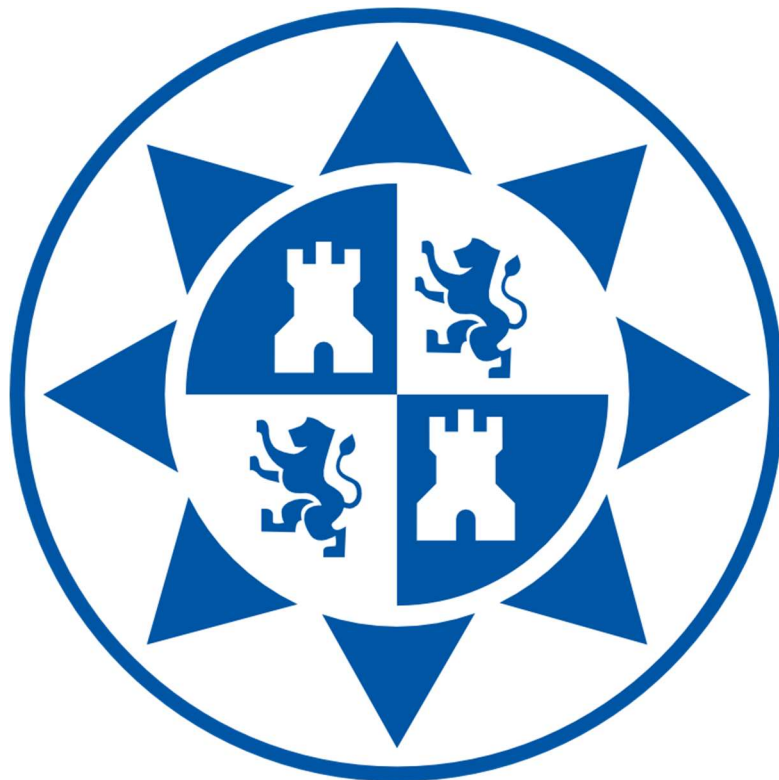


# **DISEÑO DE UNA EMBARCACIÓN LIGERA UTILIZANDO FOILS**

**TRABAJO FINAL DE ESTUDIOS**

**GRADO EN ARQUITECTURA NAVAL E INGENIERÍA DE SISTEMAS  
MARINOS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**



**AUTOR:**

**GINÉS GARCÍA IMBERNÓN**

**TUTORES:**

**DR. DAVID HERRERO PÉREZ**

**DR. HUMBERTO MARTÍNEZ BARBERÁ**



## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría empezar agradeciendo a mis dos tutores, el Dr. David Herrero Pérez y el Dr. Humberto Martínez Barberá. En primer lugar, por darme la oportunidad de poder hacer este trabajo realmente apasionante y por proponerlo justo en el momento preciso. En segundo lugar, porque pese a ser un año muy difícil para todo el profesorado por lo que todos ya sabemos, siempre han estado ahí para solucionar mis problemas con sus vastos conocimientos por muy obvias o abstractas que fuesen mis preguntas.

También me gustaría dar mi profundo agradecimiento a Álex y a Nino por ser mi ancla en Cartagena.



## Índice

Índice de imágenes.....	9
Índice de tablas .....	12
Resumen.....	14
1. INTRODUCCIÓN .....	15
1.1. Antecedentes .....	15
1.2. Objetivos .....	17
1.3. Metodología .....	17
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
2.1. Introducción .....	19
2.2. Criterios de diseño del foil para la sustentación .....	19
2.3. Resistencia al avance en la condición de navegación con foils.....	24
3. PRIMERAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO .....	26
3.1. Introducción .....	26
3.2. Estimación del peso de la embarcación .....	26
3.3. Configuración y disposición de los foils.....	30
4. SELECCIÓN DEL PERFIL Y ESTIMACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS FOILS .....	32
4.1. Introducción .....	32
4.2. Selección de perfiles y definición del proceso de cálculo .....	32
4.3. Comparación entre perfiles y selección de un foil con el área total.....	34
4.3.1. NACA 63-412 .....	34
4.3.2. NACA 64-212 .....	35
4.3.3. NACA 0012 .....	36
4.3.4. Selección final.....	36
4.4. Estimación de los foils de proa y de popa a partir del foil con el área total.....	37
4.5. Análisis de la cavitación para los foils obtenidos .....	38
5. CÁLCULO DEL CONJUNTO ESTRUCTURAL MÁSTIL-FOIL.....	41
5.1. Introducción .....	41
5.2. Estimación y selección del perfil de los mástiles.....	41
5.3. Selección del material .....	43
5.3.1. Criterios de selección .....	43
5.3.2. Etapas del proceso de selección .....	44
5.3.3. Elección final del material .....	46
5.4. Cálculo de la viabilidad estructural del sistema .....	47
5.4.1. Criterio de máxima tensión de Von Mises .....	48

