



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INTEGRIDAD Y DURABILIDAD DE
MATERIALES, COMPONENTES Y ESTRUCTURAS**

ÁREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Estudio de integridad estructural de una quilla para una embarcación a vela
de competición**

Alumno: ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, MIGUEL

Tutor Académico: RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, CRISTINA

Tutor Industrial: GARCÍA SUARES, TOMÁS E.

Entidad Colaboradora: KNOW-HOW INNOVATIVE SOLUTIONS, S.L.

FECHA: JULIO 2020



ÍNDICE

1.- Introducción.....	6
1.1.- Problemática objeto de estudio	6
1.2.- Objetivos del proyecto.....	6
1.3.- Estructura de la memoria	7
2.- Antecedentes	8
2.1.- La quilla: componente crítico en navegación	8
2.2.- Procedimientos de evaluación de integridad estructural	9
3.- Justificación de la metodología adoptada	15
3.1.- Método FITNET	15
3.2.- Programa informático	15
4.- Materiales y métodos.....	16
4.1.- Unión soldada	16
4.2.- Caracterización mecánica del cupón soldado.....	18
4.2.1.- Dureza	18
4.2.2.- Propiedades a tracción.....	19
4.2.3.- Ensayos Charpy	19
4.3.- Propiedades mecánicas utilizadas	20
4.4.- Características de la embarcación y de la navegación	23
4.5.- Cargas sobre la quilla	24
4.6.- Tensiones sobre la quilla.....	25
4.7.- Geometría agrietada	28
4.8.- Análisis a fractura. Diagrama FAD.....	29
4.9.- Análisis a fatiga	30
4.10.- Herramienta desarrollada.....	31
5.- resultados	32
5.1.- Tensiones en la quilla.....	32
5.2.- Tenacidad y fatiga	34
6.- CONCLUSIONES	35



7.- Referencias 37



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Embarcación a vela con doble quilla.....	8
Figura 2-2. Diagrama de fallo (FAD)	11
Figura 2-3. Dimensiones características de una grieta elíptica.	12
Figura 4-1. Despiece de las tres partes de la quilla.....	16
Figura 4-2. Diseño de la junta de unión soldada.....	17
Figura 4-3. Diagrama de fallo del metal base	29
Figura 4-4. Diagrama de fallo del metal fundido	30
Figura 4-5. Interfaz de la herramienta de cálculo.....	31
Figura 5-1. Detalle del estado tensional obtenido tras la simulación (ANSYS).....	32
Figura 5-2. Detalle de tensiones en la parte superior de la quilla (ANSYS)	33
Figura 5-3. Linealización de tensiones (ANSYS)	33
Figura 5-7. Análisis global a fatiga.....	34



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Propiedades mecánicas del acero APX4 indicadas por el fabricante	17
Tabla 4-2. Composición química del electrodo.....	17
Tabla 4-3. Propiedades mecánicas extraídas del certificado del material de aporte	17
Tabla 4-4. Ensayos Charpy recogidos en el informe de homologación	20
Tabla 4-5. Valores de tenacidad obtenidos para las diferentes zonas del material..	21
Tabla 4-6. Parámetros C, m y ΔK_{th} en función de la dureza del material.....	22
Tabla 4-7. Registro de características de navegación anual de la embarcación	23
Tabla 5-1. Linealización de tensiones para cada uno de los supuestos de carga	33
Tabla 5-2. Variación de tensión en la embarcación en función del oleaje.	34



1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Problemática objeto de estudio

La navegación en embarcaciones de vela, como deporte de competición, es una actividad que destaca por la alta tecnología utilizada con objeto de hacer de las embarcaciones lo más rápidas, eficientes y ligeras posible, lo cual, en conjunto con su desarrollo y fabricación, obliga a los promotores de este deporte a la inversión de altas cantidades de capital.

Derivada de la competitividad de este deporte, se producen componentes de altísima tecnología, pero cuya vida útil se desconoce, lo que hace que en numerosas ocasiones se pierdan altas cantidades de capital invertido por el fallo prematuro de los mismos.

Dentro de este tipo de embarcaciones, la quilla es, en la inmensa mayoría de las ocasiones, el principal objeto de estudio. Su papel principal en lo que a hidrodinámica, estabilidad y velocidad de la embarcación se refiere, en conjunto con los grandes esfuerzos a los que está sometida, hace de éste el componente más crítico de la embarcación [1], cuyo fallo puede desencadenar catastróficos resultados tanto económicos como personales [2].

Es por ello, que la introducción de métodos de análisis de integridad estructural en estos componentes, permitiría la mejora y optimización de los mismos en lo que a propiedades mecánicas y diseño se refiere [3], siendo así una herramienta perfecta para el análisis de componentes de un sector tan competitivo como es el que nos atañe en el presente proyecto.

1.2.- Objetivos del proyecto

El objetivo del presente proyecto es la realización de un estudio de integridad estructural sobre una quilla diseñada para su uso en una embarcación de competición de vela.

Para ello, se determinarán las propiedades mecánicas del material, para posteriormente, una vez analizadas las cargas intervinientes sobre el componente durante su vida útil, realizar un estudio de integridad estructural del componente en términos de vida útil a fatiga y tenacidad a fractura.



Del estudio se obtendrán una serie de conclusiones que determinarán las propiedades del material, así como la vida útil del componente y se propondrán una serie de mejoras con objeto de optimizar ambos.

1.3.- Estructura de la memoria

En la memoria del presente estudio, se describirá en primer lugar el componente a analizar en cuestión, así como su proceso y material de fabricación. A continuación, se comentarán los métodos de caracterización mecánica del material.

Tras ello se explicará la obtención de los esfuerzos a los que estará sometido durante su vida útil de los cuales derivarán las tensiones de cálculo.

En último lugar se expondrán las conclusiones obtenidas, así como una serie de posibles mejoras a implantar con objeto de aumentar dicha vida útil.



2.- ANTECEDENTES

2.1.- La quilla: componente crítico en navegación

Las quillas son, dentro de las embarcaciones, el componente que juega el papel protagonista en lo que a diseño se refiere [3], siendo sus principales funciones la de mantener la estabilidad lateral del barco, que se ve comprometida por el momento de giro introducido por la fuerza que ejerce el viento sobre las velas y reducir el centro de gravedad de la embarcación, haciéndola así más estable.

Este papel es más importante aún, si cabe, en un sector como es el de la competición naval, en el cual, derivado del enorme tamaño de las embarcaciones, los componentes sufren altísimos esfuerzos al ser necesario reducir al máximo la cantidad de material de los mismos con objeto de hacerlos lo más ligeros posible.



Figura 2-1. Embarcación a vela con doble quilla.

Como norma general, las quillas suelen fabricarse utilizando aceros al carbono [3], recubiertos por lo general de fibra o de material compuesto. El recubrimiento tiene como función la protección del acero contra la corrosión, la absorción de golpes, así como cualquier eventualidad que la pudiera poner en peligro el corazón de acero.

A pesar de ello, la aparición de desprendimientos del recubrimiento en múltiples ocasiones, pone en tela de juicio el aseguramiento de su integridad, al crearse pares galvánicos que pueden llegar a dañar tanto la quilla en cuestión como, en algunas ocasiones, otras partes de la embarcación.



En base a esta problemática, en los últimos tiempos el material con el que se fabrican las quillas ha sido objeto de particular atención, a fin de aumentar tanto su resistencia mecánica como a la corrosión. Derivado de estos estudios, el cliente que solicita el presente trabajo pide realizar un análisis de la integridad estructural, así como vida útil, de una quilla fabricada con un acero inoxidable martensítico APX4 fabricado por Aubert Duval [5], con objeto de valorar su comportamiento y la mejora que supondría, en cuanto a integridad y durabilidad se refiere, el uso de este material frente al utilizado hasta el momento.

Durante el servicio de una quilla se pueden diferenciar dos tipologías de esfuerzos principales sobre la misma: hidrodinámicos y mecánicos [6]. De ambos, son los segundos los que mayores solicitaciones introducen en la quilla.

Dentro de los esfuerzos mecánicos, la flexión inducida en la quilla como respuesta al efecto del viento sobre las velas es el más importante de todos, al actuar sobre ella de forma lateral, siendo por tanto la unión de esta con la embarcación el punto más crítico y principal objeto de estudio en su diseño, así como el principal punto de rotura en servicio.

2.2.- Procedimientos de evaluación de integridad estructural

Durante la vida en servicio, los componentes son susceptibles de verse afectados por daños de diferentes orígenes y con diferentes mecanismos de propagación, los cuales con su crecimiento pueden derivar en el fallo de la pieza. En general, se pueden resumir estos modos de fallo en cuatro categorías: fractura, fatiga, fluencia y corrosión.

En base a estos mecanismos de fallo se generaron por parte de diversas instituciones, metodologías de análisis de los mismos a fin de valorar su validez para el servicio. A continuación, se exponen algunas de estas metodologías, las cuales son las más extendidas a nivel global.

