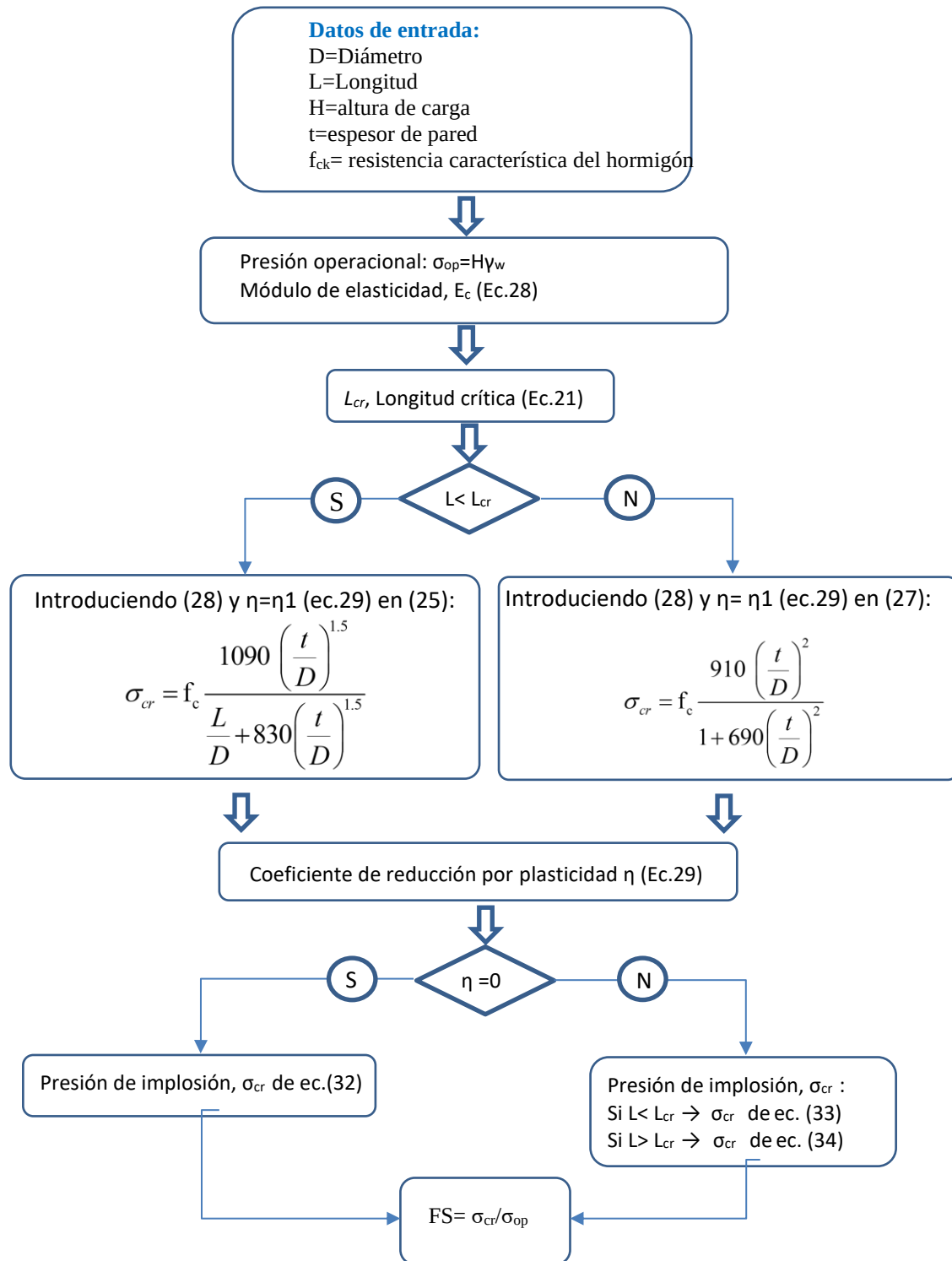


Figura 3-9 - Diagrama de flujo. Metodología propuesta por Haynes [12]

Una vez diseñada la estructura siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 3-9, Haynes [26] propone hacer una verificación adicional relativa a la geometría. Según los datos experimentales obtenidos, la estructura cilíndrica de hormigón es sensible a desviaciones geométricas, es decir, respecto de la forma del círculo perfecto si:

$$Z = \frac{L^2}{Rt} \leq 100 \quad (35)$$

en cuyo caso, será necesario analizarla mediante modelos numéricos de elementos finitos.

3.3 Factores de seguridad

En el proyecto de estructuras de hormigón son dos los factores de seguridad que se introducen: factor de seguridad de la carga y el factor de seguridad del material. El factor de seguridad de la carga tiene en cuenta las imprecisiones en: la definición de cargas, el diseño, las variaciones en las tolerancias de construcción y la importancia de la estructura (en términos económicos y de vidas involucradas). El factor de seguridad del material tiene en cuenta las variaciones en la resistencia a compresión del hormigón con el que se construye la estructura y las condiciones de laboratorio y de campo. Para estructuras que se construyen en tierra y luego se sumergen, es apropiado un factor material de 1.5 [26], que es el habitualmente empleado en las normativas de obra civil.

Como guía para el factor de carga de la estructura submarina, el valor puede oscilar entre 1.7, si no está tripulado, a 2.0 o más si puede haber personas dentro [26]. En este estudio se empleará un factor global de seguridad de 3.0, que es el valor usado por Haynes [26] para sumergibles tripulados.

3.4 Influencia de la profundidad operativa en el espesor de un casco de hormigón

El método propuesto por Haynes [26] y resumido en la Figura 3-9 para predimensionar las dimensiones iniciales que ha de tener una estructura para una profundidad dada ha sido programado para obtener el espesor necesario de pared de hormigón de un tubo cilíndrico en función de la profundidad operativa. Se han analizado diámetros medios de 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5 y 9.0 m y profundidades de hasta 200 m. El hormigón es $f_{ck}=f'_c=45$ MPa. La geometría estudiada se resume en la Figura 3-10.

Como se puede ver en la Figura 3-10, la estructura consta de un cilindro central cerrado en un extremo por una semiesfera y por el otro por un tronco de cono. El espesor es el mismo en todo el casco. El diseño es similar al de los especímenes ensayados en [32] cuyo objetivo era estudiar la presión de implosión en función de la resistencia a compresión del hormigón y del espesor de pared de cilindros de hormigón cerrados a ambos lados con semiesferas y sometidos a cargas hidrostáticas externas.

La influencia de la rigidez de las piezas extremas en el comportamiento estructural de cascos cilíndricos de hormigón sometidos a carga hidrostática fue también experimentalmente estudiada en [33]. Para ello se ensayaron 12 modelos de cascos cilíndricos de hormigón cerrados en un caso con semiesferas de hormigón y en otro con placas de acero. Se ensayaron distintos modelos de fijación de los cierres con objeto de estudiar la influencia de la rigidez de los mismos. Uno de los resultados de la investigación experimental llevada a cabo en [33] fue que la diferencia de rigidez entre la tapa y el cilindro central no afectaba significativamente al comportamiento estructural de las estructuras cilíndricas ensayadas.

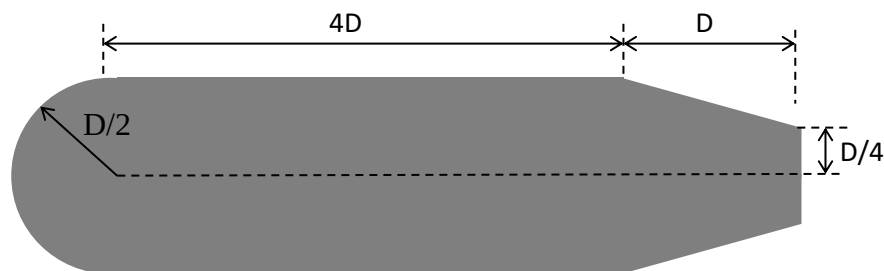


Figura 3-10 - Geometría estudiada

Los resultados se han obtenido mediante bucles encadenados e imponiendo que el factor de seguridad esté comprendido entre 2.9 y 3.1 (es decir, rondando 3). Los resultados se muestran en la Figura 3-11.

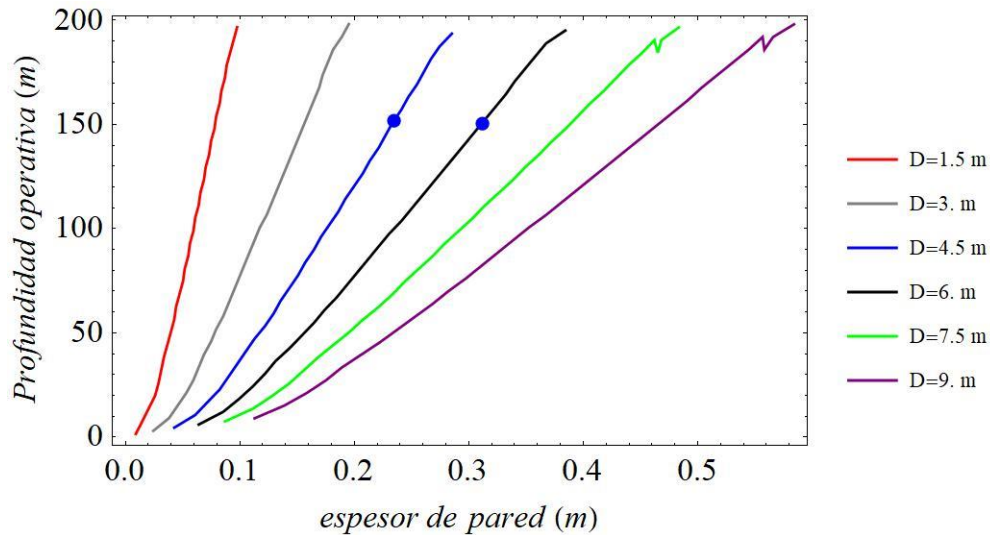


Figura 3-11 - Relación espesor de tubo y profundidad operativa para distintos diámetros del cilindro sumergido según la metodología de Haynes [12].

En la Figura 3-12 se ha considerado un modelo mecánico simple de una estructura cilíndrica sumergida, a partir del cual se puede obtener la relación profundidad media máxima operativa (H_{max}) y el espesor de pared a partir de la ecuación (36). En la ecuación (36) se ha considerado un factor de seguridad de 1.5 para el hormigón, pero no se ha incluido ningún factor adicional de seguridad para el valor de la carga.

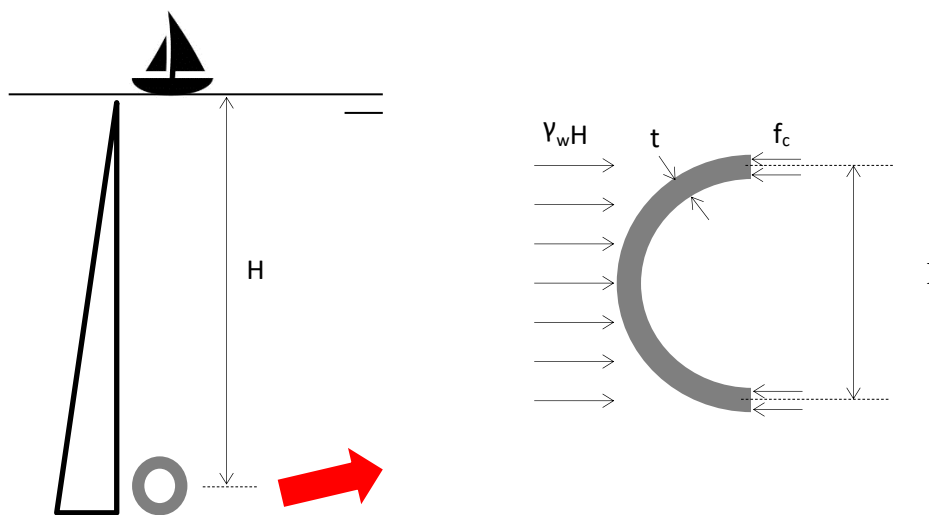


Figura 3-12 - Esquema simple. Estado tensional en la sección transversal de un cilindro sumergido

$$\frac{f_c}{1.5} 2t = \gamma_w H D \rightarrow H_{\max} = \frac{2 f_c / 1.5}{\gamma_w D} t \quad (36)$$

Las relaciones obtenidas a partir de la ecuación (36) para los diámetros $D = 4.5$ y 6 m son las representadas en la Figura 3-13 con línea discontinua.

Para los cilindros analizados, para los cuales $L < L_{crit}$, se puede obtener el valor del espesor a partir del cual se puede descartar cualquier fenómeno de inestabilidad para cada valor de la profundidad operativa H (ver ecuación (22)), con E_c obtenido de la ecuación (2), como:

$$\sigma_{cr} = \frac{8\sqrt{6}\pi}{27} \frac{E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \frac{(t/D)^{3/2}}{L/D} = \gamma_w H \rightarrow H = \frac{1}{\gamma_w} \frac{8\sqrt{6}\pi}{27} \frac{E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \frac{(t/D)^{3/2}}{L/D} \quad (37)$$

Los valores correspondientes a la ecuación (37) para $D = 4.5$ y 6 m se han representado con línea continua en la Figura 3-13.

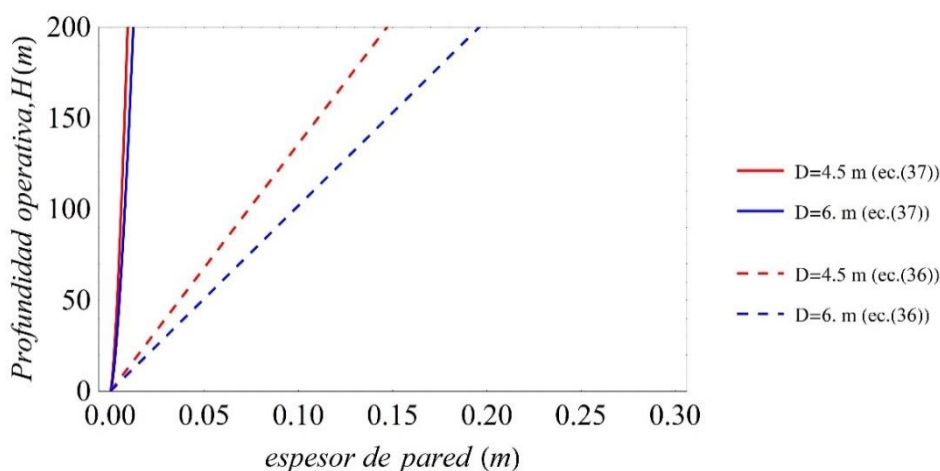


Figura 3-13 - Relación espesor de pared y máxima profundidad operativa para distintos diámetros del cilindro sumergido según el modelo mecánico de la Figura 3-13 (ecuación (36)) y a partir de la ecuación (37)

Como se puede ver en la Figura 3-13, los espesores obtenidos a partir del criterio resistente son superiores a los de pandeo, lo que confirma que la inestabilidad no es el factor relevante en el dimensionamiento de cilindros de hormigón sometidos a presión hidrostática.

En este trabajo, a modo de ejemplo, vamos a analizar dos casos particulares, representados con los dos puntos en la Figura 3-11. Los casos corresponden a una profundidad operativa de 152 m, y los valores de diámetro y espesor de pared se resumen en la Tabla 3-1, en la que indican también la longitud y la longitud crítica (ecuación (21)). En la última columna de la tabla se indica el factor de seguridad para el procedimiento indicado en la Figura 3-9.

D (m)	t (m)	L (m)	L_{crit} (m)	FS
4.5	0.23	18	22.22	2.98
6	0.31	24	29.59	2.99

Tabla 3-1 - Casos estudiados para $H=152$ m y $f_{ck}=45$ Mpa

Tal y como se puede comprobar en la Figura 3-13, se cumplen las limitaciones de resistencia y de pandeo. Ver resumen en Tabla 3-2.