5.4.2. Cálculo de áreas y momentos de inercia de las secciones transversales de mástiles y foils .....	48
5.4.3. Construcción del conjunto estructural de proa para la condición de despegue (MEFI) .....	49
5.4.4. Construcción del conjunto estructural de popa para la condición de despegue (MEFI) .....	52
5.4.5. Construcción del conjunto estructural de proa para la condición de crucero (MEFI) .....	54
5.4.6. Construcción del conjunto estructural de popa para la condición de crucero (MEFI) .....	56
5.4.7. Análisis de resultados .....	58
6. DEFINICIÓN BÁSICA DE LA EMBARCACIÓN .....	67
6.1. Introducción .....	67
6.2. Dimensionamiento de la embarcación .....	67
6.2.1. Base de datos .....	67
6.2.2. Relación entre dimensiones .....	67
6.2.3. Resultados .....	69
6.3. Formas de la embarcación .....	69
6.3.1. Justificación de las formas de la embarcación .....	70
6.3.2. Definición de la embarcación en Maxsurf .....	70
6.4. Disposición general .....	72
6.4.1. Definición y distribución de espacios .....	72
7. CÁLCULO DEL SISTEMA PROPULSIVO .....	74
7.1. Introducción .....	74
7.2. Cálculo de la resistencia al avance producida por el casco .....	74
7.2.1. Método de Savitsky .....	74
7.2.2. Método de Savitsky mediante Maxsurf Resistance .....	77
7.2.3. Análisis de resultados .....	77
7.3. Cálculo de la potencia total .....	78
7.3.1. Condición de despegue .....	78
7.3.2. Condición de crucero .....	78
7.4. Selección del motor y de las baterías .....	79
8. ESCANTILLONADO DE LA EMBARCACIÓN .....	81
8.1. Introducción .....	81
8.2. Materiales .....	81
8.2.1. Matriz .....	81
8.2.2. Refuerzo .....	82

8.2.3. Recubrimientos .....	83
8.2.4. Materiales del núcleo.....	84
8.3. Disposición estructural de la embarcación .....	84
8.4. Cálculo del escantillonado.....	87
8.4.1. Parámetros iniciales y ámbito de aplicación de la norma.....	87
8.4.2. Factores de ajuste de presión .....	89
8.4.3. Presiones de diseño de la embarcación .....	92
8.4.4. Espesor mínimo de los paneles .....	94
8.4.5. Contenido mínimo de masa para el laminado o espesor mínimo .....	97
8.4.6. Factores de ajuste de las propiedades de los refuerzos .....	98
8.4.7. Tensiones de diseño de los refuerzos .....	99
8.4.8. Requisitos generales para el diseño de refuerzos.....	99
8.4.9. Requisitos específicos para los refuerzos de la embarcación .....	100
8.4.10. Cálculo de paneles de fondo .....	101
8.4.11. Cálculo de paneles de costado .....	103
8.4.12. Cálculo de paneles de cubierta .....	104
8.4.13. Cálculo del mamparo estanco .....	105
8.4.14. Cálculo del espejo de popa .....	106
8.4.15. Cálculo de la quilla.....	107
8.4.16. Cálculo del refuerzo en el codillo .....	109
8.4.17. Cálculo del refuerzo en la roda .....	109
9. EVALUACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PESOS.....	111
9.1. Introducción .....	111
9.2. Peso total de la embarcación y estimación del centro de gravedad .....	111
9.2.1. Paneles de fondo, cubierta y costado .....	111
9.2.2. Refuerzos.....	112
9.2.3. Equipos .....	112
9.2.4. Tripulación.....	113
9.2.5. Peso de mástiles y foils.....	113
9.2.6. Peso total de la embarcación .....	113
9.3. Posición de mástiles y foils.....	115
10. CONCLUSIONES .....	117
11. REFERENCIAS .....	118
ANEXOS .....	120
ANEXO I. RESULTADOS DE LOS FOILS ENSAYADOS .....	120
a) Resultados NACA 63-412 (foil de área total).....	121