El BS7910 [7] es un procedimiento de evaluación de integridad estructural desarrollado por “British Standards” que tiene como objeto de estudio las estructuras metálicas en diversos tipos de industrias, prestando especial atención a la defectología que pudiera aparecer en la cercanía de uniones soldadas. Se focaliza principalmente en el estudio de fractura, fluencia y crecimiento de grietas por fatiga.

El documento que recoge este procedimiento se compone de un total de 10 secciones, de las cuales las 6 primeras recogen un resumen de la información necesaria para la realización del análisis, enfocándose en las propiedades del material, las tensiones existentes y las características y dimensiones de los defectos. Por otro lado, las 4 últimas



secciones, contienen los procedimientos a través de los cuales se pueden realizar evaluación de integridad estructural por fractura, fatiga, fluencia, así como otros tipos de fallo.

Otro de los procedimientos para la evaluación de la integridad estructural más extendidos es el FITNET FSS [8]. Este es un procedimiento de evaluación desarrollado en el marco de la Unión Europea, que recoge el análisis de componentes y estructuras teniendo en cuenta los cuatro principales modos de fallo: fractura, fatiga, fluencia y corrosión. Este procedimiento ha sido presentado al Comité Europeo de Normalización con objeto de convertirse en un futuro en una norma europea en lo que a integridad estructural se refiere.

El procedimiento FITNET FSS se compone de un total de tres volúmenes. El primero de ellos recoge el procedimiento de evaluación en sí, con diferentes capítulos que analizan cada uno de los tipos de fallo; el segundo muestra diferentes casos de aplicación y ejemplos que pretenden guiar al usuario y facilitar el uso de la herramienta y, finalmente, el tercero recoge una serie de anexos que sirven como apoyo durante la utilización del documento al encontrarse en el mismo perfiles de tensiones residuales, caracterizaciones geométricas de defectos, formulaciones de linealizaciones de tensiones, etc.

Existen también otros procedimientos, los cuales son menos generales y se centran en sectores industriales concretos como es el caso del ASME XI (EE.UU.) [9], R5 y R6 (British Energy) o SAQ (Suecia), centrados en la industria nuclear; API 579 (EE.UU.), que analiza integridad estructural de componentes en el sector petrolífero u otros como el SINTAP (Europa) o JSME (Japón).

Así mismo, uno de los principales problemas de estos procedimientos es su focalización en modos de fallo concreto, como es la fluencia en el R5 o la fractura en el caso del BS7910 [7], R6 y SAQ.

Como norma general, estos procedimientos de evaluación de integridad estructural se basan en la utilización de diagramas de fallo FAD (ver Figura 2-2), cuando se pretende analizar un componente en lo que a fractura se refiere. Estos diagramas permiten obtener el margen de seguridad ante el fallo del componente en base al factor de intensidad de tensiones y el aprovechamiento de la resistencia elástica del material.

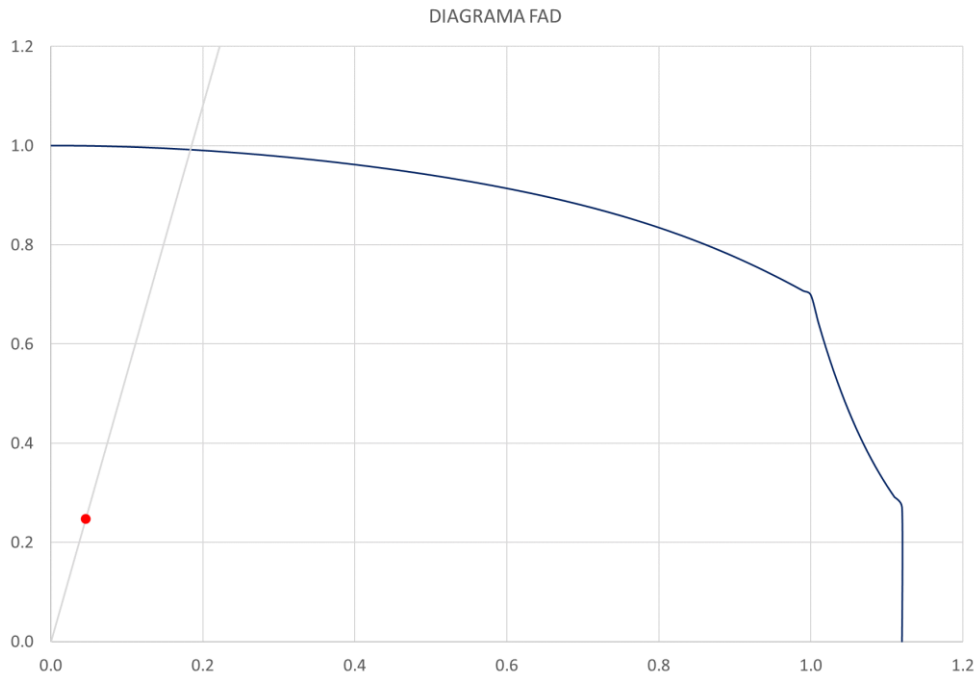


Figura 2-2. Diagrama de fallo (FAD)

La curva de diseño estos diagramas se rigen por norma general en base a las siguientes expresiones:

Para $L_r \leq 1$

$$f(L_r) = \left(1 + \frac{1}{2} \cdot L_r^2\right)^{-1/2} \cdot [0.3 + 0.7 \cdot \exp(-\mu \cdot L_r^6)] \quad (2.1)$$

Para $1 < L_r \leq L_{r,max}$

$$f(L_r) = f(1) \cdot L_r^{(N-1)/(2 \cdot N)} \quad (2.2)$$

Donde;

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{ut}}{2 \cdot \sigma_{ys}} \quad (2.3)$$

$$N = 0.3 \cdot (1 - \sigma_{ys}/\sigma_{ut}) \quad (2.4)$$

$$\mu = \min\left(\frac{E}{1000 \cdot \sigma_{ys}}; 0.6\right) \quad (2.5)$$



Para poder obtener el margen de seguridad del componente frente a fractura es necesario situar el punto de trabajo del componente en el diagrama, mediante sus parámetros (L_r y K_r), los cuales se obtienen de las siguientes expresiones:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} \quad (2.6)$$

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} \quad (2.7)$$

Donde;

$$K_I = (M_m \cdot \sigma_m + M_b \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

Para la definición de los parámetros L_r , se hace necesaria la obtención de la tensión de referencia del material (σ_{ref}), y los factores de forma M_m y M_b , que acompañan a las tensiones de membrana (σ_m) y bending (σ_b) de la zona analizada. En el caso concreto del presente estudio, se supuso una posible presencia de grietas elípticas (ver Figura 2-3) en las uniones soldadas, por lo que los parámetros anteriores vendrían definidos por las siguientes expresiones [7]:

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + [P_b^2 + 9 \cdot P_m^2 \cdot (1 - \alpha'')^2]^{0.5}}{3 \cdot (1 - \alpha'')^2} \quad (2.9)$$

Donde;

$$\alpha'' = \frac{2 \cdot a/B}{1 + (B/c)} \quad (2.10)$$

Para este análisis concreto, se supusieron grietas circunferenciales, por lo que $a=c$.

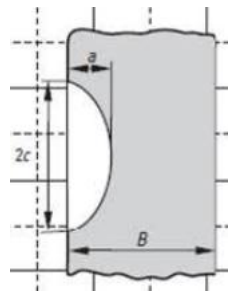


Figura 2-3. Dimensiones características de una grieta elíptica.



Por otro lado, en lo que se refiere a la caracterización de la grieta frente a fractura (K_r), se obtuvieron los parámetros de forma (M_m y M_b) [7]:

$$M_m = \left[M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^4 \right] \cdot \frac{g \cdot f \cdot \theta}{\Phi} \quad (2.11)$$

Donde, para $2/ac \leq 0.5$;

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \quad (2.12)$$

$$M_2 = \left\{ 0.89 / \left[0.2 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) \right] \right\} - 0.54 \quad (2.13)$$

$$M_3 = 0.5 - 1 / \left[0.65 + \left(\frac{a}{c}\right) \right] + 14 \left[1 - \left(\frac{a}{c}\right)^{24} \right] \quad (2.14)$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{B}\right)^2 \right] \cdot (1 - \sin \Phi)^2 \quad (2.15)$$

$$f = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \Phi + \sin^2 \Phi \right]^{0.25} \quad (2.16)$$

$$\theta = \sqrt{1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}} \quad (2.17)$$

$$M_b = H \cdot M_m \quad (2.18)$$

Donde;

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \cdot \sin^q \theta \quad (2.19)$$

Donde, para $2/ac \leq 0.5$;

$$q = 0.2 + (a/c) + 0.06 \cdot (a/B) \quad (2.20)$$

$$H_1 = 1 - 0.34(a/B) - 0.11(a/c)(a/B) \quad (2.21)$$

$$H_2 = 1 + G_1(a/B) + G_2(a/B)^2 \quad (2.22)$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12(a/c) \quad (2.23)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5} \quad (2.24)$$

Por otro lado, se realizó también un análisis del material a fatiga, para lo cual se plantearon dos supuestos. Por un lado, el posible crecimiento de una grieta por fatiga en materiales no agrietados, el cual se basa en la utilización de curvas S/N o umbrales de fatiga, los cuales implican que, sin variaciones de tensión superiores a este umbral ($\Delta\sigma_f$), no habrá propagación de grieta.