D (m)	Valores de las tensiones en MPa		
4.5	$\sigma_{cr}(ec.(22)) = 121.7$	>	$\gamma_w H = 1.49$
	$\sigma_{cr}(ec. (20)) = 10.76$		
	$\sigma_c = \gamma_w H D / (2t) = 14.26$	<	$f_{ck} / 1.5 = 30.0$
6.5	$\sigma_{cr}(ec.(22)) = 122.05$	>	$\gamma_w H = 1.49$
	$\sigma_{cr}(ec. (20)) = 10.08$		
	$\sigma_c = \gamma_w H D / (2t) = 14.23$	<	$f_{ck} / 1.5 = 30.0$

Tabla 3-2 - Resumen de los valores de las tensiones para el caso estudiado

Por tanto, el espesor de pared en función de la profundidad operativa, para un cierto factor de seguridad, se podría obtener a partir de curvas como las representadas en la Figura 3-13 si se obviara el problema de la flotabilidad [32].

3.5 Estudio de flotabilidad

Para el estudio de la flotabilidad consideraremos 2 casos: flotabilidad neutra y positiva. Para ello aplicaremos equilibrio de fuerzas verticales y el principio de Arquímedes.

3.5.1 Flotabilidad neutra

El sumergible ha de poder permanecer sumergido en equilibrio. El lastre va a rellenar la parte inferior del cuerpo cilíndrico hasta una altura por determinar (ver Figura 3-14). Se va a considerar la existencia de una plataforma de hormigón de 150 mm de espesor que divide el cilindro en dos celdas. En este estudio se ha considerado que el peso del equipamiento es igual que el de la losa.

Para el valor del espesor obtenido a partir del método de Haynes [26] (Tabla 3-1) se va realizar el estudio de flotabilidad de la estructura.

El volumen total del sumergible se obtiene como:

$$V_T = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R_{ext}^3 + \frac{1}{3} \pi (R_{ext}^2 4R - (0.5R_{ext})^2 2R) + \pi R_{ext}^2 8R \quad (38)$$

con $R_{ext} = R + \alpha t/2$ y $\alpha = 1$.

El peso se obtiene multiplicando la superficie media por el espesor αt y por el peso específico del hormigón, γ_c . Se ha considerado una densidad del hormigón de 2400 kg/m³.

$$W = \gamma_c \alpha t \left(\frac{1}{2} 4 \pi R^2 + 2 \pi R 8R + \pi \left(R \sqrt{R^2 + (2D)^2} - \frac{R}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + D^2} \right) \right) \quad (39)$$

Al peso del casco hay que sumarle el de la losa, el del equipamiento (supuesto el mismo que el de la losa) y el del lastre, obtenidos como:

$$W_{lastre+interior} = 8R \gamma_w 2 \int_0^{\theta_{full}} R_{int}^2 \cos^2 x \, dx + 2(0.15 \gamma_c 8R \cdot R \sin \theta_{full}) \quad (40)$$

con $R_{int}=R-\alpha t/2$.

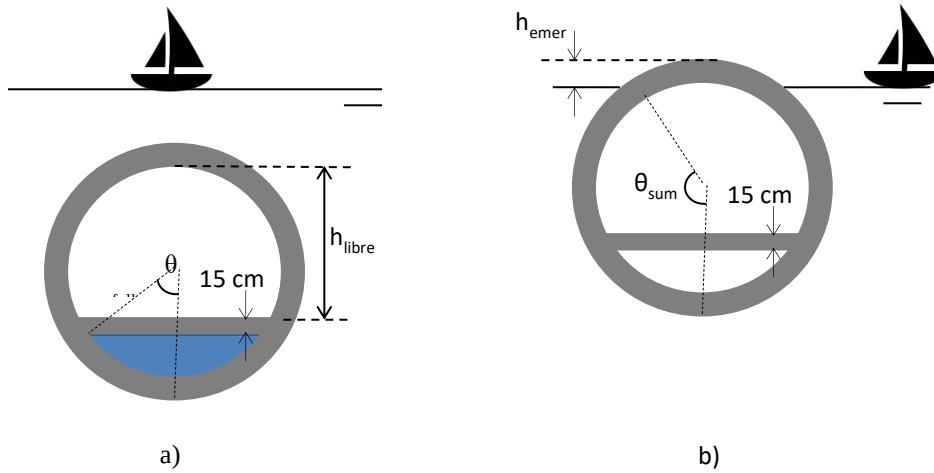


Figura 3-14 - Flotabilidad a) neutra, b) positiva

En la Figura 3-15a se representan la fuerza de empuje ($V \cdot \gamma_w$) y el peso del sumergible (ecuaciones (39)+(40)) para el sumergible de diámetro 4.5 m de la Tabla 3-1. (ver caso $\alpha = 1.0$). Como se puede apreciar en la figura, el lastre necesario para sumergir ese casco supone el llenado de casi la totalidad del cuerpo cilíndrico por lo que es necesario aumentar el peso de la estructura. Para ello se ha optado por ponderar el espesor del casco por α , con $\alpha = 1.25$ y 1.5 (ver Figura 3-15a).

A la vista de los resultados de la Figura 3-15a, para $D=4.5$ m se adoptará un espesor $t=1.5 \cdot 0.23=0.35$ m. Ver Tabla 3-1.

3.5.2 Flotabilidad positiva

Para el espesor calculado a partir de la flotabilidad neutra se va a hacer un estudio de flotabilidad positiva o activa, considerando el empuje correspondiente al volumen semisumergido y sin peso de lastre, calculado en función del ángulo θ_{sum} (ver Figura 3-15b) y en coordenadas polares como:

$$F_{emp} = \gamma_w V_{sum} = \gamma_w \left(2 \int_{\left(\frac{\pi}{2}-\theta_{sum}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\theta_{sum}} \int_0^{R_{ext}} \rho^2 \sin \psi \, d\rho \, d\psi \, d\theta + 8R \cdot 2 \int_0^{\theta_{sum}} R_{ext}^2 \cos^2 \theta \, d\theta + 2 \int_0^{\theta_{sum}} \int_0^{ArcTan(1/4)} \int_{\frac{2R_{ext}}{\cos \psi}}^{\frac{4R_{ext}}{\cos \psi}} \rho^2 \sin \psi \, d\rho \, d\psi \, d\theta \right) \quad (41)$$

En la Figura 3-15b se ha representado el peso y F_{emp} (ecuación (41)) en función del ángulo θ_{sum} . El punto de equilibrio de flotabilidad activa y la altura emergida correspondiente (ver Figura 3-14b) se han resumido en la Tabla 3-3. En las dos últimas columnas se incluyen los valores de la tensión en el hormigón del casco para la profundidad operativa inicialmente prevista y la profundidad de colapso para los espesores de pared indicados en la tabla (correspondientes a un incremento de 1.5 veces los obtenidos por el procedimiento de diseño de Haynes [26] (Figura 3-9)). Como se puede ver en la Tabla 3-3, los espesores de pared obtenidos por condiciones de flotabilidad suponen un aumento de la profundidad operativa teórica de alrededor de 3 veces según la ecuación (36).

D (m)	t* (m)	θ_{full} (rad)	Hlibre (m)	θ_{sum} (rad)	hemer(m)	σ_c (MPa) (H=150m)	Hcolapso (m)
4.5	0.35	0.87	3.38	2.53	0.57	9.57	476
6	0.46	0.98	4.3	2.50	0.82	9.71	469

Tabla 3-3 - Resultados del estudio de flotabilidad neutra y activa.

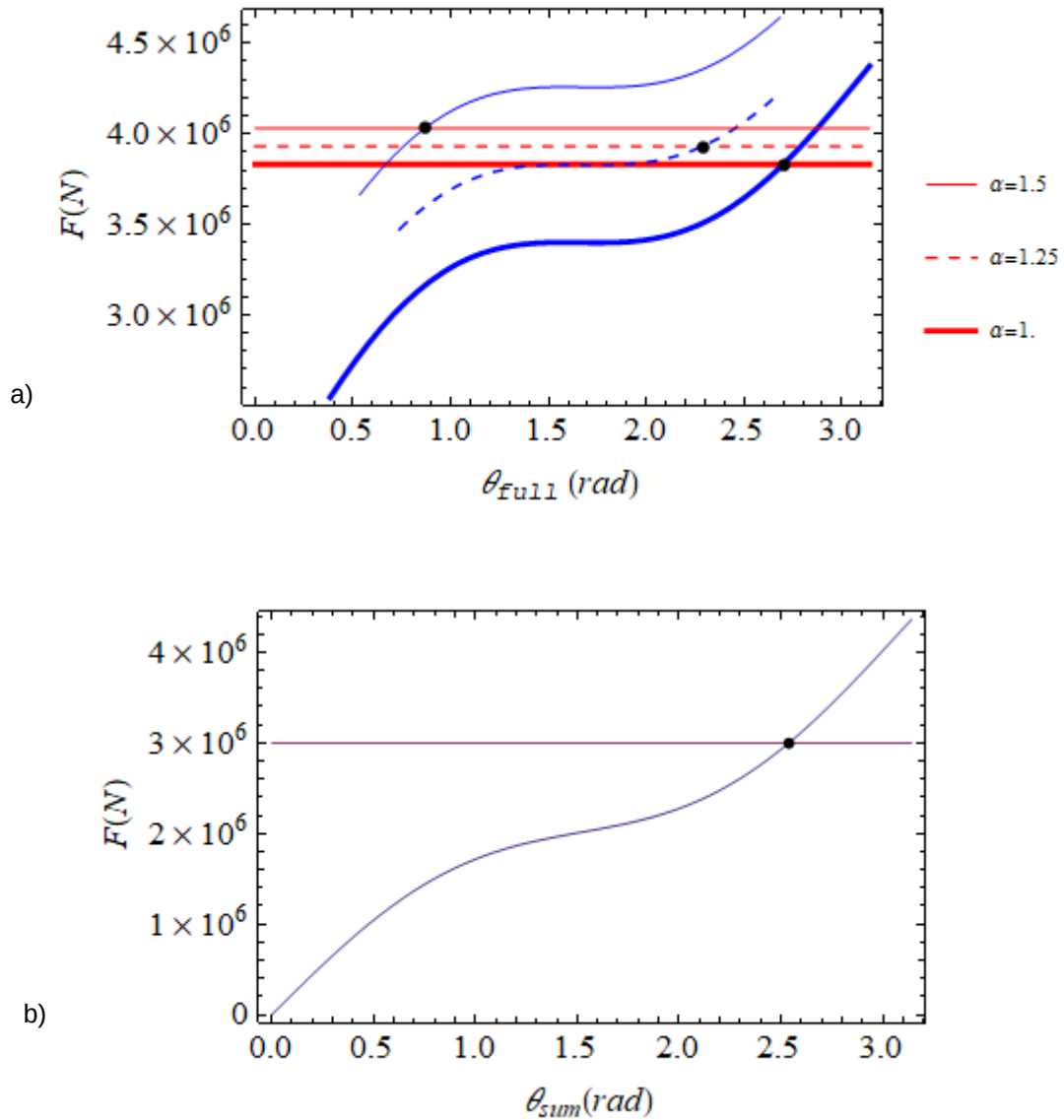


Figura 3-15 - Estudio de flotabilidad a) neutra, b) positiva para el sumergible de 4.5 m de diámetro medio

El mismo procedimiento se ha aplicado al sumergible de D=6.0 m de la Tabla 3-1. Los resultados se muestran en la Figura 3-16 y Tabla 3-3.

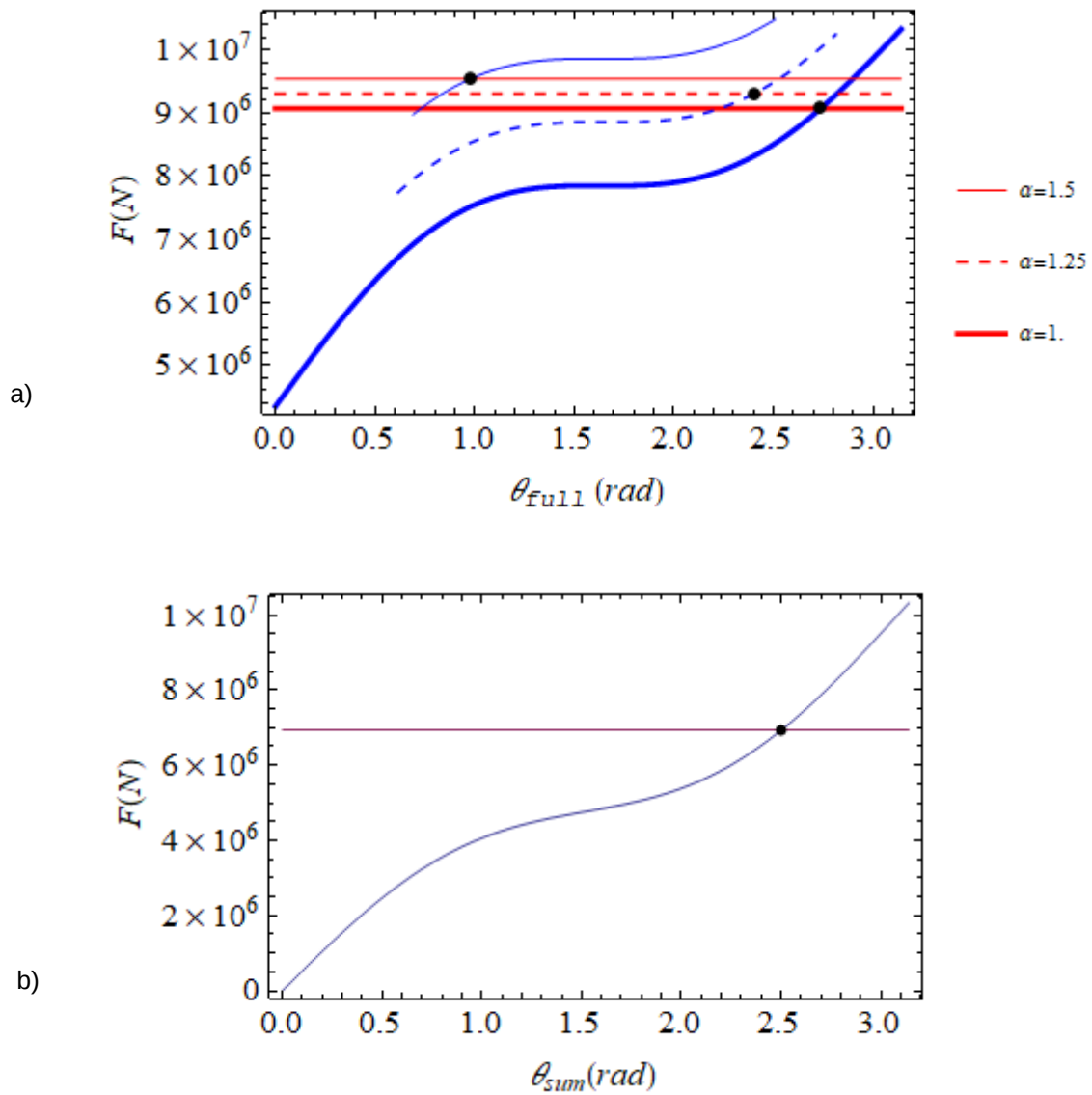


Figura 3-16 - Estudio de flotabilidad a) neutra, b) activa para el sumergible de 6 m de diámetro medio

3.6 Espesor del casco a partir de condiciones de flotabilidad

A la vista de lo anterior, se puede obtener un predimensionado del espesor del casco de hormigón a partir de condiciones de flotabilidad (ecuaciones (38) a (41)) fijando la altura del volumen de lastre (θ_{full} en Figura 3-14).

Los resultados que se muestran en la Figura 3-17 corresponden a $\theta_{full} = 50^\circ$.