b)	Resultados NACA 64-212 (foil de área total).....	122
c)	Resultados NACA 0012 (foil de área total).....	123
d)	Resultados foils finales.....	124
	ANEXO II. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONJUNTO MÁSTIL-FOIL.....	125
a)	Análisis del conjunto estructural de proa (despegue) .....	126
b)	Análisis del conjunto estructural de proa (cruce).....	127
c)	Análisis del conjunto estructural de popa (despegue).....	128
d)	Análisis del conjunto estructural de popa (cruce) .....	129
	ANEXO III. CÁLCULO DE LA POTENCIA MEDIANTE EL MÉTODO DE SAVITSKY .....	130
	ANEXO IV. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL ESCANTILLONADO DE LA EMBARCACIÓN .....	132
a)	Resultados del escantillado de paneles .....	133
b)	Resultados del escantillado de refuerzos .....	134
	ANEXO V. PLANOS Y ESQUEMAS.....	135
a)	Conjuntos estructurales de proa y de popa .....	135
b)	Plano de formas .....	138
c)	Primera disposición general orientativa .....	140
d)	Disposición de los apéndices a lo largo de la eslora de la embarcación.....	142



## Índice de imágenes

<i>Imagen 1: Hidroala diseñado por Enrico Forlanini (Desconocido, 1910)</i>	15
<i>Imagen 2: "Jet-Foil" de la empresa Transmediterránea empleado en Canarias desde principios de los años 80 (Díaz Lorenzo, 2016)</i>	16
<i>Imagen 3: Foils (en rojo) de un velero AC75 según el mapa interactivo de la web del Emirates Team New Zealand (Copa América)</i>	16
<i>Imagen 4: Distribución de la presión en un foil (Alexander, Grogono and Nigg, 1972)</i>	20
<i>Imagen 5: Geometría básica del foil (White, 2008)</i>	21
<i>Imagen 6: Variación del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque (Faltinsen, 2005)</i>	22
<i>Imagen 7: Ejemplo de distribución del coeficiente de sustentación a lo largo de la envergadura de una sección alar (Badis, 2017)</i>	22
<i>Imagen 8: Aparición de vórtices en los extremos del foil (Faltinsen, 2005)</i>	23
<i>Imagen 9: Batería Varta Profesional LA95</i>	27
<i>Imagen 10: Batería Relion RB 100 12,8V 100 AH</i>	27
<i>Imagen 11: Catálogo de motores marinos sumergibles de la empresa Krätler Elektromaschinen</i>	28
<i>Imagen 12: Catálogo de motores fueraborda de la empresa Krätler Elektromaschinen</i>	28
<i>Imagen 13: Motores eléctricos sumergibles de Krätler Elektromaschinen</i>	29
<i>Imagen 14: Motor eléctrico fueraborda de Krätler Elektromaschinen</i>	29
<i>Imagen 15: Tipos de configuración de los foils en un hidroala (Faltinsen, 2005)</i>	30
<i>Imagen 16: Diferencia entre hidroala con los foils estilo surface-piercing e hidroala con los foils totalmente sumergidos (Lei, 2015)</i>	31
<i>Imagen 17: NACA 63-412</i>	32
<i>Imagen 18: NACA 64-212</i>	33
<i>Imagen 19: NACA 0012</i>	33
<i>Imagen 20: Panel de opciones del programa JavaFoil</i>	34
<i>Imagen 21: Panel de Polares del programa JavaFoil</i>	34
<i>Imagen 22: Panel Boundary Layer del programa JavaFoil</i>	38
<i>Imagen 23: Hidroala de la empresa Quadrofoil</i>	39
<i>Imagen 24: Variación del coeficiente de presión a lo largo de la cuerda del foil en la condición de despegue</i>	40
<i>Imagen 25: Variación del coeficiente de presión a lo largo de la cuerda del foil en la condición de crucero</i>	40
<i>Imagen 26: Coeficiente de resistencia aproximado de un foil simétrico (Carvill, 1994)</i>	41
<i>Imagen 27: NACA 16-011</i>	42
<i>Imagen 28: Variación del coeficiente de presión a lo largo de la cuerda del NACA 16-011 en las condiciones de funcionamiento</i>	43
<i>Imagen 29: Gráfica densidad-precio</i>	44
<i>Imagen 30: Gráfica radiación solar-agua salada</i>	45
<i>Imagen 31: Gráfica límite elástico-tensión de rotura</i>	45
<i>Imagen 32: Gráfica límite elástico-módulo de Young</i>	46
<i>Imagen 33: Configuración de un hydrofoil de la marca Seabubble, similar a la de la embarcación del presente trabajo</i>	47
<i>Imagen 34: NACA 63-412 girado -2,6º importado en Rhinoceros 3D</i>	49
<i>Imagen 35: Modelo MEFI creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (despegue)</i>	50
<i>Imagen 36: Parámetros modelo proa vista frontal (despegue).</i>	51
<i>Imagen 37: Modelo MEFI creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (despegue)</i>	51
<i>Imagen 38: Parámetros modelo proa vista lateral (despegue)</i>	52
<i>Imagen 39: Modelo MEFI creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (despegue)</i>	52
<i>Imagen 40: Parámetros modelo popa vista frontal (despegue)</i>	53