$$\Delta\sigma_f = 0.504 \cdot \sigma_{ut} \quad (2.25)$$

Y, por otro, la posible propagación de una grieta existente, lo cual se analizó mediante la ley de propagación de grietas de Paris:

$$\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{Y(a)^m \cdot (\pi \cdot a)^{m/2}} = C \cdot (\Delta\sigma)^m \cdot N \quad (2.26)$$

En lo que se refiere al análisis a fatiga y, dado que existen las condiciones de navegación y, por tanto, los regímenes de trabajo del componente son muy variables, se obtuvieron diferentes grietas críticas en función de la zona concreta en la cual se está navegando. Para ello, se utilizó la siguiente expresión, en la cual se obtuvo el valor de dicha grieta en función de la tensión existente en el componente (σ) y su factor geométrico (Y):

$$K_I = (Y \cdot \sigma) \sqrt{\pi \cdot a_c} \quad (2.26)$$



3.- JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ADOPTADA

3.1.- Método FITNET

Siendo el procedimiento FITNET el considerado como óptimo en lo que se refiere al desarrollo de la herramienta informática del presente trabajo, al ser el más aceptado por la comunidad científica y contemplar la totalidad de los modos de fallo existentes (fractura, fatiga, fluencia y corrosión) [10], en el presente apartado se desarrollará un resumen de las etapas de evaluación de dicho método y se profundiza en los dos modos de fallo más relevantes para el componente en cuestión (fractura y fatiga), explicando el proceso de obtención de los diferentes parámetros necesarios para el desarrollo del análisis.

3.2.- Programa informático

Derivado de la alta complejidad que suelen tener los procedimientos de evaluación de integridad estructural, tanto por la estructura del análisis en sí, como por los cálculos que requiere, se optó por el desarrollo de una herramienta informática que permitiese el análisis del componente en cuestión de una forma guiada y simple.

Entre las diferentes opciones existentes en lo que se refiere a la implementación informática de la herramienta de análisis de integridad estructural (Microsoft Excel, Matlab, Python, etc.) se valoró la facilidad de manejo y alcance a los usuarios, tal y como se expuso en el Apartado 3.1 del presente trabajo.

Es por ello que se decidió que la herramienta debía de ser desarrollada en el software Microsoft Excel, al ser la más extendida, con mayor facilidad de utilización y estar al alcance de cualquier usuario.

Se desarrollará por tanto en el presente trabajo una herramienta mediante el software de Microsoft Excel, a través de la cual se podrá realizar un análisis de integridad de una forma rápida y simple. Será únicamente necesario la introducción de los parámetros relacionados con el fallo (tamaño de grieta, características mecánicas, ...) quedando la totalidad de los cálculos automatizados, así como la salida de resultados, la cual se hace de una forma visual y fácil de interpretar.

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

4.1.- Unión soldada

Derivado del diseño en forma de viga armada hueca, para la quilla en cuestión, su fabricación se basó en la realización de uniones soldadas que unen los tres componentes que la constituyen. En la Figura 4-1. Despiece de las tres partes de la quillase muestra una vista frontal y lateral de las tres piezas que intervienen en la fabricación de la quilla.

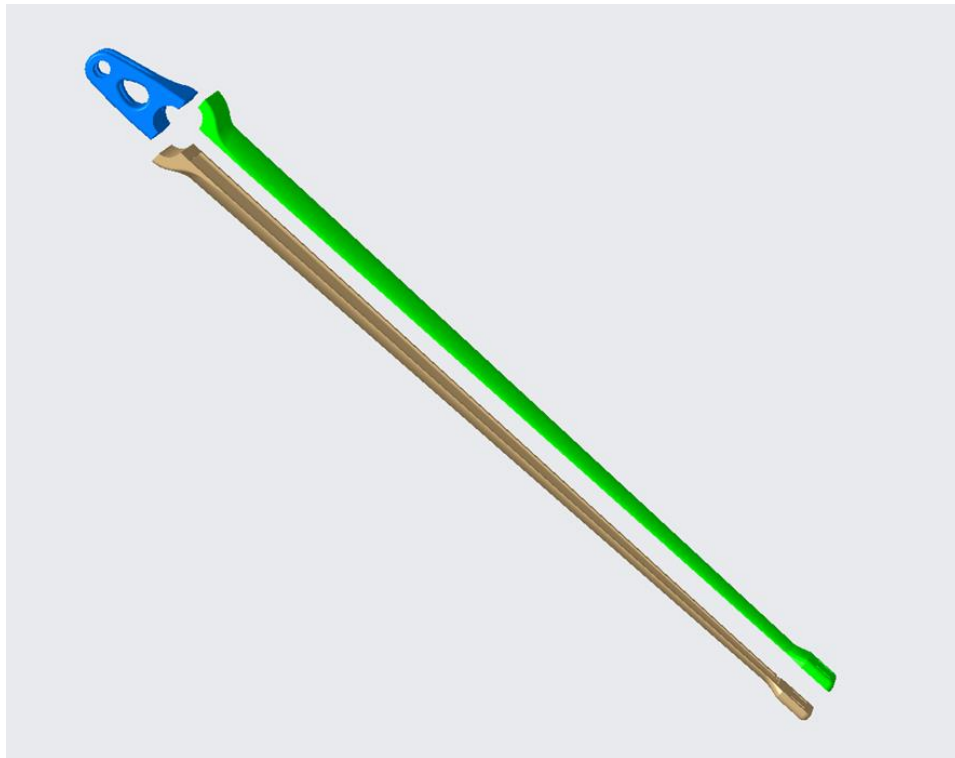


Figura 4-1. Despiece de las tres partes de la quilla

Los procesos de soldeo y tipología de unión fueron idénticos en la totalidad de las uniones, siendo la preparación de bordes en V, con una garganta de 110mm y una abertura en la cara de 55mm, tal y como se muestra en la Figura 4-2. La unión se realizó en su totalidad mediante un proceso de soldeo SMAW, con electrodo revestido de 4 mm de diámetro.



Figura 4-2. Diseño de la junta de unión soldada

El material base fue un acero inoxidable APX4, fabricado por Aubert Duval, cuya composición normalizada es X4CrNiMo16-5-1 y su estado de suministro fue de temple con posterior revenido a 400°C. Las propiedades mecánicas certificadas por el fabricante se indican en la Tabla 4-1 [5].

T. térmico	σ_{ut} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	Alargamiento (%)	K_{CU} (J/cm ²)
T + Rv 400 °C	1200	950	16	100

Tabla 4-1. Propiedades mecánicas del acero APX4 indicadas por el fabricante

En la Tabla 4-2 y la Tabla 4-3 se recogen la composición química del material de aporte, así como sus propiedades mecánicas, suministradas por el fabricante del electrodo en el certificado del mismo [11].

Elemento	%	Elemento	%
C	0.1	Mn	0.9
Si	1.1	Fe	Base
P	0.025	Co	0.4
Si	0.1	Ni	9.9
Cr	29.8	Mo	0.1

Tabla 4-2. Composición química del electrodo.

Aporte	σ_{ut} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	Alargamiento (%)	K_{CU} (J/cm ²)
Electrodo revestido	820	650	20	21

Tabla 4-3. Propiedades mecánicas extraídas del certificado del material de aporte

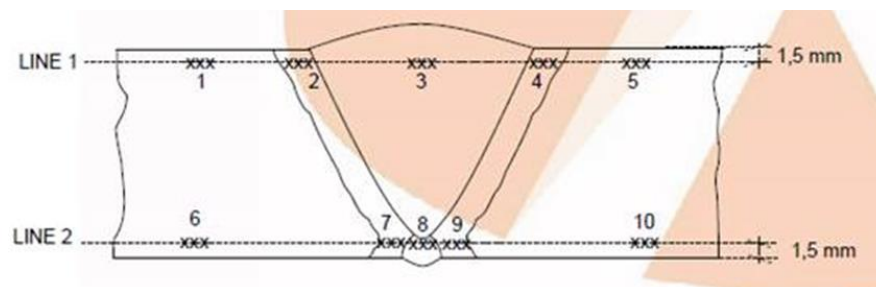


4.2.- Caracterización mecánica del cupón soldado

A continuación, se enumeran las propiedades mecánicas del cupón soldado. A partir de los resultados obtenidos de los diferentes ensayos y utilizando ciertas correlaciones empíricas, se obtendrán algunas de las propiedades cuya definición, cómo ya se ha reflejado anteriormente, es necesaria para el análisis de la integridad estructural de la quilla.

4.2.1.- Dureza

En la homologación de la soldadura se realizaron dos líneas de durezas a 1.5mm de ambas superficies de la unión, en base a lo especificado en la norma UNE-EN ISO 9015-2:2016, que permitieron la obtención de unos valores medios de durezas en el material base, ZAT y material fundido. En la Tabla 4-4 se recogen dichos valores.