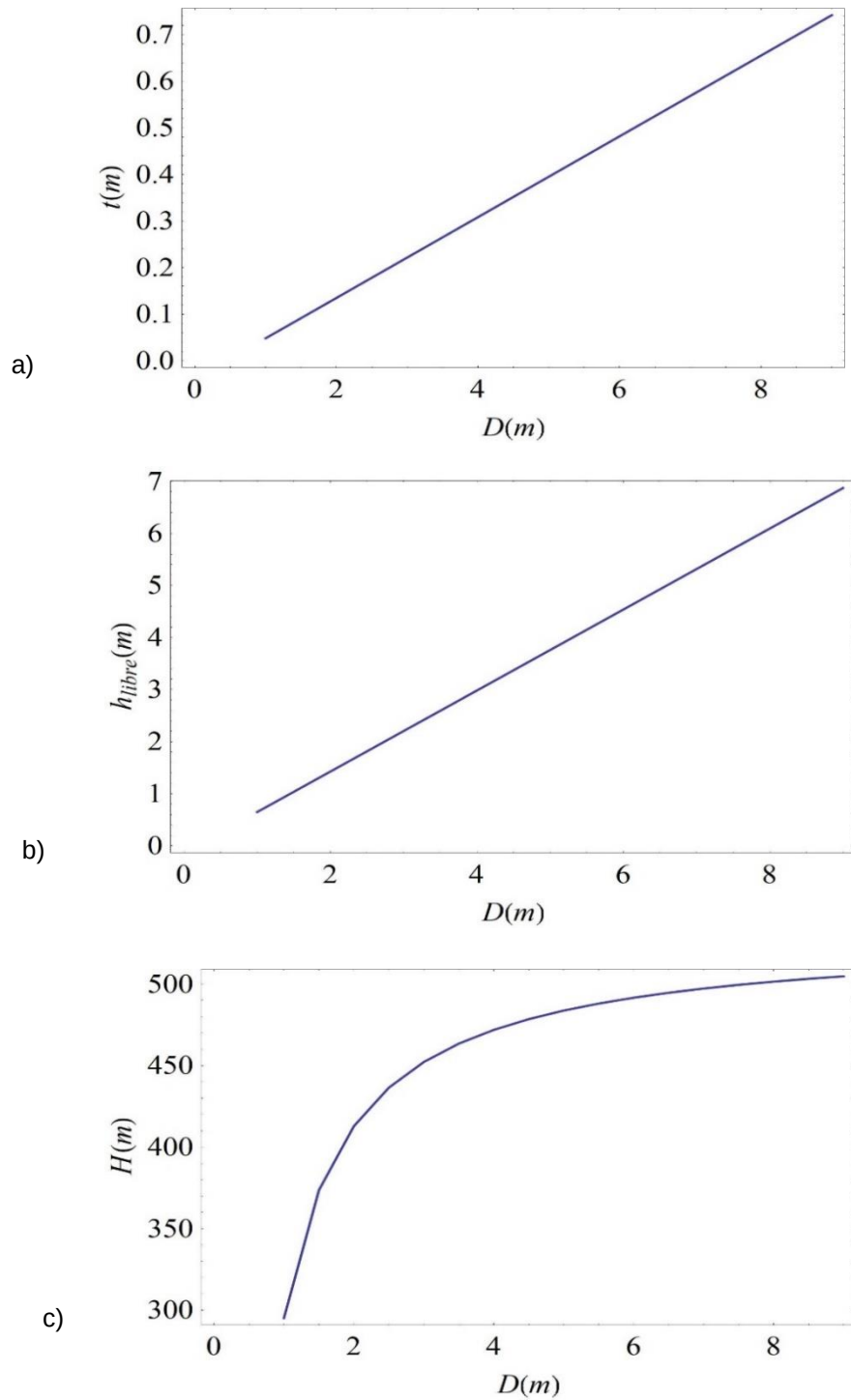


Figura 3-17 - Predimensionamiento del casco de hormigón a partir de condiciones de flotabilidad

De las figuras Figura 3-17a y Figura 3-17b se puede obtener el espesor del casco necesario en función del diámetro del sumergible, así como la altura libre disponible en el interior (ver Figura 3-14a). En la Figura 3-17c se muestra la profundidad de colapso (ecuación (36)) para las relaciones diámetro-espesor de la Figura 3-17a.

3.7 Estudio mediante elementos finitos

La estructura se ha modelizado mediante elementos lámina SHELL181 de ANSYS [34], que funciona bien para láminas curvas delgadas o moderadamente gruesas. El elemento se define por cuatro nodos y puede trabajar como placa y como lámina. En este caso consideramos que el elemento trabaja como lámina, es decir, que sólo está sometida a acciones coplanarias y, por tanto, sólo se consideran los grados de libertad traslacionales en cada nodo: UX, UY y UZ. Ver Figura 3-18.

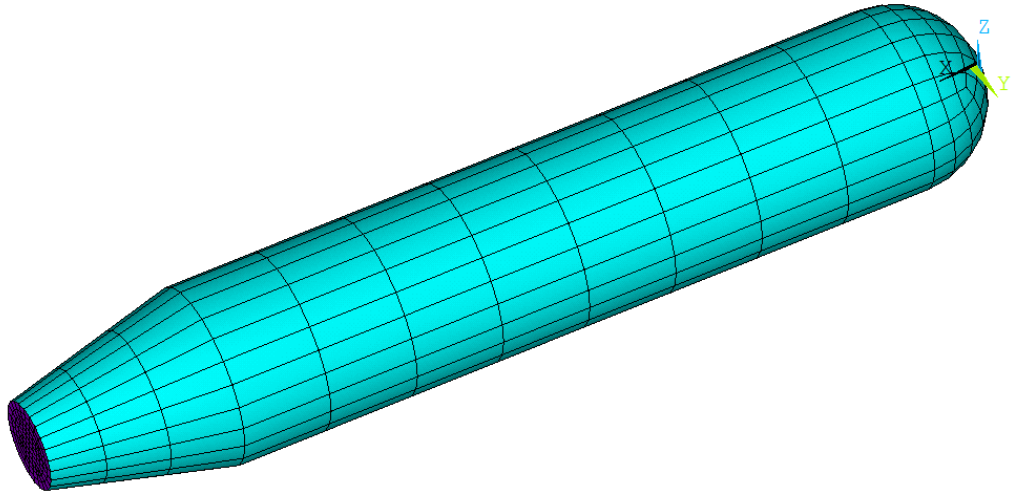


Figura 3-18 - Modelo numérico del casco de hormigón

Dado que el nivel de tensiones para la profundidad operativa prevista ($H=150$ m, ver Tabla 3-1) está muy por debajo del valor de la tensión en el hormigón por debajo de la cual el comportamiento del material se puede considerar elástico ($0.4f_{cm}=0.4*(45+8)=21.2$ MPa según el EC2 [18], Figura 3-19), se ha realizado un análisis de pandeo elástico lineal mediante elementos finitos. Para ello, una vez definido el modelo geoméricamente (ver Figura 3-18), la estructura se ha sometido a una presión hidrostática unitaria (Figura 3-19) ya que el programa calcula la carga de pandeo como un factor multiplicador de la carga aplicada.

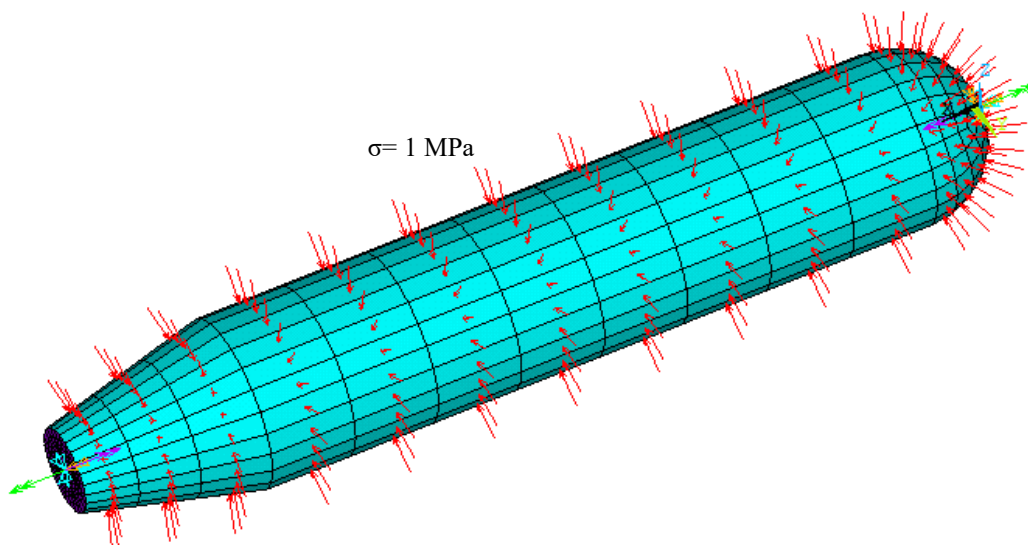


Figura 3-19 - Modelo numérico del casco de hormigón sometido a una presión hidrostática unitaria

En la Tabla 3-4 se comparan las tensiones críticas de pandeo obtenidas por la ecuación (20) y por elementos finitos (modo 1 de pandeo) para los dos ejemplos estudiados.

D (m)	t* (m)	σ_{cr} (ec. (20)) en MPa	σ_{cr} (EF) en MPa	σ_{cr} (EF) / σ_{cr} (ec. (20))
4.5	0.35	35.6	41.8	1.17
6.0	0.46	34.1	40.1	1.17

Tabla 3-4 - Tensiones críticas de pandeo de los dos cascos de hormigón estudiados

Aunque en este trabajo sólo se ha considerado el primer modo de pandeo, las deformadas correspondientes a los cuatro primeros modos de pandeo se han representado en la Figura 3-20. Dada la geometría del modelo, cada caso se ha modelado fijando el número de elementos de la malla. En los dos casos analizados se ha considerado una simetría radial con 24 elemento y diferentes particiones a lo largo del eje: 8 elementos en el tramo central cilíndrico, 3 en el tronco de cono y 5 en la semiesfera de ambos extremos. La deformada correspondiente a los distintos modos de pandeo es autoescalada por el programa: 1.65 para los modos 1 y 3 y 1.17 para los modos rotacionales 2 y 4.

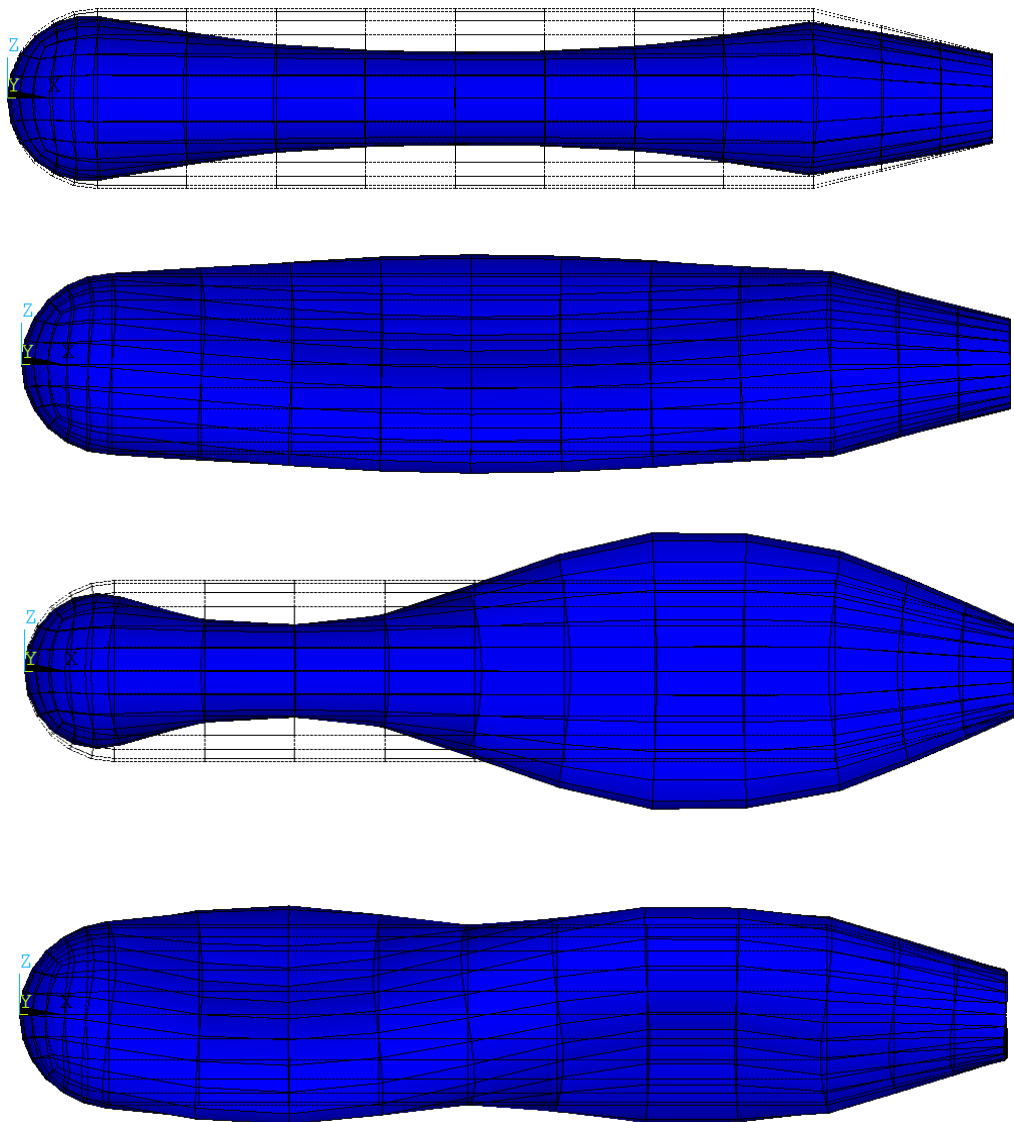


Figura 3-20 - Cuatro primeros modos de pandeo

Por otro lado, mediante elementos finitos se ha realizado un cálculo estático considerando el casco sometido a una presión hidrostática próxima a la de colapso, $H=400$ m (ver Tabla 3-4). El comportamiento no lineal del hormigón se ha considerado mediante la formulación propuesta por el EC2 [18], Figura 3-21.

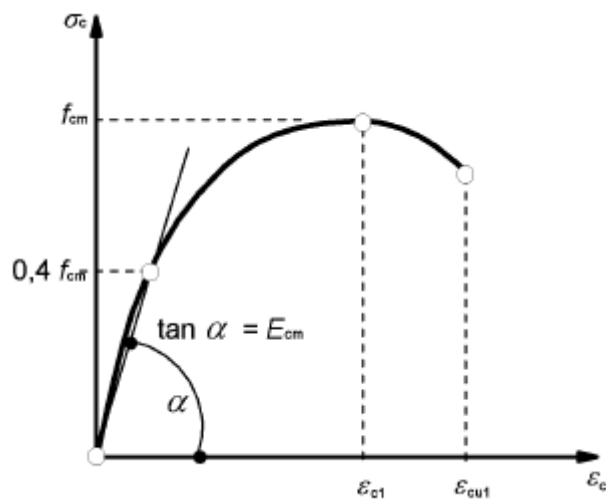


Figura 3-21 - Diagrama no lineal del hormigón propuesto por el EC2 [18]

En el modelo numérico la curva se ha definido mediante la opción “MISO”, es decir, la curva tensión-deformación del material se aproxima por tramos lineales que parten del punto (0,0). El primer punto de la curva define el módulo de elasticidad del material y, dado que por temas de convergencia no se pueden definir tramos de la curva con pendientes decrecientes, una vez alcanzada la tensión máxima la curva tensión-deformación del material se define con una recta horizontal (Figura 3-22).