<i>Imagen 41: Modelo MEFI creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (despegue)</i>	53
<i>Imagen 42: Parámetros modelo popa vista lateral (despegue)</i>	54
<i>Imagen 43: Modelo MEFI creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (crucero)</i>	55
<i>Imagen 44: Parámetros modelo proa vista frontal (crucero)</i>	55
<i>Imagen 45: Modelo MEFI creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (crucero)</i>	56
<i>Imagen 46: Parámetros modelo proa vista lateral (crucero)</i>	56
<i>Imagen 47: Modelo MEFI creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (crucero)</i>	57
<i>Imagen 48: Parámetros modelo popa vista frontal (crucero)</i>	57
<i>Imagen 49: Modelo MEFI creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (crucero)</i>	58
<i>Imagen 50: Parámetros modelo popa vista lateral (crucero)</i>	58
<i>Imagen 51: Definición de nodos en el conjunto estructural de proa</i>	59
<i>Imagen 52: Definición de nodos en el conjunto estructural de popa</i>	59
<i>Imagen 53: Cargas en newtons sobre el mástil a una profundidad de 60 cm</i>	60
<i>Imagen 54: Cargas en newtons sobre el mástil a una profundidad de 30 cm</i>	61
<i>Imagen 55: Gráfica desplazamiento-eslora</i>	68
<i>Imagen 56: Gráfica desplazamiento-manga</i>	68
<i>Imagen 57: Gráfica desplazamiento-puntal</i>	69
<i>Imagen 58: Características hidrostáticas de la embarcación definida.</i>	71
<i>Imagen 59: Embarcación generada de diferentes vistas.</i>	72
<i>Imagen 60: Disposición general de distintos equipos en el hidroala eléctrico de Candela Boats</i>	73
<i>Imagen 61: Parámetros principales de la embarcación para la estimación de potencia por el método de Savitsky</i>	75
<i>Imagen 62: Gráfico utilizado para situar la embarcación en la zona de planeo o preplaneo (Savitsky and Brown, 1976)</i>	76
<i>Imagen 63: Estimación de la potencia mediante el método de Savitsky a través de Maxsurf Resistance</i>	77
<i>Imagen 64: Disposición de motor y baterías a bordo según Kräutler Elektromaschinen</i>	79
<i>Imagen 65: Dimensiones de una batería Relion RB200</i>	80
<i>Imagen 66: Filtro de fibra de vidrio</i>	83
<i>Imagen 67: Tejido tipo tela de fibra de vidrio</i>	83
<i>Imagen 68: Disposición estructural típica de una pequeña embarcación según la ISO 12215-6</i>	85
<i>Imagen 69: Diferenciación de los paneles según la zona</i>	85
<i>Imagen 70: Definición de paneles de fondo</i>	86
<i>Imagen 71: Definición de paneles de costado</i>	86
<i>Imagen 72: Definición de paneles de cubierta</i>	86
<i>Imagen 73: Ejemplos de cómo crear paneles rectangulares equivalentes</i>	87
<i>Imagen 74: Semiángulo del diedro del fondo según el tipo de embarcación, siendo la presente embarcación del primer tipo</i>	88
<i>Imagen 75: Valores de KDC según la categoría de diseño</i>	89
<i>Imagen 76: Valores mínimos de kAR</i>	91
<i>Imagen 77: Definición de las zona y altura de los paneles por encima de la flotación</i>	92
<i>Imagen 78: Distintas formas de definir hB para un mamparo estanco</i>	94
<i>Imagen 79: Valores posibles de kC</i>	94
<i>Imagen 80: Medición de la curvatura</i>	95
<i>Imagen 81: Valores de k2 y k3</i>	95
<i>Imagen 82: Método de determinación del nivel de evaluación de las propiedades mecánicas</i>	96
<i>Imagen 83: Contenido nominal de fibra en masa</i>	96
<i>Imagen 84: Propiedades mecánicas del laminado de fibra de vidrio E</i>	97
<i>Imagen 85: Valor de los distintos parámetros a emplear</i>	98