ZONA		HV-1	HV-2	HV-3	Med. ± desv.
LINE 1	1	369	366	356	364 ± 7
	2	390	374	374	379 ± 9
	3	281	282	279	281 ± 2
	4	365	377	383	375 ± 9
	5	357	356	369	361 ± 7
LINE 2	6	360	372	370	367 ± 6
	7	377	379	365	374 ± 8
	8	260	265	269	265 ± 5
	9	365	375	380	373 ± 8
	10	356	359	357	357 ± 2

Tabla 4-4. Durezas recogidas en el informe de homologación

En la tabla anterior, se puede observar el habitual aumento de la dureza en la zona afectada térmicamente (ZAT) con respecto al material base (BM), derivado del efecto del ciclo térmico de soldeo. Así mismo, la dureza cae drásticamente en el metal fundido.



4.2.2.- Propiedades a tracción

Paralelamente a las homologaciones de proceso de soldadura, el fabricante de la quilla solicitó también la realización de una serie de ensayos de tracción del material de aporte (WM) y el metal base (MB).

El fin de estos ensayos fue, por una parte, contrastar los datos aportados por el fabricante del acero base (Aubert Duval) y conocer las propiedades mecánicas reales del mismo, por otro, la verificación de las propiedades mecánicas del material de aporte, dada su posible discrepancia con las suministradas en los certificados del aporte debido a procesos de dilución en la soldadura, así como los tratamientos térmicos derivados del proceso. Los resultados medios de estos ensayos se muestran en la Tabla 4-.

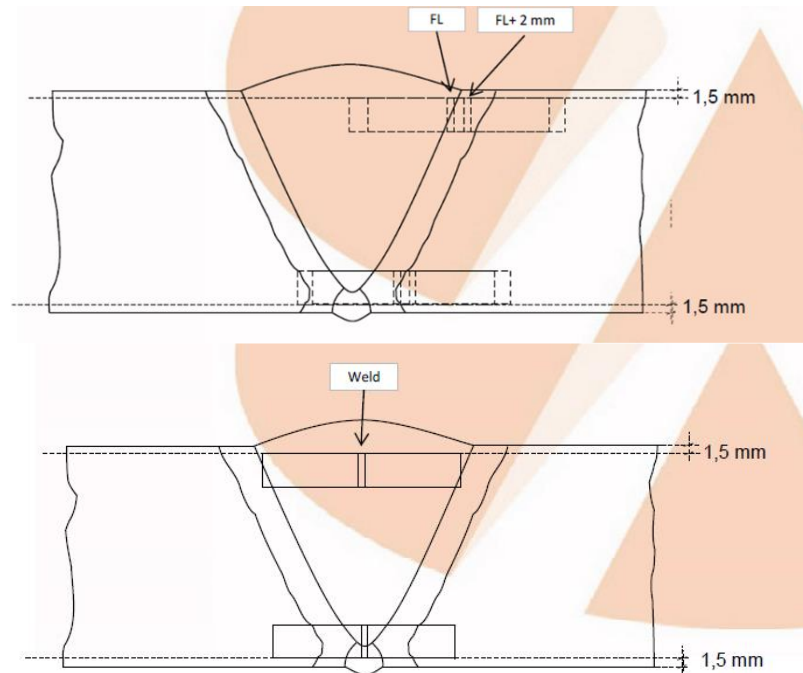
Zona	σ_{ut} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	Alargamiento (%)
WM	887	750	20
MB	1118	908	17

Tabla 4-5. Propiedades a tracción de WM y MB suministradas por el fabricante

Así mismo fueron realizados una serie de ensayos de tracción transversales a la unión soldada, lo cuales rompieron en el entorno de 890 MPa. En base a esto, así como la tabla anterior, se puede concluir que se trata de una unión undermatching, con mayor resistencia en el material fundido que en el metal base.

4.2.3.- Ensayos Charpy

En la homologación de la soldadura, realizada en base a la norma UNE-EN ISO 148-3:2017 [12] se realizaron también dos series de ensayos Charpy (superior e inferior) con probetas extraídas a 1.5mm de ambas superficies, que permitieron la obtención de unos valores medios de energía absorbida en el material fundido (WM), la línea de fusión (LF) y la zona afectada térmicamente (ZAT). En la Tabla 4-4 se recogen dichos valores.



ZONA		Ensayo 1 (J/cm ²)	Ensayo 2 (J/cm ²)	Ensayo 3 (J/cm ²)	Med. ± desv. (J/cm ²)
SUPERIOR	WM	23	24	24	24 ± 1
	LF	21	20	21	21 ± 1
	ZAT	163	160	144	156 ± 10
INFERIOR	WM	21	22	35	26 ± 8
	LF	50	48	60	53 ± 6
	ZAT	136	152	166	151 ± 15

Tabla 4-4. Ensayos Charpy recogidos en el informe de homologación

4.3.- Propiedades mecánicas utilizadas

Como vimos en el capítulo 2, el análisis de la integridad estructural de la quilla a través de la utilización de un diagrama de fallo, requiere el uso de varias propiedades mecánicas del material: límite elástico, resistencia mecánica, y tenacidad a la fractura del material (K_{mat}). Obviamente las propiedades mecánicas a tracción tanto del MB como del WM son conocidas (tabla 4.5), pero no ocurre lo mismo con la tenacidad a la fractura. Otro dato que resulta necesario si se quiere realizar un análisis a fatiga será la ley de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, así como el valor de la ΔK_{th} .

Dado que no se dispone de esos datos, se recurrió a utilizar diferentes propuestas de carácter empírico que posteriormente fueron contrastadas con datos bibliográficos [referencia].



Así, para el cálculo de la tenacidad a fractura, tanto del MB como del WM, se utilizó la expresión (4.1), que relaciona la tenacidad del material con el valor de energía absorbida de un ensayo Charpy para su palier superior (upper), en el cual se sitúan estos materiales a temperatura ambiente. No obstante, también se ha realizado el cálculo del valor de la tenacidad si el material estuviese trabajando en su palier inferior (lower), lo que ocurriría si la temperatura del agua estuviese próxima a 0°C, haciendo uso de la expresión (4.2).

$$K_{mat}(\text{MPa} \sqrt{\text{m}}) = 0.54 \cdot C_v + 55 \quad (4.1)$$

$$K_{mat}(\text{MPa} \sqrt{\text{m}}) = (12 \cdot K_{CV}^{0.5} - 20) \cdot \left(\frac{25}{88}\right)^{0.25} + 20 \quad (4.2)$$

En base a lo anterior, se obtuvieron unos valores de tenacidad aproximados, los cuales se recogen en la Tabla 4-5.

ZONA		Energía Charpy (J/cm ²)	Tenacidad upper (MPa·m ^{1/2})	Tenacidad lower (MPa·m ^{1/2})
SUPERIOR	WM	24	68	48
	LF	21	66	45
	ZAT	156	139	115
INFERIOR	WM	26	69	50
	LF	53	83	69
	ZAT	151	137	113
MB		100	109	93

Tabla 4-5. Valores de tenacidad obtenidos para las diferentes zonas del material.

Del mismo modo, y con objeto de hacer una evaluación de la vida a fatiga del componente ante la presencia de grietas, fue necesaria la determinación de los parámetros de la ley de Paris del material (expresión (4.3)).

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta que se desconocía dicha ley y se carecían de ensayos de caracterización del comportamiento de los materiales a fatiga, se utilizaron las siguientes



aproximaciones que relacionan los parámetros de dicha ley con los valores de dureza vickers (HV) del material:

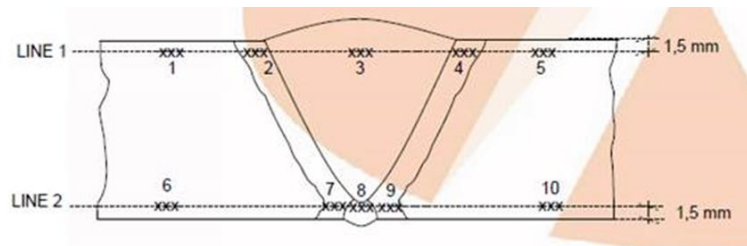
$$C \text{ (m/ciclo)} = \frac{10^{-10+0.0109 \cdot HV - 0.000014 \cdot HV^2}}{1000} \quad (4.4)$$

$$m = 4.31 - 0.00866 \cdot HV + 0.0000117 \cdot HV^2 \quad (4.5)$$

Con este tipo de expresiones también es posible determinar el valor de ΔK_{th} :

$$\Delta K_{th} \text{ (MPa } \sqrt{\text{m}}) = 2.45 + 0.00341 \cdot HV \quad (4.6)$$

En la Tabla 4-6 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de estos parámetros en base a la dureza de las diferentes zonas analizadas



ZONA		Dureza media	C (m/ciclo)	m	ΔK_{th} (MPa/m ^{-1/2})
LINE 1	1	364 ± 7	1.2954E-08	2.71	3.69
	2	379 ± 9	1.3189E-08	2.71	3.74
	3	281 ± 2	9.0455E-09	2.80	3.41
	4	375 ± 9	1.3145E-08	2.71	3.73
	5	361 ± 7	1.2887E-08	2.71	3.68
LINE 2	6	367 ± 6	1.3027E-08	2.71	3.70
	7	374 ± 8	1.3128E-08	2.71	3.72
	8	265 ± 5	8.0203E-09	2.84	3.35
	9	373 ± 8	1.3123E-08	2.71	3.72
	10	357 ± 2	1.2803E-08	2.71	3.67

Tabla 4-6. Parámetros C, m y ΔK_{th} en función de la dureza del material.