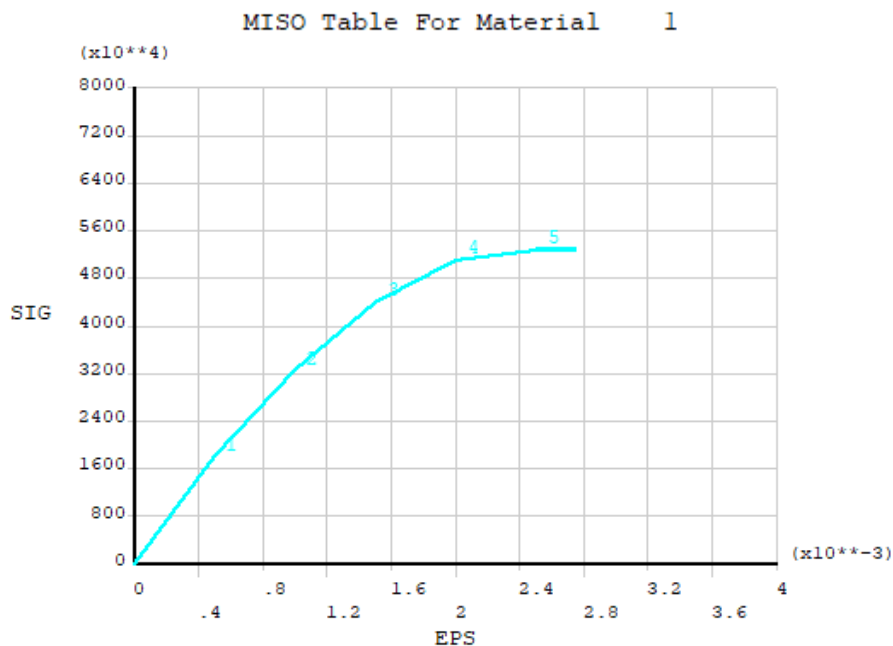


Figura 3-22 - Curva tensión-deformación no lineal del material (tensiones en N/m^2) definida en el modelo numérico

En la Figura 3-23 se muestran los valores obtenidos para la tensión principal de compresión (negativa) a nivel de la superficie media del elemento en el casco de las dos estructuras estudiadas sometidas a una presión hidrostática correspondiente a una profundidad de 400 m. Como se puede ver, se alcanzan valores máximos de 43.9 MPa en algunos elementos de la esfera frontal pero los valores medios están dentro del rango admisible de tensiones ($< f_{cm} = 45 + 8 = 53 \text{ MPa}$, [18]).

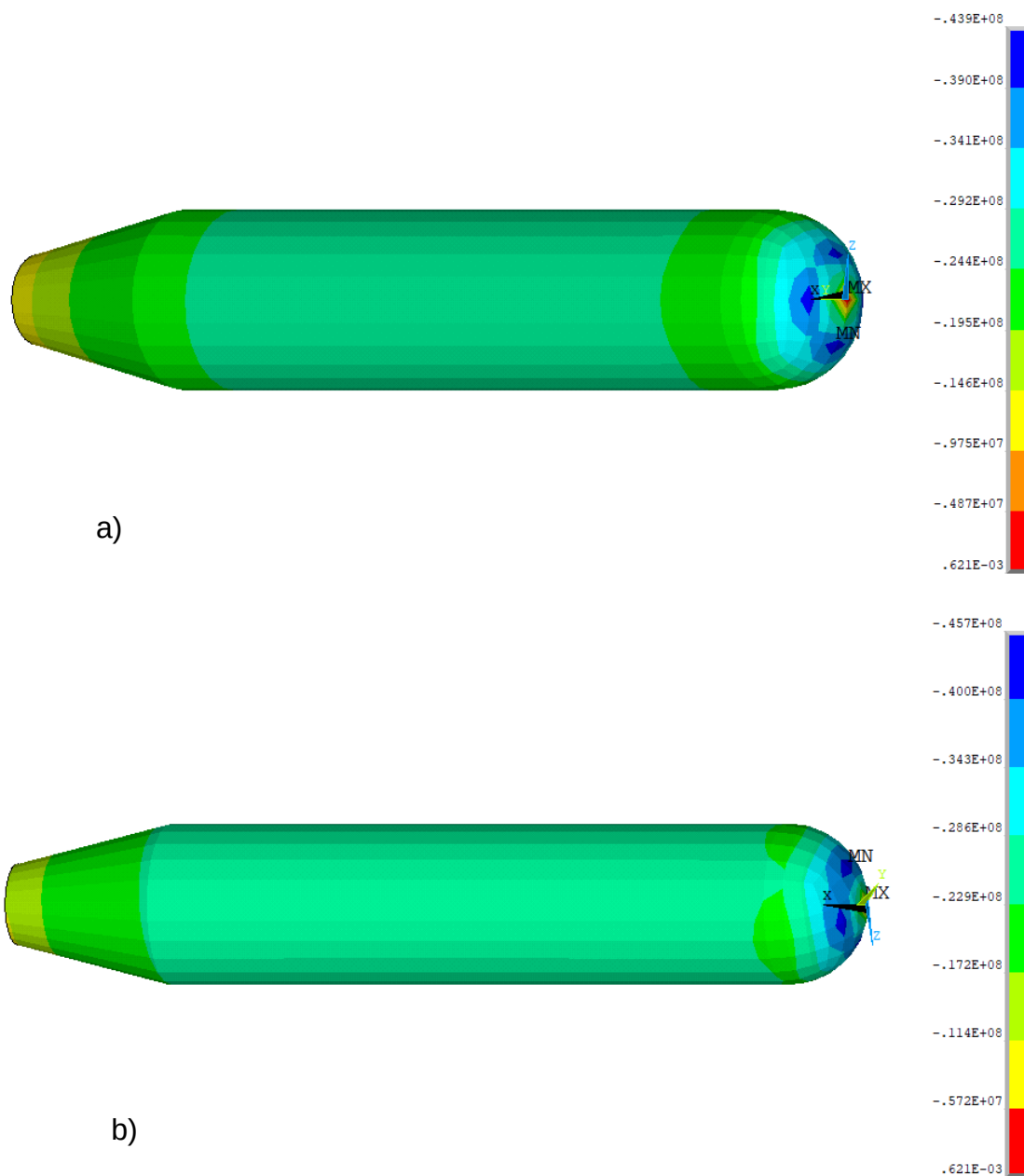


Figura 3-23 - Tensión principal de compresión (en N/m²) para los casos: a) D=4.5 m y t=0.35 m y b) D=6 m y t=0.46 m

4 MODELO DE CONSTRUCCIÓN

4.1 Tubos de hormigón armado

En ingeniería civil es muy frecuente el uso de tubos de hormigón armado. De hecho, en la construcción de canalizaciones enterradas se emplean tubos de hormigón con armadura interior de acero que pueden aguantar las altas cargas asociadas a grandes recubrimientos de terreno y al tráfico rodado pesado.

Los tubos empleados en ingeniería civil están sujetos a normativa específica [35], [36], aplicable a tubos de hasta 3 m de diámetro interior. Como referencia, el valor del espesor mínimo (medido al menos a 50 mm del extremo macho, salvando la zona que afecta a la geometría de la unión del tubo, en tres posiciones equidistantes sobre el diámetro del tubo) recomendado por la norma UNE127916:2020 [37] para tubos de hormigón armado de 3 m de diámetro interior es de 0.3 m, que está en consonancia con los valores deducidos para los cascos estudiados.

La durabilidad de los tubos circulares de hormigón armado y de sus uniones en ingeniería civil se garantiza de forma específica mediante el cumplimiento de ciertas condiciones [35], que pueden servir como referencia para futuros usos de cascos de submarinos como se propone en este estudio:

- un valor máximo de la relación agua/cemento (no debe sobrepasar 0,45 para el hormigón perfectamente compactado);
- un valor máximo del contenido de ion cloro del hormigón (inferior a 0.4% respecto a la masa de cemento);
- un valor máximo de la absorción del agua de hormigón (la absorción de agua del hormigón no debe exceder del 6% de la masa. Este valor se deduce por inmersión del hormigón endurecido, la absorción se define como la diferencia entre la masa de una probeta sumergida en el agua y la masa de esa misma probeta una vez seca, en relación con la masa en estado seco);
- conformidad con los criterios de uno de los cuatro métodos propuestos para demostrar la durabilidad de las juntas (cada junta debe ser comprobada para la combinación más desfavorable dentro de las tolerancias permitidas);
- un valor mínimo de recubrimiento en el caso de elementos de hormigón armado (que dependerá de las condiciones de uso).

Los tubos de hormigón armado empleados en ingeniería civil se someten a ensayos regulares de aplastamiento y de estanquidad.

Las condiciones del ensayo para determinar la resistencia de aplastamiento, F_n , se representan en la Figura 4-1.

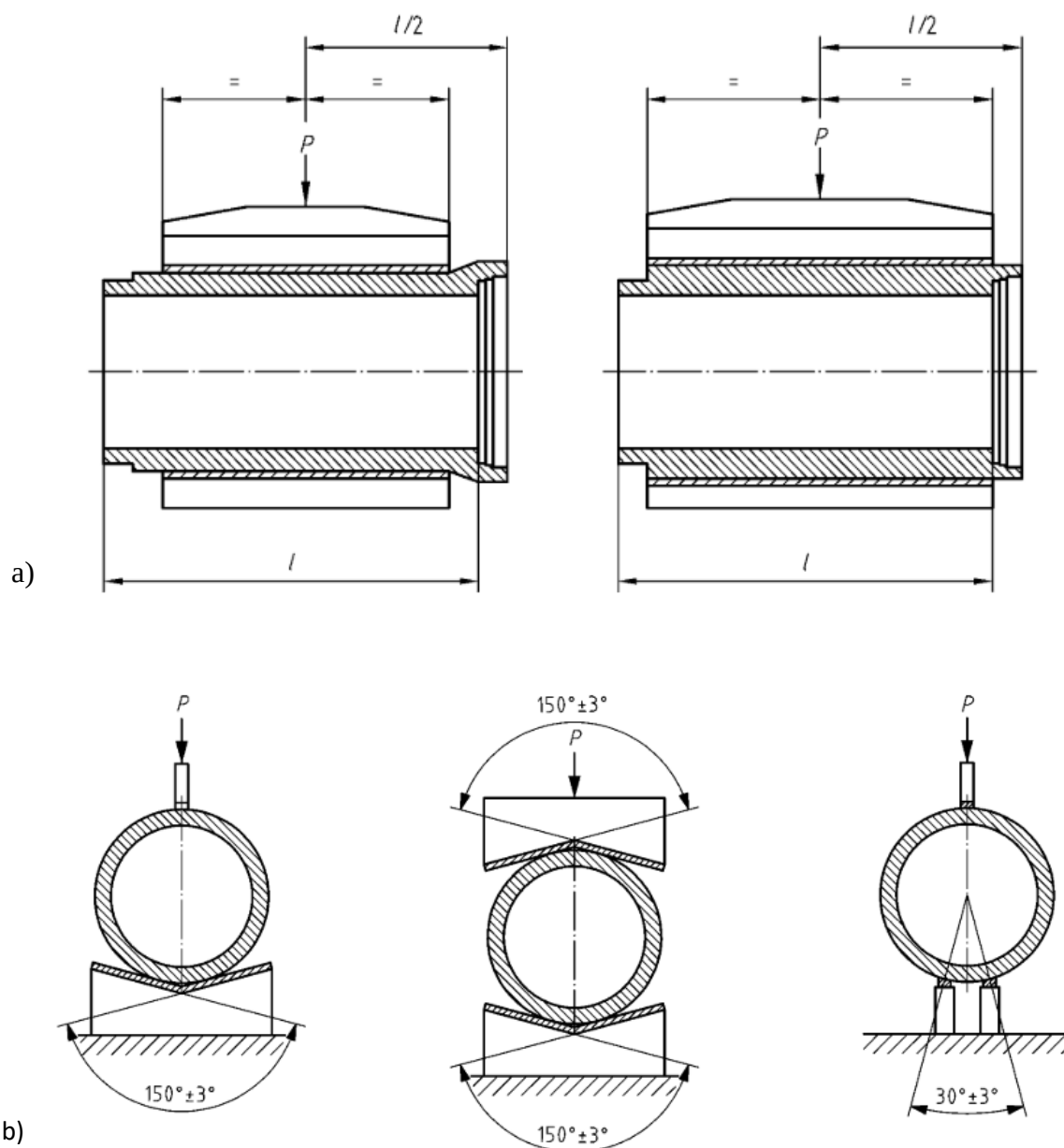
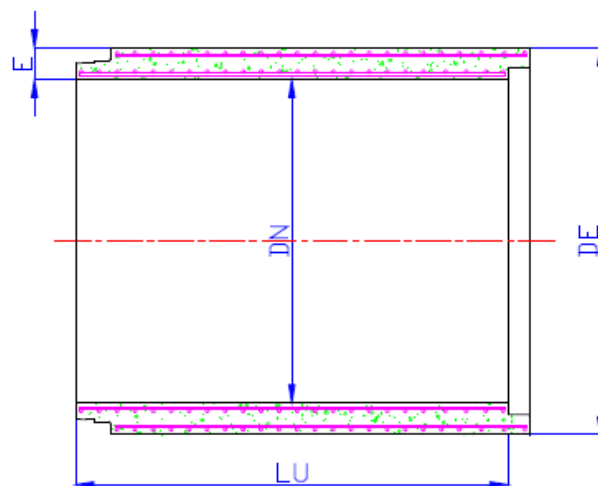


Figura 4-1 - a) Apoyos inferior y superior para el ensayo de aplastamiento. b) Tipos de disposiciones para el ensayo de aplastamiento de tubos circulares. Adaptada de [21].

Además, el tubo de hormigón armado deberá resistir una carga de prueba (fisuración) F_c de $0,67 F_n$ sin que aparezcan, en las zonas traccionadas del hormigón, fisuras estabilizadas de más de 0.3 mm sobre una longitud de 300 mm o más [35].

Las armaduras del tubo serán mallas de acero soldable. Las armaduras pueden ser lisas, con muescas, perfiladas o corrugadas y se dimensionarán para la carga mínima del ensayo de aplastamiento.

El porcentaje mínimo de armadura, relativo a la sección longitudinal del fuste, debe ser del 0.4% para los aceros lisos y del 0.25% para los aceros con muescas, perfilados o corrugados. Se pueden utilizar una o varias jaulas de armaduras, constituidas por espirales, por cercos concéntricos o fabricadas a partir de parrillas soldadas sólidamente unidas. Las armaduras periféricas deben estar repartidas a lo largo del elemento en intervalos regulares. En la Figura 4-2 se puede ver un detalle de la ficha técnica de un tubo de hormigón armado con doble malla de armadura comercializado.



DN (mm)	DE (mm)	E (mm)	LU (mm)	PESO (kg/ml)
1.600	1.940	170	2.400	2.370
1.800	2.180	190	2.400	3.010
2.000	2.400	200	2.400	3.350
2.500	3.000	250	2.400	5.250
3.000	3.600	300	2.400	7.775

Figura 4-2 - Ficha técnica de un tubo de hormigón armado comercializado por Prefabricados Alberdi [38]

En ingeniería civil, la unión entre dos porciones de tubo comprende un extremo macho, un extremo hembra (que puede estar contenido en el espesor de pared o no) y una junta de estanquidad. La estanquidad de la junta debe de haber sido comprobada experimentalmente para la combinación más desfavorable de las tolerancias posibles (según el Anexo A (Normativo) de la norma UNE-EN 1916:2008 [35] titulado “Métodos de ensayo y de cálculo para las juntas de estanquidad”). Ver Figura 4-3 y Figura 4-4.



Figura 4-3 - Tubo machihembrado de hormigón armado. Adaptado de [38]



Figura 4-4 - Junta elástica de estanqueidad para tubo de hormigón comercializada por Algaher [39]

En los tubos empleados para la estructura objeto de estudio, el machihembrado de los tubos se reducirá al máximo o incluso se anulará con objeto de evitar los puntos de debilidad de la sección al introducir el efecto del pretensado. Además, la junta será rectangular y abordará la totalidad del espesor del tubo (ver Figura 4-4).

4.2 Postesado externo no adherente

La tecnología del hormigón pretensado consiste en verter el hormigón en moldes con armaduras tensadas, sometidas a una tracción aplicada con gatos. Una vez endurecido el hormigón, el efecto del pretensado comprime el elemento estructural. El efecto del pretensado mejora la durabilidad del hormigón ya que previene la fisuración y, por tanto, la posibilidad de corrosión del acero se reduce.

Alternativamente, el hormigón se puede postesar. En este caso las armaduras se tensan una vez el hormigón ha endurecido y adquirido su resistencia característica. Los cables o barras de acero de postesado se suelen ubicar en tubos embutidos en el hormigón y cuyo trazado ha sido minuciosamente estudiado. Una vez tensada la armadura, se usan elementos mecánicos para mantener la tensión en los cables o barras. Como en el caso del pretensado, el efecto del postesado sobre el elemento estructural es una compresión que ayuda a contrarrestar las tracciones inducidas por las cargas exteriores.

Una vez finalizado el anclaje de la armadura postesa, existen dos posibilidades:

- a) Rellenar los conductos en los que se ubica la armadura tensada (armadura activa) con mortero de cemento de alta resistencia a presión con objeto de permitir la adherencia entre la armadura con el conducto, o
- b) no rellenar los conductos que contienen la armadura activa, quedando la conexión armadura activa-hormigón limitada a las placas de anclaje situadas en ambos extremos (ver Figura 4-5).



Figura 4-5 - Detalle de placa de anclaje en elemento postesado

La primera opción se denomina postensado adherente y la segunda postensado no adherente. La principal ventaja del postensado adherente frente al no adherente, en lo que a durabilidad se refiere, es que en el primero el mortero de cemento protege a la armadura activa frente a la corrosión.

4.3 Propuesta de construcción

El modelo constructivo propuesto consiste en una construcción modular, similar a la habitualmente empleada en la construcción de canalizaciones enterradas. Para mantener la forma aerodinámica del exterior del casco, en este estudio se van a considerar tubos con superficie exterior plana (ver Figura 4-1 y Figura 4-3).

Una vez alineado el número de segmentos de tubo necesarios para alcanzar la longitud central cilíndrica de la estructura se conectarán entre sí y con los módulos de ambos extremos mediante un

sistema de postesado no adherente con barras roscadas tipo DYWIDAG, que tienen una considerable capacidad resistente a cortante [40]. Ver de Figura 4-6 a Figura 4-8.

Las barras DYWIDAG tienen nervios de rosca gruesa que no se extienden completamente alrededor de la circunferencia de la barra. Por tanto, la barra es insensible a daños y resulta fácil de limpiar. Además, el gran paso de rosca permite un montaje y desmontaje rápido de las piezas de conexión y anclaje. La elevada resistencia de este tipo de barras les confiere una alta capacidad de carga en relación a su peso por metro. Dado que esta barra es ampliamente empleada en obras tales como puentes, existe una amplia gama de accesorios disponibles en todos diámetros (ver Figura 4-9).



Figura 4-6 - Barra roscada tipo DYWIDAG y esquema de fijación [26]

Para proteger las barras frente a corrosión, éstas se ubicarán en unos huecos previstos en los módulos de la estructura en las zonas inundables. El sistema constructivo propuesto no es demasiado caro dado que, una vez contruidos los moldes para hormigonar los distintos módulos, su construcción en serie abarata los costes. Por otro lado, no se requeriría de mano de obra altamente especializada para el ensamble/desmontado de la estructura.

La principal ventaja de las barras no adherentes es que éstas pueden tensarse y destensarse en cualquier momento, lo que facilita el montaje y desmontaje de la estructura para reparaciones o sustituciones de alguno de los módulos de hormigón o incluso para reemplazo de las propias barras.

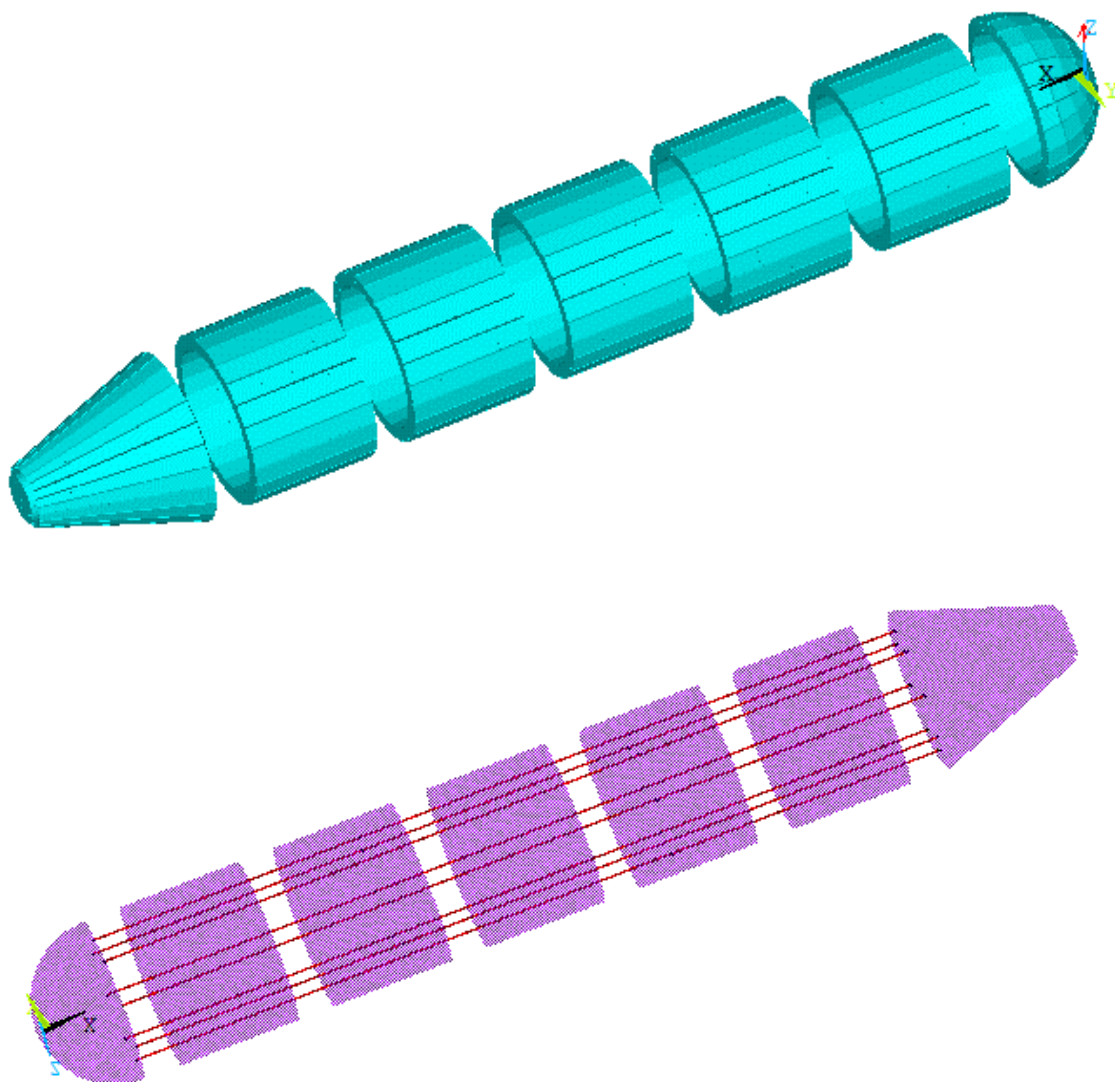


Figura 4-7 - Construcción propuesta y esquema del ensamblaje de los módulos mediante barras roscadas postesadas.

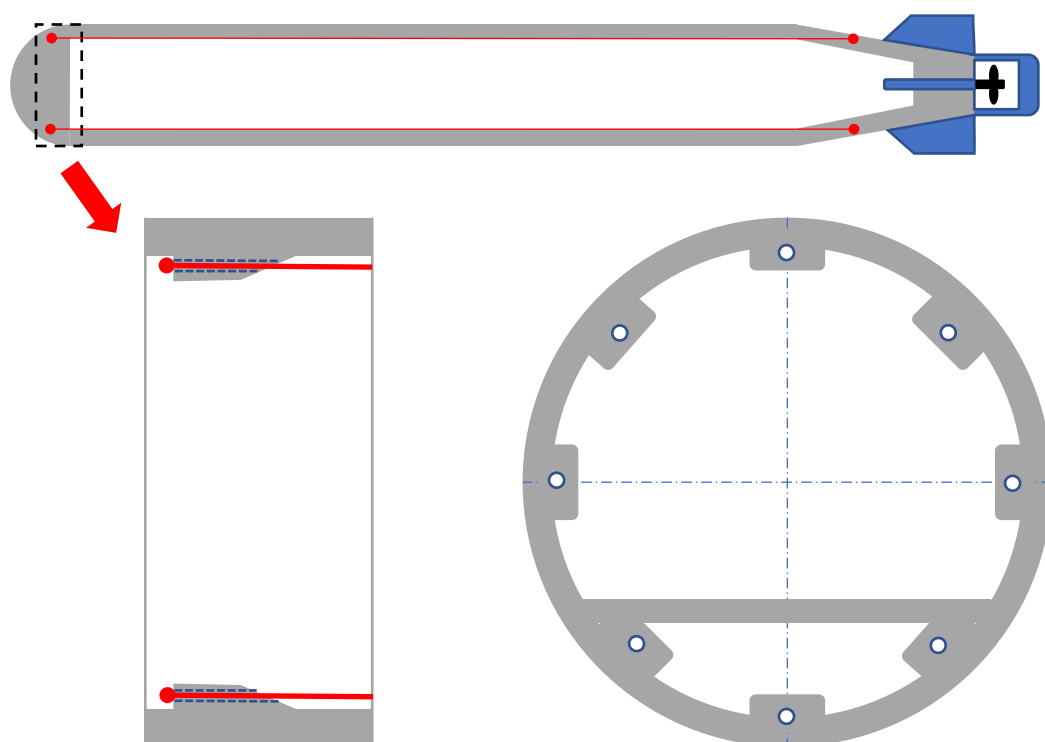


Figura 4-8 - Detalles constructivos de la estructura propuesta. Adaptada de [41]

En la Figura 4-9 se resumen las características técnicas de las barras DYWIDAG soldables:

Referencia	Ø (mm)	Carga de rotura	Capacidad de Carga	Peso (kg/m)
12 FS 0000	12/14	60	30	1,00
15 FS 0000	15/17	170	80	1,50
15 VA 0000*	15/17	140	70	1,50
20 FS 0000	20/23	275	140	2,60
26 ES 0000	26,5/30	500	240	4,56

Figura 4-9 - Características técnicas de las barras DYWIDAG soldables [40], con los valores de carga en MPa.

La barra señalada con un asterisco en la Figura 4-9 es de acero inoxidable, lo que puede ser también interesante para su uso en las estructuras objeto de estudio. Es importante señalar que las barras que se comercializan cumplen con la norma europea correspondiente: European Technical Assessment ETA-05/0123 [42].

El procedimiento propuesto es novedoso ya que otros autores proponen pretensado radial y postesado longitudinal mediante cables de los módulos que componen la estructura [43], lo que dificulta la conexión de los distintos módulos.

4.4 Flotabilidad negativa

En el Apartado 3.4 (más atrás) el predimensionamiento de la estructura del casco se hizo sólo en base a condicionamientos de flotabilidades positiva y neutra.

La tercera condición de flotabilidad, denominada flotabilidad negativa, corresponde al caso en el que el cuerpo sumergido tiende a hundirse, lo que significa que el peso es mayor que la fuerza de

flotabilidad. Este caso es interesante en situaciones en las que el submarino tenga que bajar para, por ejemplo, reposar sobre el lecho marino (Figura 4-10).

Para aumentar el peso del lastre, se puede aumentar el volumen de agua almacenada en los tanques de lastre. Para ello, aprovechando la construcción modular, se puede variar la cota a la que se sitúa la losa en cada segmento de tubo para conseguir los volúmenes de lastre necesarios y permitir la maniobrabilidad de la nave. Si cada depósito situado en la cota inferior del segmento de tubo se llena o vacía de manera individual, se puede conseguir un gran juego tanto con el volumen lastrado como con su distribución (ver Figura 4-10).

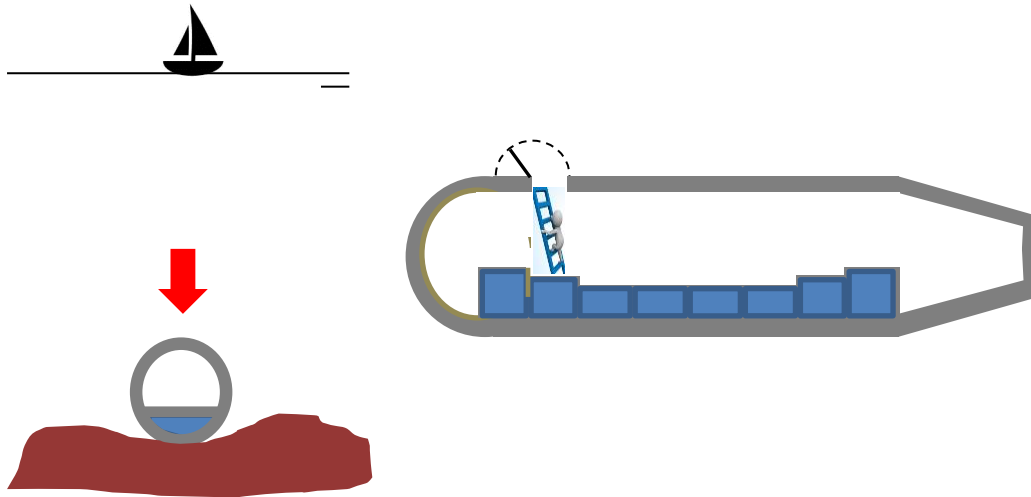


Figura 4-10 - Flotabilidad negativa. Lastre para flotabilidad.

Para remarcar la novedad de la estructura estudiada en este trabajo, en la Figura 4-11 se representa el esquema estructural de los cascos de submarinos habituales. Como se puede ver, la nave de la Figura 4-11 consta de dos cascos concéntricos entre los cuales están ubicados los tanques de lastre, que se llenan o vacían de agua según el tipo de maniobra que se pretenda realizar.

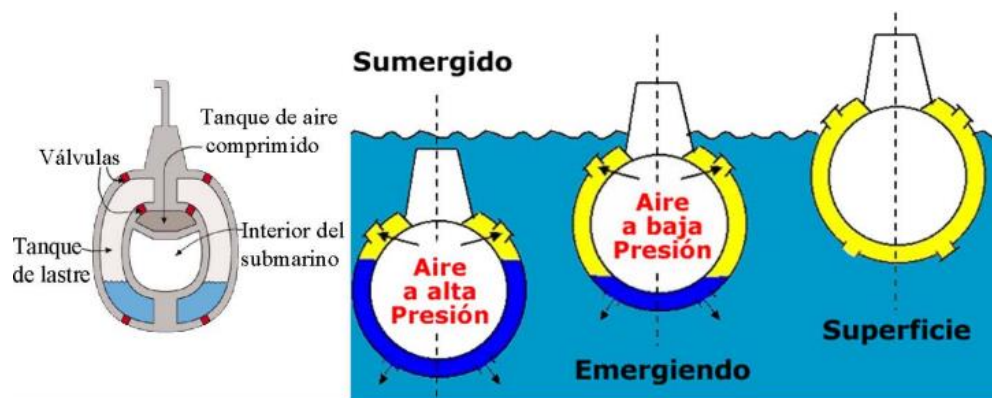


Figura 4-11 - Esquema estructural del submarino y un esquema donde se muestra cómo se sumerge y emerge

4.5 Detalles de armado

Los esfuerzos para el diseño de la armadura se han obtenido a partir del modelo numérico. El elemento empleado es el Shell181, cuya nomenclatura es la indicada en la Figura 4-12.