Estos valores son muy similares a los encontrados por Barson and Rolfe [14] para aceros martensíticos, por lo que pueden considerarse válidos para la quilla.

4.4.- Características de la embarcación y de la navegación

Siendo las tensiones existentes en el componente uno de los datos más relevantes en lo que se refiere al análisis de integridad estructural del componente y careciéndose de datos concretos de las mismas, se optó por realizar un análisis de las tensiones en el componente en base a los datos de navegación conocidos y las características de la embarcación.

Los datos de partida fueron tanto las características de la embarcación (dimensiones de la quilla, suministrada en un archivo “.iges” y superficie vélica, aportada por el cliente), como las zona de navegación de la embarcación y, por tanto, el rumbo de la misma. También se disponía de las características medias del viento (dirección y velocidad) en las zonas de navegación. Estos datos fueron proporcionados por el cliente en base a los registros obtenidos en la práctica de la navegación en años anteriores.

La distancia recorrida en los viajes realizados, así como otros datos importantes (mes de navegación, rumbo, dirección del viento, ángulo vela/quilla y velocidad media del viento) se recogen en la Tabla 4-7.

Viaje	Distancia (km)	Mes	Rumbo	Dir. med viento	Angulo vela quilla (°)	V_{med} viento (m/s)
Canarias-Cuba	6420	Mayo	W	NNE	22.5	25
		Junio	W	NE	45	20
Cuba-Ciudad del Cabo	12300	Julio	SE	W	45	30
			SE	WNW	67.5	22
		Agosto	SE	W	45	17
Ciudad del Cabo-Canarias	8500	Septiembre	N	SE	45	19

Tabla 4-7. Registro de características de navegación anual de la embarcación



4.5.- Cargas sobre la quilla

En primer lugar, se obtuvo la fuerza ejercida por el viento sobre la vela en función de la velocidad del mismo, teniendo en cuenta que la vela se posicionó siempre perpendicular al viento incidente con objeto de aprovechar al máximo su potencial de empuje.

El valor de dicha fuerza se obtuvo a partir de la presión del viento sobre la vela, haciendo uso de la expresión (4.7). Seguidamente, y haciendo uso de la (expresión 4.8), se calcula el empuje del viento, considerando una superficie vélica (dato aportado por el cliente) S_v de 1000 m^2 :

$$P_v(N/m^2) = 0.645 \cdot v_v^2 = 0.645 \cdot v_v^2 \quad (4.7)$$

$$E_v(N) = P_v \cdot S_v = 1000 \cdot P_v = 645 \cdot v_v^2 \quad (4.8)$$

Esta fuerza ejercida sobre la vela, se descompuso tal y como se muestra en la Figura 4- con objeto de obtener las fuerzas de empuje (E_{vf}) y vuelco de la embarcación (E_{vi}). La primera de ellas se correspondería con la parte de la fuerza del viento cuyo fin es el empuje de la embarcación, mientras que la segunda se corresponde con la fuerza de vuelco de la embarcación la cual es la que ha de contrarrestar la quilla con objeto de mantener su estabilidad.

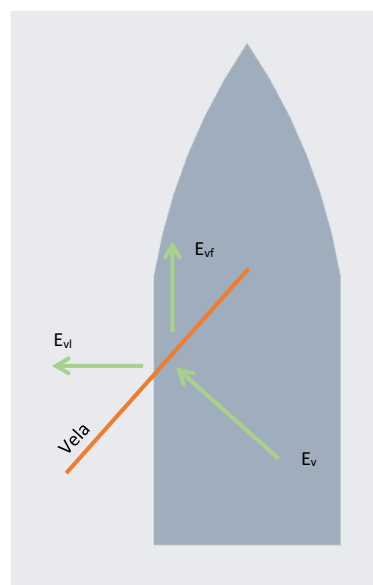


Figura 4-1. Descomposición del empuje del viento sobre la vela (E_v)



La descomposición de estas fuerzas se realizó en base a la siguiente formulación:

$$E_{vf} (N) = E_v \cdot \sin(\alpha) \quad (4.9)$$

$$E_{vl} (N) = E_v \cdot \cos(\alpha) \quad (4.10)$$

Realizando un análisis hidrodinámico de la quilla durante su navegación, aparecen también otra serie de fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas, pero por su magnitud y dirección de trabajo [6] no fueron consideradas en el presente análisis.

En base a las fuerzas de vuelco ejercidas sobre la embarcación para cada uno de los viajes, se realizó un análisis numérico con objeto de ver la influencia de las mismas sobre el estado tensional de la quilla.

4.6.- Tensiones sobre la quilla

A partir de los valores del empuje el cálculo de las tensiones sobre la quilla se realizó mediante elementos finitos, utilizando el módulo “Static Structural” del software de elementos finitos ANSYS. Teniendo en cuenta en que su régimen de trabajo es, en todos los casos, elástico, se realizó una simulación por elementos finitos elástico-lineal con un empuje de viento concreto (E_v). A partir de los resultados obtenidos, se pudo extraer la linealización de tensiones para cualquier otro valor de empuje mediante una simple regla de tres.

En primer lugar, se importó la geometría del elemento al módulo “SpaceClaim”, suministrada por el cliente en un archivo “.step”, la cual se muestra en la Figura 4-2.

Posteriormente se comenzó con el preproceso del análisis FEM, modelizándose para ello, en primer lugar, los contactos de las diferentes partes de la quilla (ambas mitades y la cabeza). Todas ellas se consideraron uniones tipo “Bonded”, al ser uniones soldadas. En la Figura 4-3 se muestra la modelización de los contactos utilizada.



Figura 4-2. Geometría de la quilla (ANSYS)

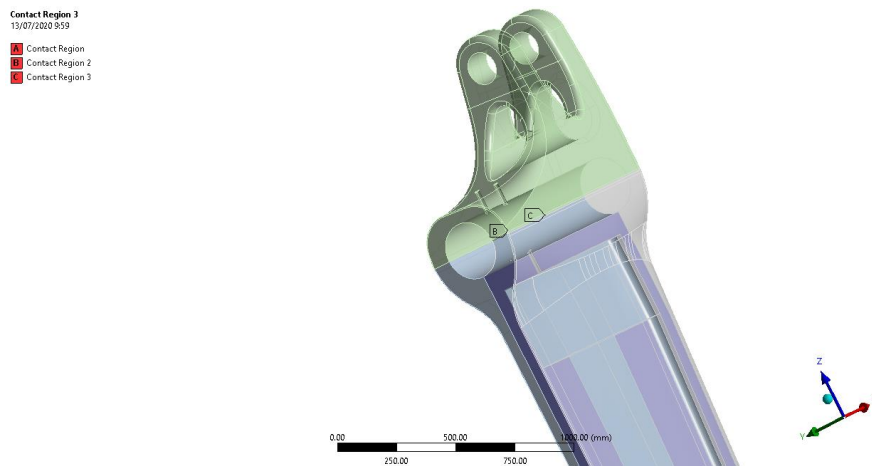


Figura 4-3. Resumen de contactos en la geometría de la quilla (ANSYS)



Una vez modelizados los contactos, se comenzó con el mallado de la pieza. Se introdujo en primer lugar la herramienta “Hex Dominant”, con objeto de obtener un mallado lo más estructurado posible con elementos hexaédricos.

En lo que se refiere al mallado, se introdujo también la herramienta “Mesh Size” en la totalidad de las geometrías, con objeto de obtener un tamaño de elemento máximo de 10mm.

Tras la realización del mallado, se obtuvieron un total de 835278 nodos que compusieron 326522 elementos. Los elementos de contacto alcanzaron los 25365.

Una vez realizada la malla, se introdujeron las condiciones de contorno de la quilla. Por un lado, se impuso un empotramiento de la superficie cilíndrica superior de la cabeza de la quilla, al estar su movimiento completamente restringido durante su servicio. Esta condición de contorno se muestra en la Figura 4- 4(a).

Por otro lado, en el cilindro inferior se introdujo un apoyo cilíndrico, al ir insertado en esta localización un bulón que permite el giro de la pieza. Es por ello que, como características de este apoyo, se impuso una restricción de movimiento radial, quedando el desplazamiento axial y el giro de la pieza sobre el bulón completamente libres (Figura 4-4).