Figure 181.3: SHELL181 Stress Output

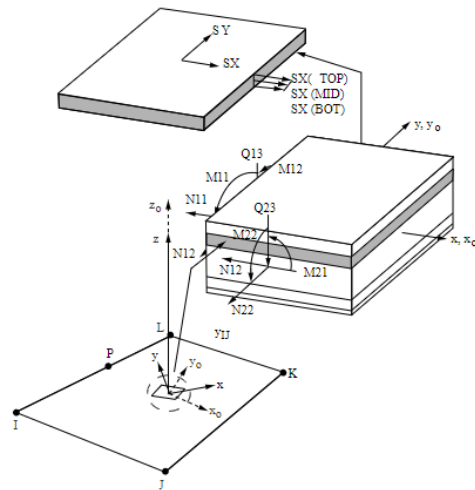


Figura 4-12 - Elemento Shell 181 [34]

La situación más desfavorable para dimensionar la armadura corresponde a submarino vacío y fuera del agua. En esa situación la sección transversal está sometida a su propio peso y las distribuciones de momentos flectores y esfuerzos cortantes para el caso de la estructura de diámetro medio de 6 m dimensionada según la Figura 3-17 son las indicadas en la Figura 4-13.

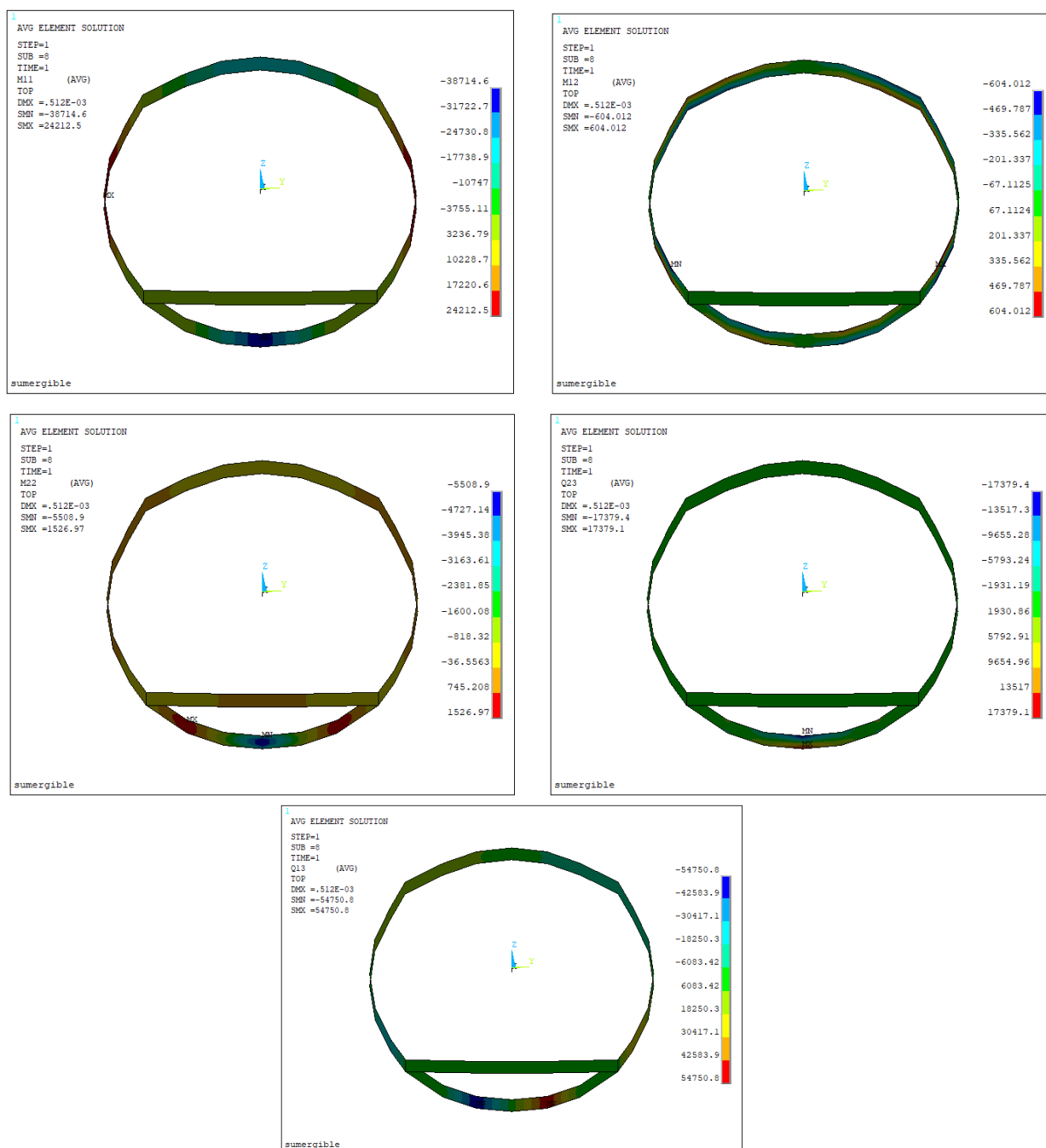


Figura 4-13 - Esfuerzos en la rebanada

4.5.1 Armado frente a momentos flectores

El momento flector máximo es de 38715 N·m, cuyo valor de diseño es de 58700 N·m. La armadura diseñada es una malla electrosoldada de acero inoxidable de barras de diámetro 10 mm separadas 0.10 m, que se colocará en el centro de la sección transversal. Los cálculos realizados se pueden ver en el Anexo III: Cálculo armado momentos flectores.

4.5.2 Armado frente a cortante

De acuerdo al Eurocódigo 2 [44] §8.2.1(1), no es necesario disponer armadura de cortante si:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rdc,min} = \frac{11}{\gamma_V} \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}} \frac{d_{dg}}{d}} \quad (42)$$

siendo:

γ_V un coeficiente parcial de seguridad para el diseño de cortante. Según la Tabla 4.3(NDP) de EN1992[45], $\gamma_V = 1.4$ para situaciones de proyecto persistentes y transitorias.

$d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{lower} \leq 40 \text{ mm}$, siendo D_{lower} un parámetro relativo al tamaño del árido, aquí se ha adoptado $D_{lower} = 20 \text{ mm}$ (ver [6]).

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot b_w} \leq \tau_{Rdc,min} = \frac{11}{\gamma_V} \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}} \frac{d_{dg}}{d}} = \frac{11}{1.4} \sqrt{\frac{50}{500/1.15} \frac{16+20}{d}} = 1.05$$

$$\Rightarrow V_{Rdc,min} = \tau_{Rdc,min} z b_w = 218208 \text{ N}$$

Por tanto, no es necesario disponer armadura de cortante.

4.6 Sobre instalaciones

El objetivo de este TFG no es el diseño del prototipo del submarino, sin embargo, se ha creado uno teniendo en cuenta todas las consideraciones previas. La Figura 4-14 cuenta con la omisión de parte del casco para permitir visualizar su interior. En el Anexo IV: Planos y vistas del diseño del submarino se pueden observar planos y la construcción modular de este submarino.

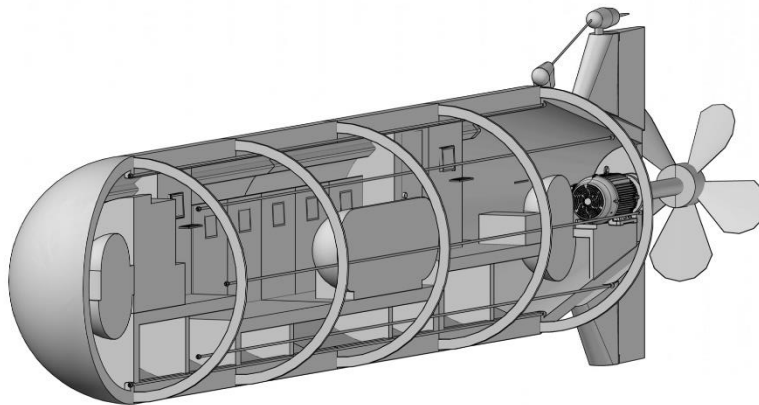


Figura 4-14 - Diseño del submarino estudiado de 6m de diámetro

Se observa que en el diseño del prototipo del submarino se han aplicado las consideraciones previamente estudiadas, como la inclusión de agua de lastre a distintos niveles y el uso del postesado no adherente. Cabe destacar que el motor, la hélice y el sonar también forman parte del diseño, pero estos elementos son irrelevantes para el objetivo de este TFG.

5 CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

La conclusión final de este TFG es que la construcción de submarinos de hormigón se presenta como una alternativa altamente viable desde el punto de vista estructural, medioambiental, social (Anexo II: Implicaciones medioambientales y sociales) y económico (Anexo I: Implicaciones económicas). Esto se traduce en un ahorro significativo sin comprometer la seguridad en la navegación a grandes profundidades. Asimismo, se ha podido constatar que la construcción de diámetros de 4,5 y 6 metros no presenta ningún tipo de riesgo estructuralmente hablando.

En cuanto a las líneas futuras de esta investigación, se podrían considerar diversos aspectos que podrían enriquecer la propuesta de construcción de submarinos de hormigón. Por ejemplo, sería interesante profundizar en la optimización del diseño estructural de estos submarinos, a fin de mejorar su rendimiento y eficiencia. Asimismo, sería relevante continuar con la evaluación experimental de estos submarinos en distintas condiciones de navegación, a fin de tener una mayor certeza acerca de su desempeño en situaciones reales. Además, podría ser interesante investigar sobre los posibles usos que se le pueden dar a los submarinos de hormigón en el ámbito militar y civil, para así ampliar su potencial campo de aplicación. En resumen, se abren diversas líneas de investigación futura que permitirían profundizar en el conocimiento y la utilidad de esta alternativa de construcción de submarinos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. E. C. H. España, “Blog TECH Universidad Tecnológica.” [Online]. Available: <https://www.techtitute.com/ingenieria/blog/disenio-conceptual-buques>.
- [2] “First Submarine | Science and the Sea.” <https://www.scienceandthesea.org/program/first-submarine> (accessed Mar. 14, 2023).
- [3] W. A. Nash, “Chapter 1 - A Brief history of submersibles,” in *Hydrostatically Loaded Structures. The Structural Mechanics, Analysis and Design of Powered Submersibles*, 1st Editio., N. WABT-HLS, Ed. Pergamon, Oxford, pp. 1–13.
- [4] W. A. Nash, “Chapter 3 - Structural behavior of cylindrical shells,” in *Hydrostatically Loaded Structures. The Structural Mechanics, Analysis and Design of Powered Submersibles*, 1st Editio., N. WABT-HLS, Ed. Pergamon, Oxford, pp. 51–78.
- [5] “FILANAVAL: Partes de un submarino.” <https://filanaval.blogspot.com/2021/04/partes-de-un-submarino.html> (accessed Mar. 09, 2023).
- [6] “The Different Materials Used In Submarines Today – ussjpkennedyjr.org.” <https://www.ussjpkennedyjr.org/the-different-materials-used-in-submarines-today/> (accessed Mar. 03, 2023).
- [7] “Fabricante de Grados navales de buena calidad | Bozhong Metal Group.” http://es.bzmetal.com/product_detail/naval-grades-14955902997090275.html (accessed Mar. 03, 2023).
- [8] “El acero en la construcción naval.” <https://blog.laminasyaceros.com/blog/el-acero-en-la-construccion-na-val> (accessed Mar. 03, 2023).
- [9] “Composite materials – extensive expertise and experience.” <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/innovations/composite-materials> (accessed Mar. 03, 2023).
- [10] “<https://vdocuments.mx/history-of-submarine-composites.html?page=3>.”
- [11] J. B. Alferts, “Plastics in ships,” *Nav Sh Syst Command Tech News*, vol. 15, pp. 5–8, 1966.
- [12] X. Wu, Y. Gao, and Y. Wang, “Recent developments on epoxy-based syntactic foams for deep sea exploration,” *J Mater Sci*, vol. 56, pp. 2037–2076, 2021, doi: 10.1007/s10853-020-05420-w.
- [13] B. Hayman, A. Echtermeyer, and D. McGeorge, “Use of fibre composites in naval ships.” pp. 1–21, 2001.
- [14] B. C. K. A. Naidu and C. N. Devi, “Design and structural analysis of submarine pressure hull using,” vol. 5, pp. 363–365, 2018.
- [15] A. P. Mouritz, E. Gellert, P. Burchill, and K. Challis, “Review of advanced composite structures for naval ships and submarines,” *Compos Struct*, vol. 53, pp. 21–42, 2001, doi: 10.1016/S0263-8223(00)00175-6.
- [16] Am. F. Aguirre and P. Muñoz, *The complete design of the orca300-auv*. World Conf Marit Technol.
- [17] UNE EN 206-1:2008 (2008), “Concrete —Part 1: Specification, performance, production and conformity,” *EN*, vol. 1, no. 2008.
- [18] E. C. Standardization, *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings UNE-EN 1992-1-1*. Brussels: European Committee for Standardization.

- [19] H. I. S. T. O. R. I. A. Contemporánea, “Historia Universal Los barcos de hormigón.” [Online]. Available: <https://quevuelenaltolodados.com/2019/08/06/barco-de-cemento/>
- [20] R. D. Rail, “A Decade of Ocean Testing of Pressure-Resistant Concrete Structures,” in *Oceans Conference Record (IEEE)*, pp. 593–597. doi: 10.1109/oceans.1983.1152190.
- [21] R. D. Rail and R. L. Wendt, *DTIC AD-A160 232: Long-Term, Deep-Ocean Test of Concrete Spherical Structures -Results after 13 Years*. CALIFORNIA: PORT HUENEME.
- [22] H. H. Haynes and R. D. Rail, *DTIC AD-A 176 233: Handbook for Design of Undersea, Pressure-Resistant Concrete Structures*. CALIFORNIA: PORT HUENEME.
- [23] “Submarinos de Hormigón - Info.” https://www.taringa.net/+info/submarinos-de-hormigon_1200e5 (accessed Mar. 14, 2023).
- [24] “Submarine Photo Index.” <http://www.navsource.org/archives/08/08442.htm> (accessed Mar. 14, 2023).
- [25] D. A. Smith, “Feasibility study for concrete submarine.” [Online]. Available: <https://trid.trb.org/view/28767>
- [26] H. H. Haynes and R. D. Rail, “Handbook for design of undersea, pressure-resistant concrete structures.”
- [27] H. H. Haynes, *DTIC AD-A 078 641: Design for Implosion of Concrete Cylinder Structures Under Hydrostatic Loading*. CALIFORNIA: PORT HUENEME.
- [28] S. J. Timoshenko, “Strength of Materials, Part 2.” New York.
- [29] D. F. Winderburg and C. Trilling, “Collapse by instability of thin cylindrical shells under external pressure,” Washington D.C.
- [30] S. Salahshour and F. Fallah, “Elastic collapse of thin long cylindrical shells under external pressure,” *Thin-Walled Structures*, vol. 124, pp. 81–87, doi: 10.1016/j.tws.2017.11.058.
- [31] R. v Southwell, “LX. On the collapse of tubes by external pressure —III,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 29, pp. 67–77, doi: 10.1080/14786440108635283.
- [32] N. D. Albertsen, “Influence of Compressive Strength and Wall Thickness on Behavior of Concrete Cylindrical Hulls Under Hydrostatic Loading.”
- [33] L. F. Kahn, “Influence of End-Closure Stiffness on Behavior of Concrete Cylindrical Hulls Subjected to Hydrostatic Loading.”
- [34] 20., “ANSYS. “ANSYS Academic Research Mechanical and CFD, Release 2019 R3.”
- [35] UNE-EN 1916:2008, “Tubos y piezas complementarias del hormigón en masa, hormigón armado y hormigón con fibra de acero”.
- [36] “Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, de hormigón armado y hormigón con fibra de acero,” *Complemento nacional a la Norma UNE-EN 1916:2008*, vol. 127916, no. 2017.
- [37] “Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, de hormigón armado y hormigón con fibra de acero,” *Complemento nacional a la Norma UNE-EN 1916:2008*, vol. 127916, no. 2020.
- [38] T. Prefabricados Alberdi, “Tuberías de Hormigón Armadas.” 2020. [Online]. Available: <http://www.prefabricadosalberdi.com/alberdi/de/tuberias-de-hormigon-armadas.asp?nombre=2380&cod=2380&sesion=1>

- [39] Algaher, “Juntas de estanqueidad.” 2021. [Online]. Available: <https://www.algaher.com/es/juntas-de-estanqueidad>
- [40] DYWIDAG, “Catálogo Barra and Accesorios.”
- [41] E. Hernández-Montes, “Submarino fabricado mediante segmentos prefabricados de hormigón (Solicitada, en trámite.”
- [42] Desconocido, “Unbonded External Post-Tensioning.” 2022. [Online]. Available: <https://dywidag.com/es-ES/technologies/unbonded-external-post-tensioning>
- [43] B. C. Gerwick, W. J. Talbot, K. E. Hughes, and A. L. Brown, “Modular Prestressed Concrete Marine Wessels and method of making same,”
- [44] prEN, *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures EN 1992-1-1*, vol. 1, no. 2013. Brussels: European Committee for Standardization.
- [45] prEN 1992-1-1:2013, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures EN 1992-1-1,” European Committee for Standardization, Brussels, 2022.
- [46] “▷Precio de hormigones y morteros 2022◁.” <https://autopromotor.info/construir-una-casa/precio-hormigon/> (accessed Mar. 20, 2023).
- [47] “Precio en España de m² de Estructura metálica. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.” http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Estructuras/Acero/Montajes_industrializados/Estructura_metalica.html (accessed Mar. 20, 2023).
- [48] “Cascos de submarinos | www.elSnorkel.com.” <https://www.elsnorkel.com/2014/06/cascos-de-submarinos.html> (accessed Mar. 20, 2023).
- [49] “Catálogo de fabricantes de Steel Plate Price Shipbuilding de alta calidad y Steel Plate Price Shipbuilding en Alibaba.com.” <https://spanish.alibaba.com/g/steel-plate-price-shipbuilding.html> (accessed Mar. 20, 2023).
- [50] “Placa de construcción naval: comprar al fabricante Metinvest.” <https://metinvestholding.com/es/products/plates/shipbuilding-plate> (accessed Mar. 20, 2023).
- [51] Desconocido, “Cement and Concrete: The Environmental Impact.” 2020. [Online]. Available: <https://psci.princeton.edu/tips/2020/11/3/cement-and-concrete-the-environmental-impact>
- [52] P. Banstola, K. K. Shrestha, and A. Mishra, “Environmental Impacts of Concrete.” doi: 10.24321/2393.8307.202106.
- [53] Xunta de Galicia, “Anuncio del 27 de diciembre de 2002 por el que se somete a información pública la autorización ambiental integrada para la actividad de fabricación de hormigón.” 2002. [Online]. Available: https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2002/20021227/Anuncio17DF6_es.html

ANEXO I: IMPLICACIONES ECONÓMICAS

La investigación llevada a cabo en la Universidad de California en Berkeley en 1974, financiada por el “Naval Undersea Center” (San Diego, California) ya concluyó que el casco de presión de hormigón costaría entre el 50% y el 60% del casco de acero equivalente [25]. Teniendo en cuenta que en dicha investigación no se consideró construcción modular, que abarata los costes, el casco estructural propuesto supone una gran ventaja desde el punto de vista económico.

Para estimar el precio del submarino de hormigón objeto de este proyecto se van a considerar los siguientes precios unitarios:

Hormigón armado fabricado en central: 135 €/m³ [46].

Chapa de acero estructural para encofrados: 195 €/m² [47].

Dado que los encofrados se pueden reutilizar, en la Figura A-1 el precio de éstos se ha dividido entre el número de unidades construidas. Los precios representados en la Figura A-1 corresponden a valores de D= 4.5 y 6 m con los espesores representados en la Figura 3-17a. En la figura, se han representado los precios unitarios por submarino en función del número de unidades construidas, hasta 50. Como se puede apreciar, la parte del coste correspondiente a los encofrados queda totalmente amortizada cuando se han construido las 50 unidades por lo que la construcción de cascos de hormigón se abarata si se recurre a la producción en serie de un modelo de casco determinado.

Para comparar, en la Figura A-1 también se incluye el precio medio correspondiente a un casco de acero, obtenido a partir del precio del material a granel como:

$$CMg = 1.10 \times 1.15 \times 1.10 \times 685.15 = 953.4 \text{ €/Ton} \quad (43)$$

En la Figura A-1 se ha considerado un espesor de chapa de acero naval de 18 mm [48] y $\gamma=7.85$ Ton/m³. En la Figura A-1 se aprecia como el casco de acero es considerablemente más caro que el equivalente de hormigón aun cuando el precio considerado para el acero naval (ecuación (43)) es muy inferior al de mercado, hasta seis veces [49], [50].

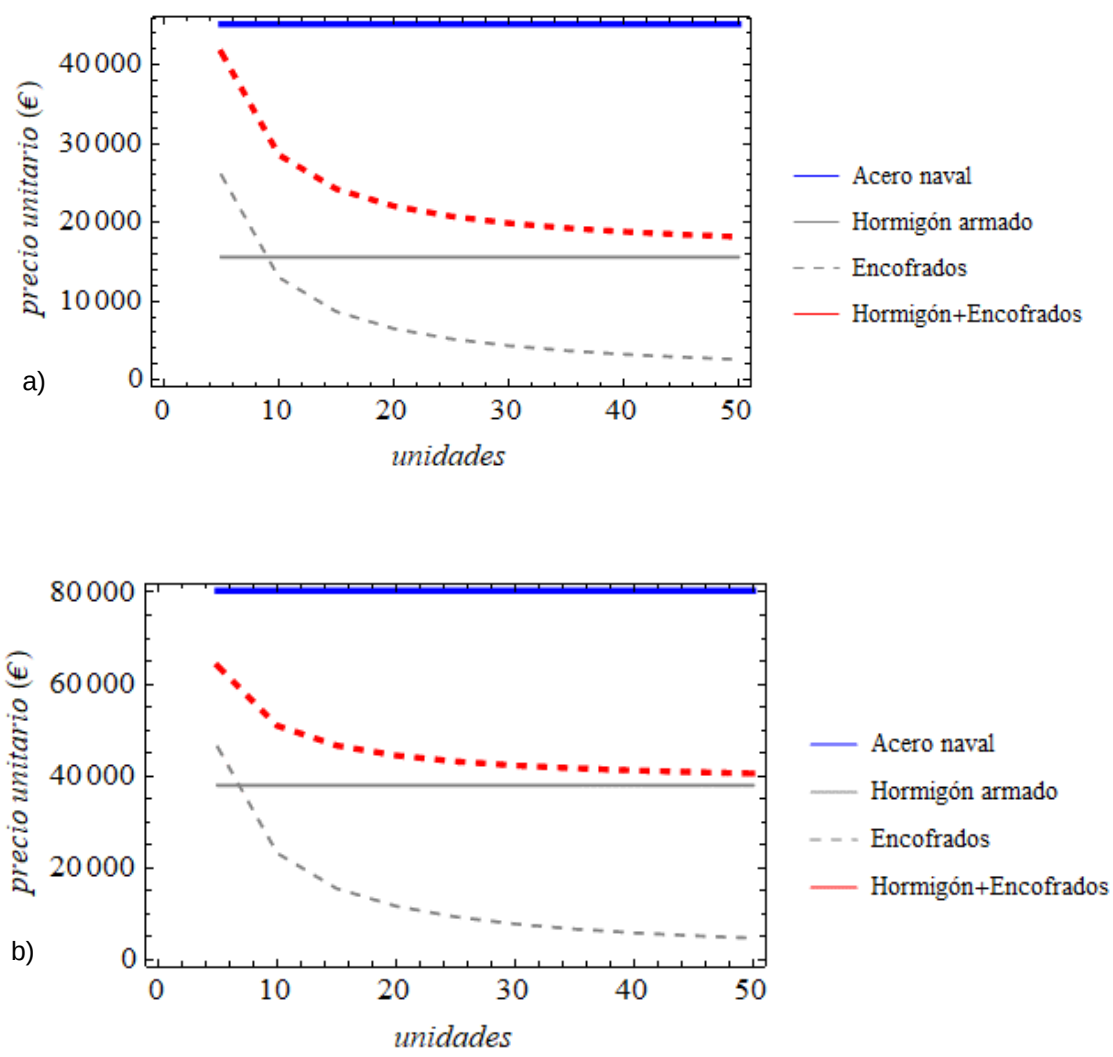


Figura A-1 - Estudio de costes para a) D=4.5 m y b) D=6m

ANEXO II: IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES Y SOCIALES

El hormigón tiene muchas ventajas ambientales, tales como la durabilidad e inercia química. Sin embargo, la producción de cemento requiere de un muy alto consumo de energía y su producción genera grandes cantidades de emisiones de CO₂ a la atmósfera. De media, la producción de una tonelada de cemento implica la liberación de 1.25 t de CO₂. Para mejorar el impacto ambiental, la industria cementera lleva años tomando medidas para borrar su huella ambiental. Las grandes compañías cementeras están tomando medidas para reducir las emisiones de carbono y, de hecho, LafargeHolcim la ha reducido en un 25 % desde 1990 y Cemex tiene como objetivo la reducción de carbono en un 35% para 2030[51].

Por otra parte, en las últimas décadas se han realizado avances en el reemplazo de cemento por otros materiales tales como la escoria de alto horno, cenizas volantes, etc., que pueden reducir hasta en un 50 % la cantidad del CO₂ global emitido a la atmósfera [52].

Mientras tanto, para minimizar el impacto ambiental, se debe de optimizar el consumo de hormigón con objeto de reducir al máximo la cantidad de cemento consumida. En este sentido, el método constructivo propuesto en este trabajo supone una gran ventaja medioambiental dado que la construcción modular permite el reuso de aquellos módulos de la estructura que no estén dañados, así como de las barras de acero.

Los módulos de hormigón a desechar se trasladarán a vertedero de acuerdo al procedimiento establecido en el Decreto 352/2002, de 5 de diciembre, de la Xunta de Galicia (DOG Núm. 250) que regula la producción de residuos de la construcción y demolición [53].

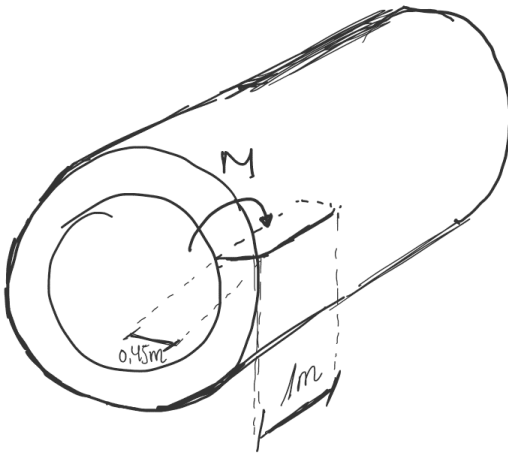
La construcción de submarinos es un tema de interés tanto para la sociedad como para los gobiernos, ya que se trata de una herramienta estratégica en términos de defensa y seguridad nacional. Sin embargo, también es importante reflexionar sobre los aspectos sociales que se relacionan con la construcción de estos vehículos submarinos.

En primer lugar, la construcción de submarinos implica una inversión económica por parte de los gobiernos, lo que puede generar críticas por parte de la sociedad que considera que se están destinando recursos a la defensa en lugar de a temas como pueden ser la educación, la salud o la infraestructura. Es importante que los gobiernos comuniquen de manera clara y transparente los motivos detrás de la construcción de submarinos y los beneficios que se esperan de ellos.

Por otro lado, la construcción de submarinos también puede tener un impacto en la industria y el empleo. La construcción de estos puede ser una fuente importante de empleo de algunas regiones de España, lo que puede ser beneficioso para la economía local. Sin embargo, también puede haber críticas por parte de otros sectores de la industria que consideran que se están destinando recursos y empleo a este sector en lugar de otro.

La construcción es un tema que debe ser abordado desde diferentes perspectivas sociales. Es importante que los gobiernos comuniquen de manera clara los objetivos detrás de la construcción de submarinos y los beneficios que se esperan de ellos, y que se toman las medidas necesarias para minimizar el impacto ambiental. Además, se debe tener en cuenta el impacto que puede tener la construcción de submarinos en la industria y el medio ambiente.

ANEXO III: CÁLCULO ARMADO MOMENTOS FLECTORES



$$M = 38715 \text{ N}\cdot\text{m}$$

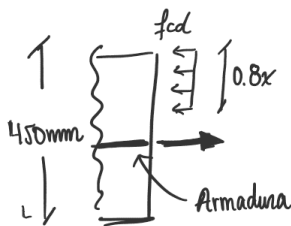
$$m_d = 1,5 \times M = 58700 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Cálculo tensiones acero y hormigón:

$$C-45 \Rightarrow f_{ck} = 45 \text{ MPa} \Rightarrow f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{45}{1,5} = 30 \text{ MPa}$$

$$B-400 \Rightarrow f_{tk} = 400 \text{ MPa} \Rightarrow f_{td} = \frac{f_{tk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1,15} = 347,8 \text{ MPa}$$

Equilibrio de axiles (1) y flectores (2) a nivel armadura:



$$1. N_d = 0 = f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot 1000 - A_s f_{yd}$$

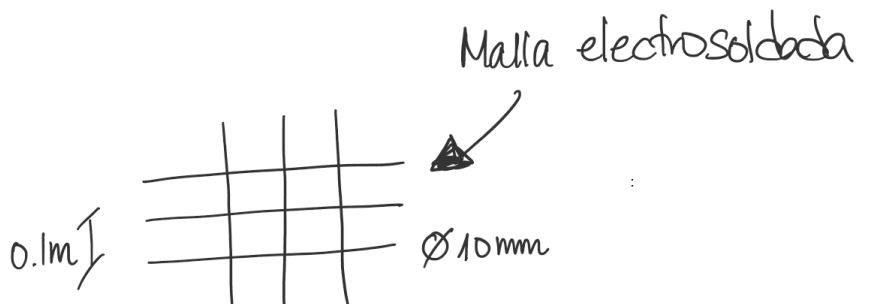
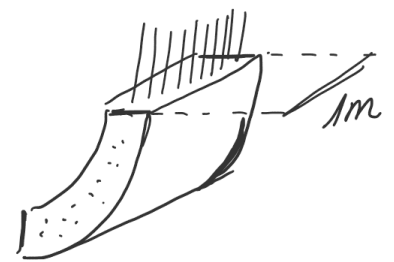
$$2. 58700 \cdot 1000 \text{ Nmm} = f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot 1000 \left(\frac{450}{2} - 0,4x \right)$$

$$x = 11,1 \text{ mm}$$

$$A_s = 765 \text{ mm}^2 - 10 \times 10 \rightarrow 78,5 \text{ mm}^2$$

Por lo que por cada metro pondremos 10 $\phi 10$

Una buena solución es hacerlo con mallas electrosoldadas de 10cm ϕ a 10cm de distancia.