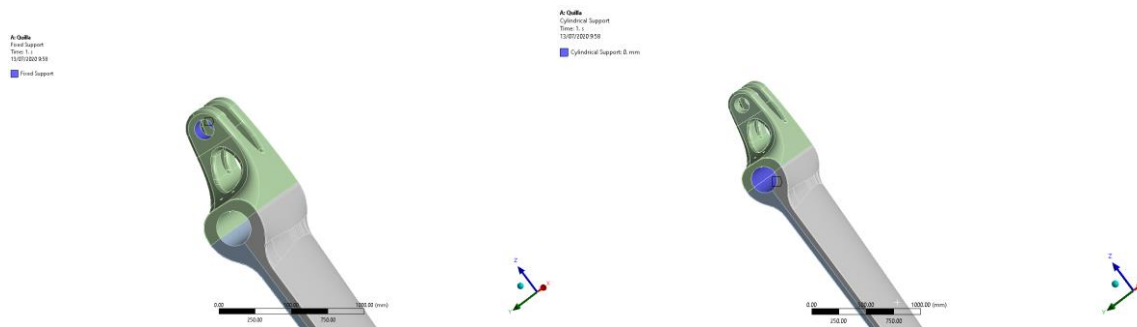


Figura 4-4. Condiciones de contorno en la parte superior y con el bulón

Por último, se introdujo un esfuerzo lateral 300.000 N (ver Figura 4-) repartido sobre la superficie de la quilla, con objeto de simular las condiciones de carga de la misma. Se introdujo este valor como un valor medio de los esfuerzos sobre la quilla en la totalidad de los viajes a realizar.

Dado que se realizó un análisis estático lineal, se realizó un único análisis a través del cual se pudieron obtener el resto de casos de carga en función del esfuerzo aplicado en cada uno de ellos, los cuales se muestran en el Apartado 4.1.



A: Quilla
Force
Time: 1. s
13/07/2020 10:00

Force: 3.e+005 N
Components: 6181.5;2.9992e+005;3447.5 N

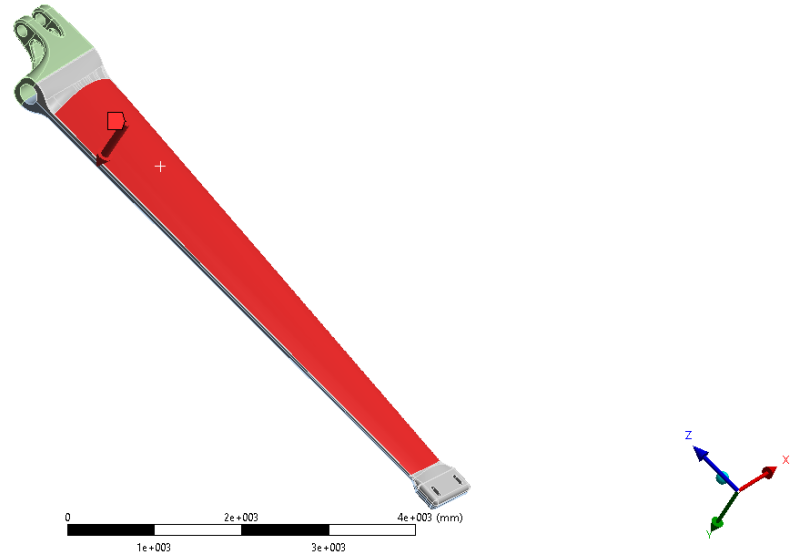


Figura 4-5. Detalle de esfuerzo aplicado en la modelización numérica (ANSYS)

Una vez se realizó la simulación, se efectuó una linealización de tensiones. Para ello se creó en primer lugar un “Path” (línea de unión entre dos nodos a través de la sección de una pieza) en la zona más crítica de la quilla, en la cual se localizó la máxima tensión, para posteriormente obtener la linealización de las tensiones en base a la herramienta “Linearized Equivalent Stress” de ANSYS.

4.7.- Geometría agrietada

Con objeto de realizar los análisis de fractura y fatiga se hace imprescindible el conocimiento de la defectología presente en el material.

A fin de realizar un análisis de defectos en la quilla tras su soldeo, el cliente realizó un examen de ultrasonidos en la totalidad de la unión, cuya sensibilidad (mínimo defecto apreciable) fue de 3mm. Al no observarse en ninguna de las soldaduras defecto alguno, se asumió la presencia de defectos semielípticos de 3mm de profundidad y 3 mm de longitud $a/c=1$. Además se supuso que el crecimiento de grieta va a ser proporcional, es decir que se mantiene la relación de forma en todo el proceso de crecimiento de grieta por fatiga $a/c=1$ y que en el momento en el que la grieta pase a ser pasante la quilla fallará, dado que su interior se llenaría de agua y quedaría inservible para su cometido.

Por otro lado, en el material base de la quilla, se supuso la no presencia inicial de grietas, al venir directamente de laminación y posteriormente ser mecanizado.



4.8.- Análisis a fractura. Diagrama FAD

Dada la diferencia en las propiedades mecánicas de la soldadura y el metal base, fue necesario el trazado de dos diagramas de fallo (FAD) diferentes.

Con objeto de determinar la curva cada uno de ellos, fue necesaria la obtención, en primer lugar, del valor máximo de la relación de tensión (L_r) para cada tipo de material: ($L_{rmax.MB}$) y ($L_{rmax.WM}$):

$$L_{rmax.MB} = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{ut}}{2\sigma_{ys}} = 1.12 \quad (4.9)$$

$$L_{rmax.WM} = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{ut}}{2\sigma_{ys}} = 1.09 \quad (4.10)$$

-Con objeto de determinar los diagramas de fallo de cada una de las zonas, se utilizaron las siguientes expresiones:

En base a lo anterior, se obtuvieron los diagramas FAD mostrados en la Figura 4-3 y la Figura 4-4 para el metal base y el metal fundido respectivamente.

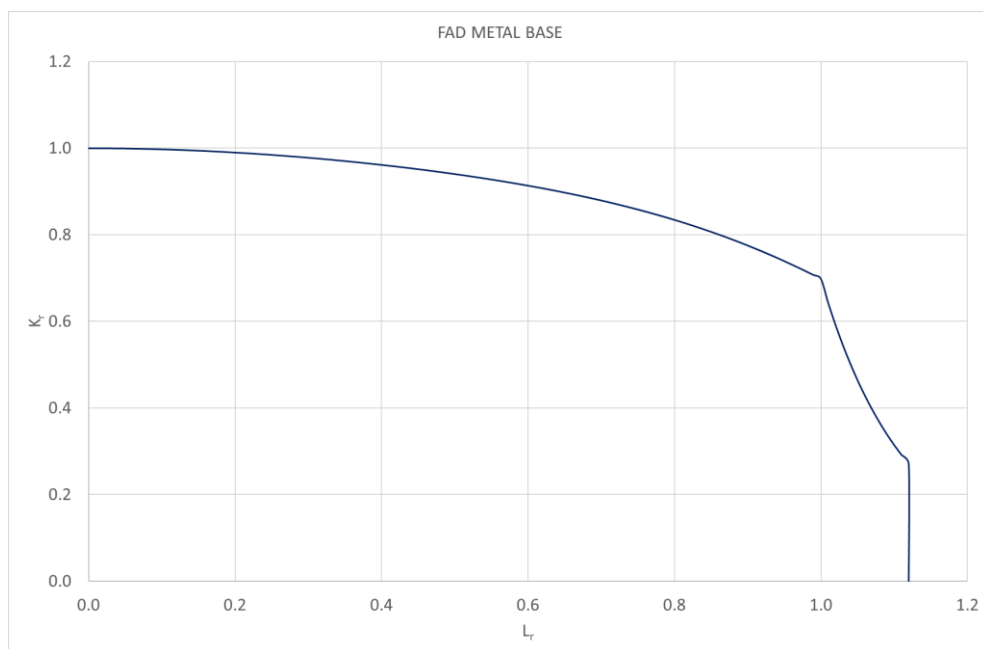


Figura 4-3. Diagrama de fallo del metal base

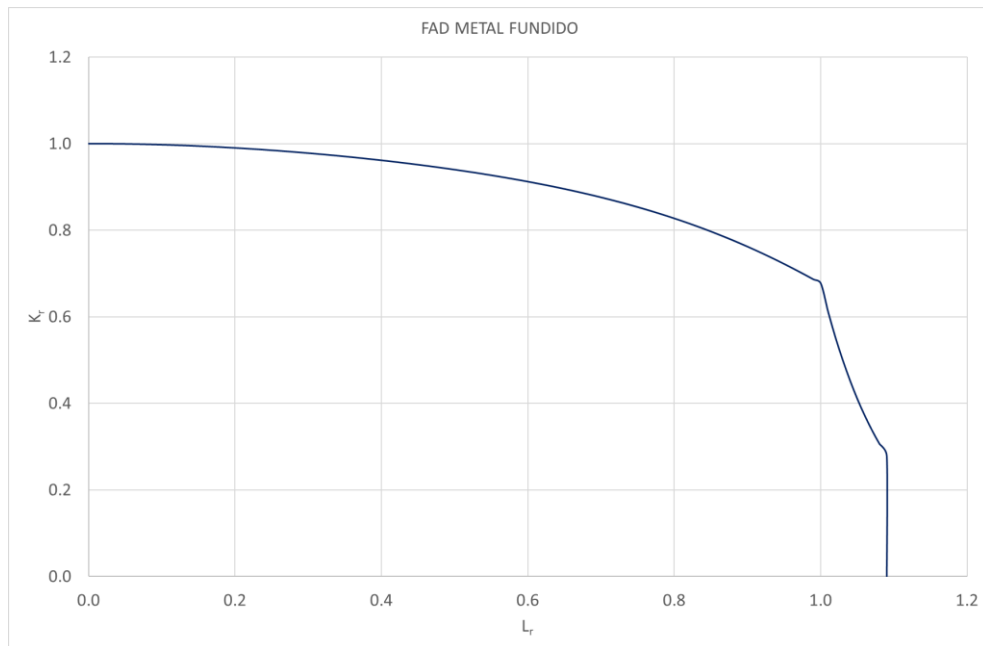


Figura 4-4. Diagrama de fallo del metal fundido

En base a estos diagramas se puede situar el punto de trabajo del componente, con objeto de realizar un análisis del margen de seguridad con el cual se encuentre trabajando frente al fallo por fractura. Para ello, se calculan las relaciones de carga, L_r (expresión 2.6) y de fractura, K_r (expresión 2.7) haciendo uso a su vez de las expresiones (2.8) y (2.9) para el cálculo del factor de intensidad de tensiones y la tensión efectiva del componente agrietado.