ANEXO IV: PLANOS Y VISTAS DEL DISEÑO DEL SUBMARINO

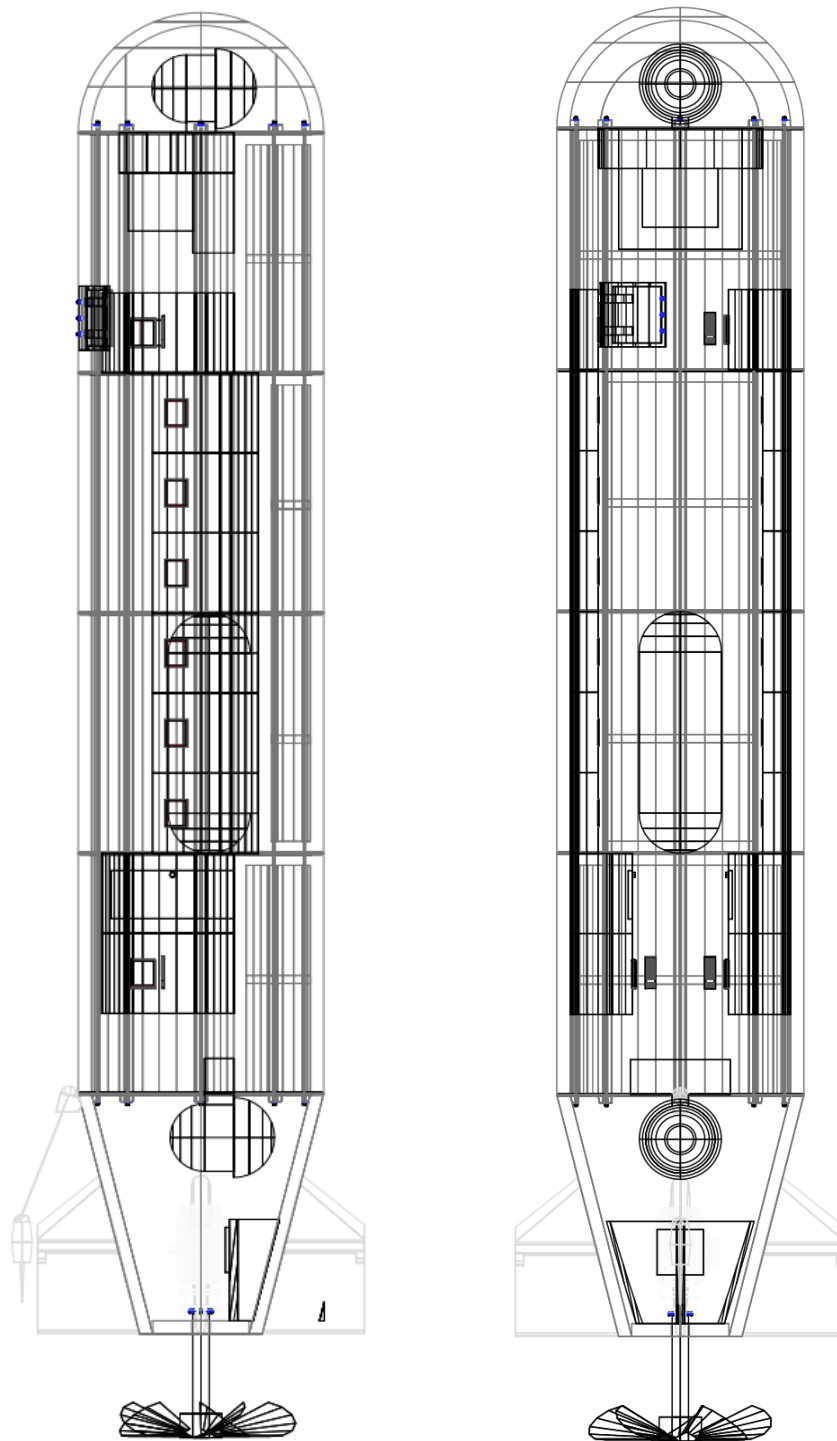


Figura A-2 - Planta y perfil del submarino diseñado

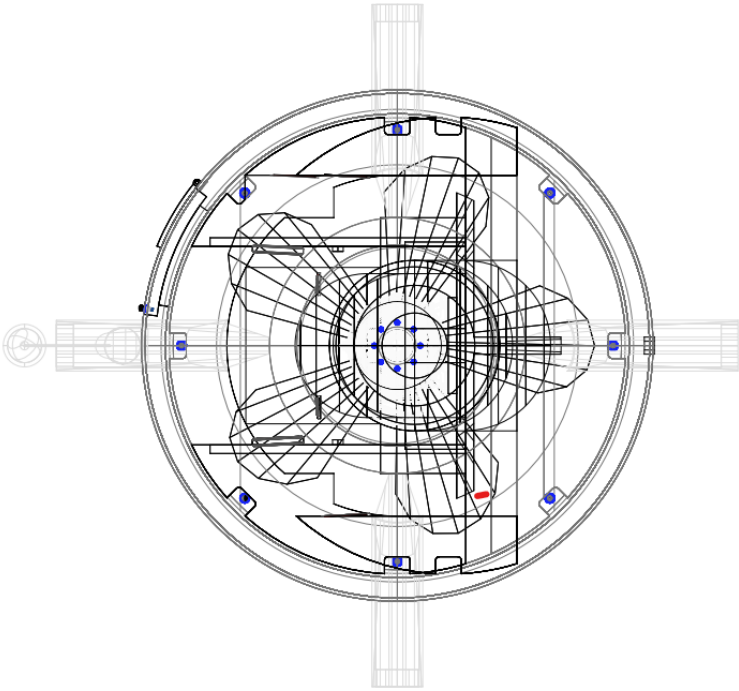


Figura A-3 – Sección transversal del submarino diseñado diseño

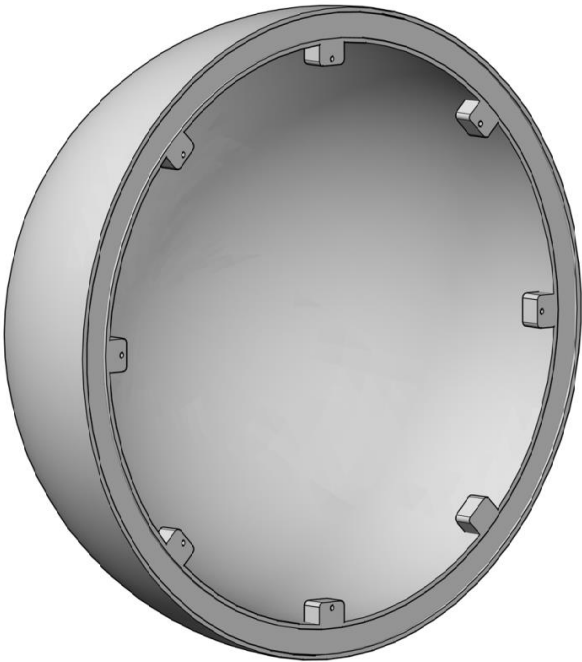


Figura A-4 - Módulo 1 del submarino diseñado (cierre estructural de Pr.)

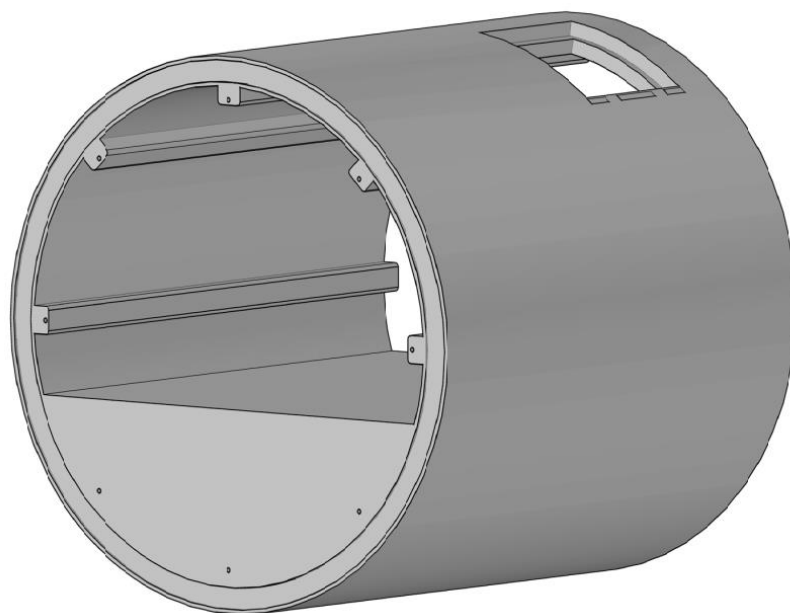


Figura A-5 - Módulo 2 submarino diseñado

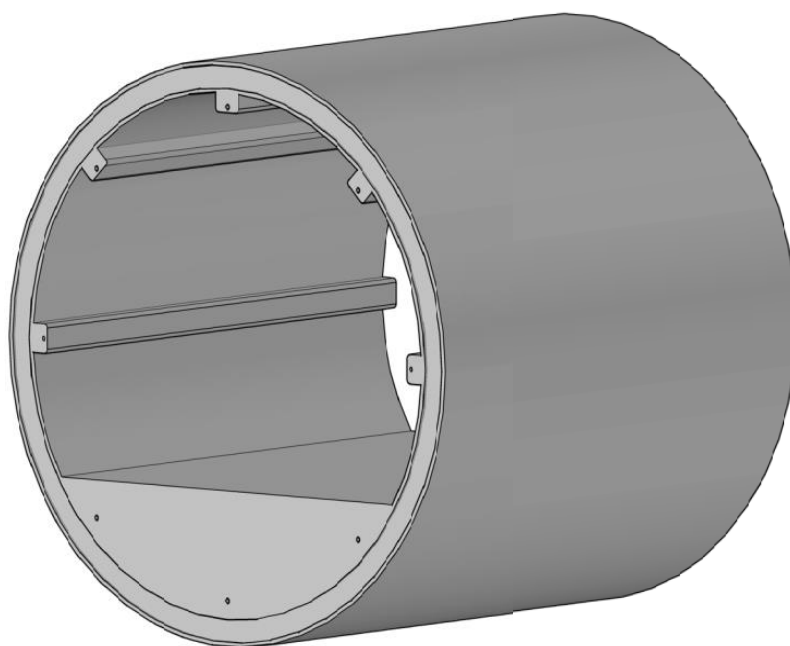


Figura A-6 - Módulo 3 submarino diseñado

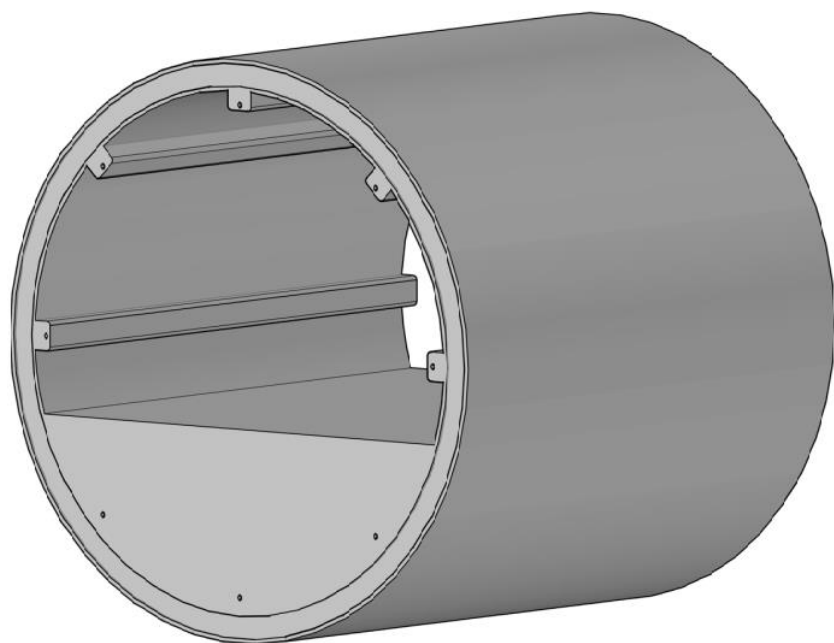


Figura A-7 - Módulo 4 submarino diseñado

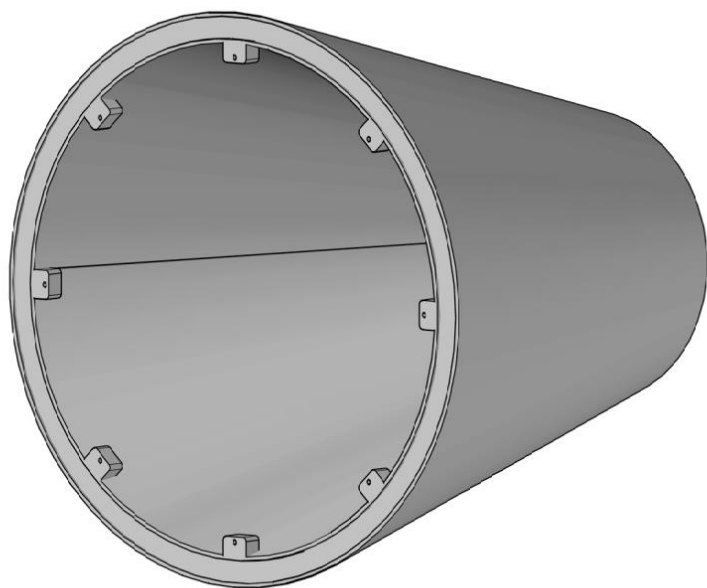


Figura A-8 – Módulo 5 submarino diseñado (cierre estructural de popa)

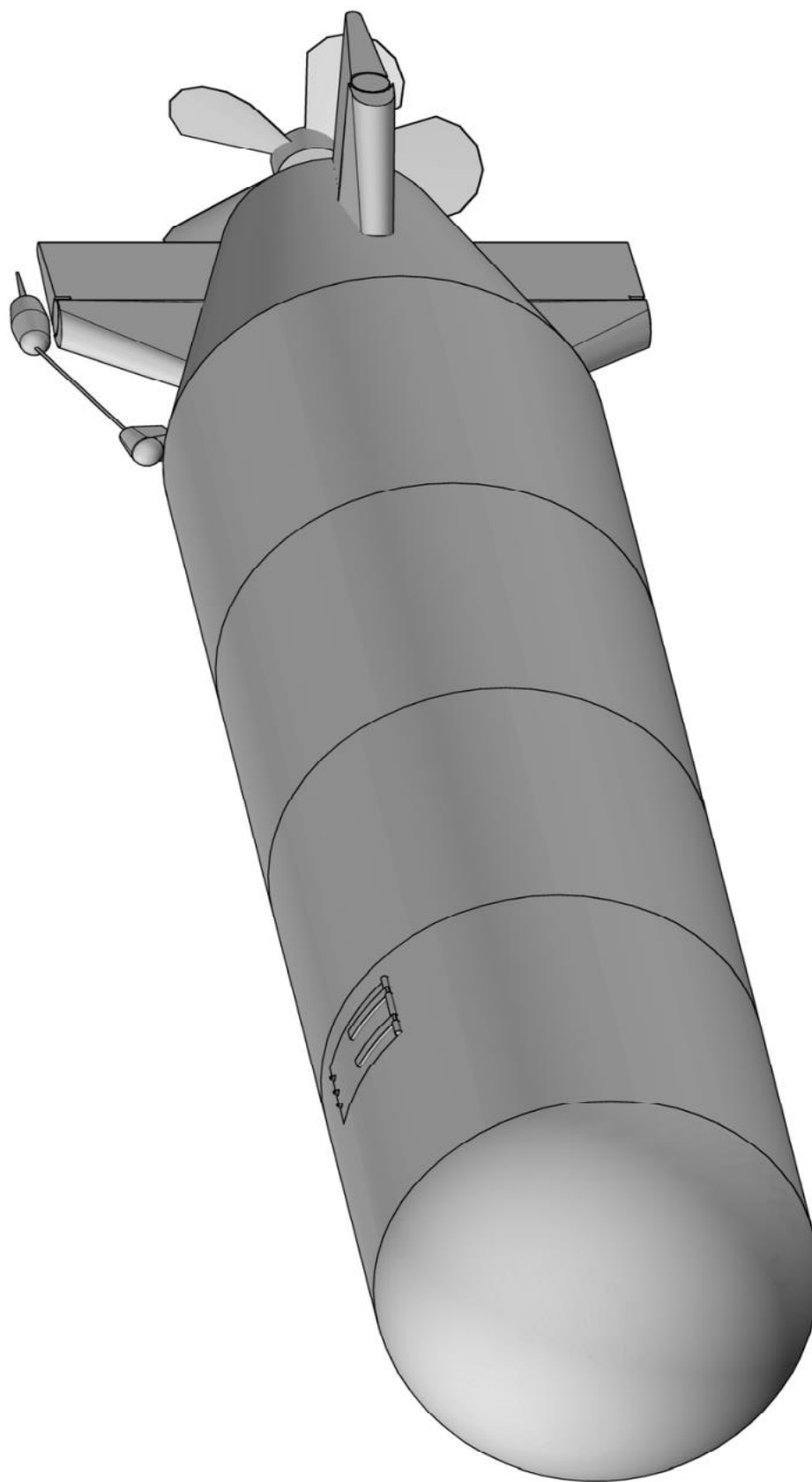


Figura A-9 - Submarino diseñado con los módulos unidos