4.9.- Análisis a fatiga

El análisis a fatiga se debe realizar siempre que el rango del factor de intensidad de tensiones (ΔK) al que se ve sometida la quilla supera el valor de ΔK_{th} . Por esta razón, para un determinado rango de tensiones y longitud de defecto se calcula en primer lugar el rango del factor de intensidad de tensiones, de acuerdo con la expresión 2.8.

Habiendo verificado esta premisa, y haciendo uso de los valores de la ley de Paris, se calcula el crecimiento de la grieta durante un determinado periodo de tiempo, en base a la expresión 2.18.

Conocido el nuevo tamaño de grieta se vuelve a realizar el análisis a fractura para verificar que aún se encuentra en zona segura y así sucesivamente hasta el fallo.



4.10.- Herramienta desarrollada

En base a las propiedades del material, así como la metodología de cálculo expuesta anteriormente, se implementó, en el software Microsoft Excel, una herramienta cuyo objeto fue el cálculo del factor de seguridad frente a la fractura, así como el número de ciclos restante a fatiga.

Para ello, se introdujo en primer lugar una tabla en la cual se han de introducir las dimensiones de la grieta existente en milímetros, así como la zona de navegación.

A partir de estos datos, la herramienta muestra, por un lado, el punto de trabajo del componente a fractura en el diagrama FAD, así como el correspondiente margen de seguridad del mismo. Así mismo, se muestran también el número de ciclos de vida a fatiga que restan en el componente, supuesto sometido a una determinada amplitud de tensiones, así como su traducción en días, en base a las características de navegación de la zona de viaje analizada (ver Figura 4-5).

ZONA DE NAVEGACIÓN	3	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 1)	
LONGITUD TOTAL DE GRIETA (mm)	110	MARGEN DE SEGURIDAD	1.04
CICLOS DE FATIGA RESTANTES	48817	DÍAS DE TRABAJO RESTANTES	18

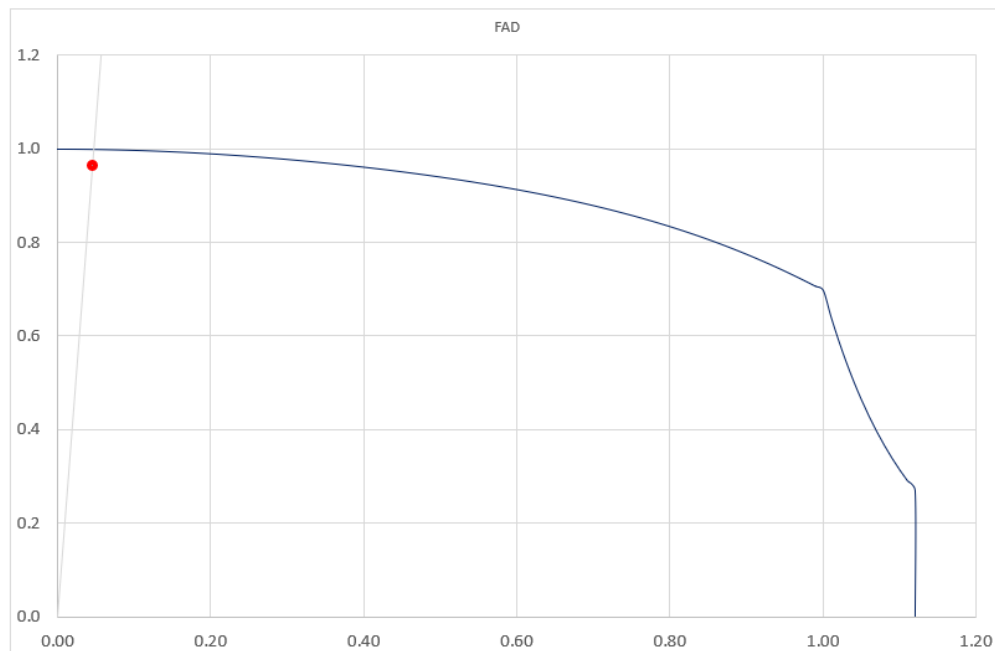


Figura 4-5. Interfaz de la herramienta de cálculo

5.- RESULTADOS

5.1.- Tensiones en la quilla

Del cálculo por elementos finitos realizado sobre la quilla, se obtuvo el siguiente estado tensional en la misma, para un esfuerzo de referencia sobre la quilla de 300.000N. En la Figura 5-1 se muestra la vista general del campo tensional de Von Mises obtenido.

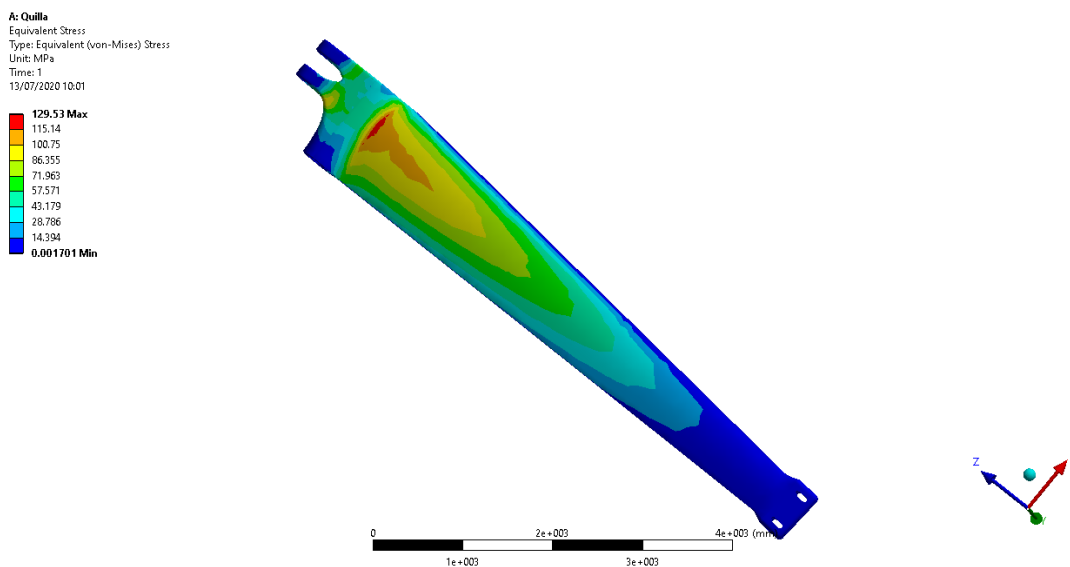


Figura 5-1. Detalle del estado tensional obtenido tras la simulación (ANSYS)

Como puede observarse, las tensiones más elevadas se obtuvieron en la zona central del radio de acuerdo situado en la parte superior de la quilla, donde se une la parte plana de la quilla con la zona cilíndrica que aloja a los ejes. No obstante, la zona más propensa a contener una grieta será la zona de la soldadura situada unos centímetros más arriba, la cual se muestra en la Figura 5-2.

Obtenidas las tensiones a lo largo del espesor de la quilla, en la Figura 5-3 se muestra el resumen de las tensiones linealizadas obtenidas a lo largo de la sección de la unión soldada, así como sus valores en cada extremo de la línea.

En base a estos resultados, se obtuvieron las tensiones de membrana y flexión (bending) correspondientes a cada uno de las distintas travesías, mediante una relación lineal entre el esfuerzo de la simulación y el esfuerzo del supuesto en concreto. En la Tabla 5-1 se muestran las tensiones linealizadas en cada tramo de viaje.

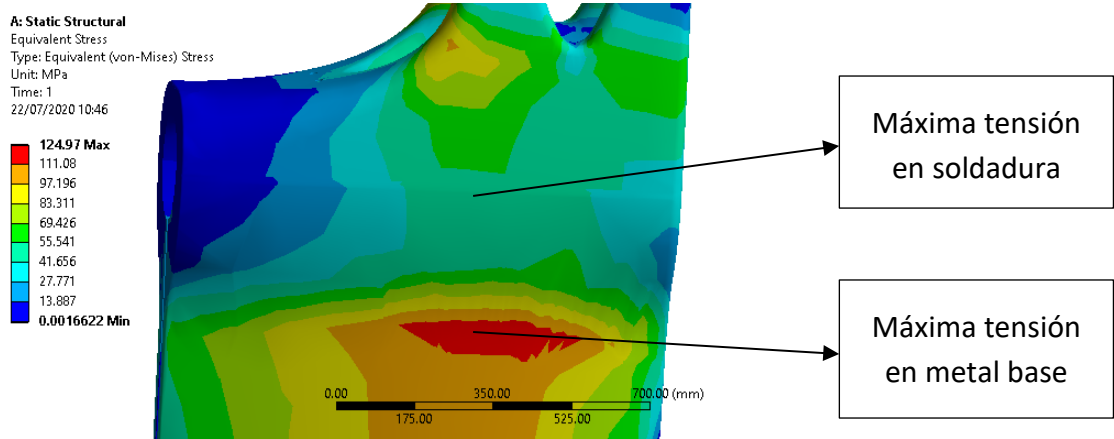


Figura 5-2. Detalle de tensiones en la parte superior de la quilla (ANSYS)

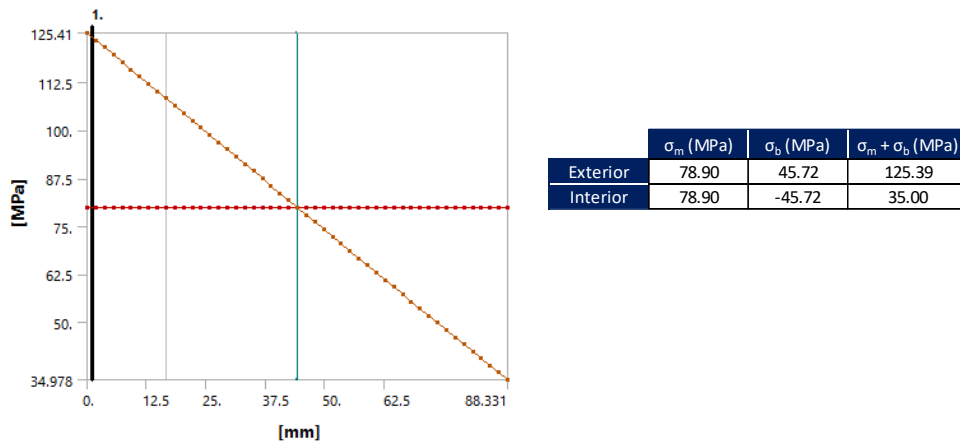


Figura 5-3. Linealización de tensiones (ANSYS)

Viaje		Fuerza quilla (N)	Pm (MPa)	Pb (MPa)
1	Canarias-Cuba (Parte 1)	372439	98	57
2	Canarias-Cuba (Parte 2)	182434	48	28
3	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 1)	410475	108	63
4	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 2)	222148	58	34
5	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 3)	131808	35	20
6	Ciudad del Cabo-Canarias	164646	43	25

Tabla 5-1. Linealización de tensiones para cada uno de los supuestos de carga



Por su parte, y con objeto de determinar el rango de tensiones en regímenes de trabajo a fatiga, el cliente proporcionó una serie de datos de oleaje, en los cuales se recogía una media del valor de relajación del esfuerzo sobre el lateral de la quilla (y por tanto la variación de la tensión) en función de la intensidad de oleaje.

A continuación, en la Tabla 5-2, muestran los datos de variación tensional en función de la intensidad de oleaje.

Viaje	Altura ola	Variación de tensión por olas	Tensión máxima (MPa)	Tensión mínima (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
1 Canarias-Cuba (Parte 1)	Media	30%	161	113	48
2 Canarias-Cuba (Parte 2)	Alta	35%	79	51	28
3 Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 1)	Baja	25%	177	133	44
4 Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 2)	Alta	35%	96	62	34
5 Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 3)	Media	30%	57	40	17
6 Ciudad del Cabo-Canarias	Alta	35%	71	46	25

Tabla 5-2. Variación de tensión en la embarcación en función del oleaje.

5.2.- Tenacidad y fatiga

La herramienta desarrollada permitió, por un lado, la obtención del tamaño crítico de grieta para cada uno de los casos de carga (viajes) así como la realización de análisis de vida durante el uso de la quilla. Por otro lado, también permite realizar análisis iniciales de fractura y fatiga, en función del tamaño inicial de grieta.

En lo que se refiere a la propagación de grietas en el material base, se comprobó que este supuesto no era posible, al no superarse en ningún caso el umbral de fatiga del material (ecuación 2.18).

En lo que se refiere a propagación de grieta en la soldadura, al haberse supuesto un tamaño inicial de grieta de 3mm se obtuvo una vida útil del componente (ver Figura 5-4) de prácticamente 60 temporadas con los supuestos viajes planteados que equivalen a un total de 1.686.709 de kilómetros.

ZONA DE NAVEGACIÓN		CICLOS TOTALES EN ZONA	CICLOS / VIAJE	Porción de vida gastada
1	Canarias-Cuba (Parte 1)	6732505	43200	0.64
2	Canarias-Cuba (Parte 2)	34880164	33150	0.10
3	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 1)	8269034	47557	0.58
4	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 2)	19892193	30857	0.16
5	Cuba-Ciudad del Cabo (Parte 3)	132624695	31752	0.02
6	Ciudad del Cabo-Canarias	46651070	85000	0.18
DAÑO POR TEMPORADA				1.67
TEMPORADAS ESPERADAS				59.77

Figura 5-4. Análisis global a fatiga



6.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un análisis de integridad estructural de una quilla de una embarcación a vela de competición. De los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) La concentración tensional se sitúa en el radio de acuerdo superior de la quilla, quedando completamente embebido en el material base, lo que implica que una posible propagación de grieta en esa zona vendría dada en el caso de que el factor de intensidad de tensiones sea superior al umbral de fatiga del material base.
- 2) Los esfuerzos más importantes sobre el componente derivan de la primera parte del viaje realizado entre Cuba y Ciudad del Cabo, siendo los menos importantes los de la tercera parte de ese mismo viaje.
- 3) Derivado de lo anterior, la fisura crítica de menor tamaño se situó en la primera parte del viaje entre Cuba y Ciudad del Cabo, siendo su valor de 91mm, mientras que la grieta crítica de mayor tamaño, y por tanto la zona de navegación menos agresiva, fue la de la tercera parte de ese mismo viaje con una longitud de 880mm.
- 4) En las rutas analizadas y en condiciones normales, nunca se produciría la propagación de la grieta por el metal base, dado que el rango de tensiones máximo soportado se encuentra siempre por debajo del umbral de fatiga del material.
- 5) La utilización del componente en cualquiera de las zonas es completamente segura en su estado de servicio inicial, al tenerse en todos los casos márgenes de seguridad frente a fractura de entre 6.16 y 18.68.
- 6) El inicio de la propagación de grietas por fatiga se produciría en la unión soldada, puesto que en el metal base no se supera el límite de fatiga del material. Para estos casos la vida a fatiga fue de 3.063 y 40.934 días respectivamente (suponiéndose una completa navegación en estas aguas).



-
- 7) Para el análisis a fatiga global, considerando navegaciones cíclicas en base a los datos aportados por el cliente, se obtuvo una vida útil de 60 temporadas de navegación, equivalentes a 1686709 km.



7.- REFERENCIAS

- [1] Wikipedia. (2020). Quilla (náutica).
[https://es.wikipedia.org/wiki/Quilla_\(n%C3%A1utica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Quilla_(n%C3%A1utica))
- [2] Fondear (2020). ¿Perder la quilla? Cómo prevenir este desastre.
http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Diseno_Construccion/Quilla/Perdida-de-quilla.asp
- [3] Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras. O.J. Aranque de los Ríos (2013)
- [4] Valencia eventos náuticos (2020). Vela deportiva.
https://www.valenciaeventosnauticos.com/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-vela-deportiva/#Vela_olimpica
- [5] Aubert Duval APX4.
<https://www.aubertduval.com/alloy/682/>
- [6] The physics of sailing. Bryan D. Anderson (2008)
- [7] BS7910 - British Standards. (2013)
- [8] FITNET FFS - European Fitnet for Service. (2001)
- [9] ASME BPVC XI – The american Society of Mechaical Engineers (2010)
- [10] Aplicación del procedimiento europeo FITNET al análisis a fractura de paneles de aluminio soldados. S. Cicero (2007)
- [11] Certificado de aporte CASTOLIN EUTECTIC 4080EC.
- [12] UNE-EN ISO 148-3:2017. Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 3: Preparación y caracterización de las probetas Charpy con entalla en V para la verificación indirecta de las máquinas de ensayo de impacto con péndulo.
- [13] UNE-EN ISO 9015-2:2016. Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de dureza. Parte 2: Ensayo de microdureza en uniones soldadas. (ISO 9015-2:2016).
- [14] J.M. Barson, S.T. Rolfe, «Fracture and Fatigue Control in Structures» 2nd Ed., Pretince-hall, Englewood Cliffs, NJ (1987)