<i>Imagen 86: Espesor mínimo de la cubierta</i>	98
<i>Imagen 87: Valores del factor de ajuste por curvatura de los refuerzos</i>	98
<i>Imagen 88: Valores del factor de superficie de cizalla</i>	99
<i>Imagen 89: Tensiones de diseño para refuerzos en función del material</i>	99
<i>Imagen 90: Zonas reforzadas del laminado</i>	100
<i>Imagen 91: Relación entre espesor y masa de fibra seca</i>	102
<i>Imagen 92: Mamparo estanco</i>	105
<i>Imagen 93: Disposición en sombrero de copa alto</i>	107
<i>Imagen 94: Posibles perfiles de sombreros de copa altos</i>	108
<i>Imagen 95: Hidrostáticas una vez conocido el centro de gravedad de la embarcación</i>	115
<i>Imagen 96: Posiciones finales de los foils de proa y popa en la embarcación</i>	116

## Índice de tablas

Tabla 1: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4,5 (despegue)	35
Tabla 2: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4,5 (crucero)	35
Tabla 3: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4 (despegue)	35
Tabla 4: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4 (crucero)	35
Tabla 5: Resultados NACA 64-212 para una relación de aspecto de 4 (despegue)	35
Tabla 6: Resultados NACA 64-212 para una relación de aspecto de 4 (crucero)	36
Tabla 7: Resultados NACA 0012 para una relación de aspecto de 4 (despegue)	36
Tabla 8: Resultado NACA 0012 para una relación de aspecto de 4 (crucero)	36
Tabla 9: Características del foil (área total) seleccionado	36
Tabla 10: Características de funcionamiento del foil (área total) seleccionado	37
Tabla 11: Características de los foils de proa y popa	37
Tabla 12: Características de funcionamiento del foil de proa	37
Tabla 13: Características de funcionamiento del foil de popa	38
Tabla 14: Resultados de la cavitación para los foils seleccionados	39
Tabla 15: Características de los mástiles	42
Tabla 16: Ángulo de inclinación de los mástiles	42
Tabla 17: Resultados para distintos perfiles de mástiles	42
Tabla 18: Propiedades del material seleccionado para la estructura de mástiles y foils	47
Tabla 19: Características de la sección transversal de los perfiles del conjunto estructural mástil-foil	49
Tabla 20: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,34 m (despegue)	61
Tabla 21: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,49 m (despegue)	61
Tabla 22: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,64 m (despegue)	62
Tabla 23: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,78 m (despegue)	62
Tabla 24: Tensiones de Von Mises del conjunto de proa para las distintas profundidades (despegue)	62
Tabla 25: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,15 m (crucero)	62
Tabla 26: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,30 m (crucero)	62
Tabla 27: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,45 m (crucero)	63
Tabla 28: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,60 m (crucero)	63
Tabla 29: Tensiones de Von Mises del conjunto de proa para las distintas profundidades (crucero)	63
Tabla 30: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,34 m (despegue)	64
Tabla 31: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,49 m (despegue)	64
Tabla 32: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,64 m (despegue)	64
Tabla 33: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,78 m (despegue)	64
Tabla 34: Tensiones de Von Mises del conjunto de popa para las distintas profundidades (despegue)	65
Tabla 35: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,15 m (crucero)	65
Tabla 36: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,30 m (crucero)	65
Tabla 37: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,45 m (crucero)	65
Tabla 38: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,60 m (crucero)	66
Tabla 39: Tensiones de Von Mises del conjunto de popa para las distintas profundidades (crucero)	66
Tabla 40: Base de datos de embarcaciones similares	67
Tabla 41: Dimensiones generales de la embarcación	69
Tabla 42: Características generales de la embarcación	71
Tabla 43: Resultados para verificar la condición de navegación	76
Tabla 44: Resultados propios de resistencia y potencia	77
Tabla 45: Distintas componentes de la resistencia para la condición de despegue	78
Tabla 46: Resistencia total a vencer y potencia necesaria para la condición de despegue	78
Tabla 47: Distintas componentes de la resistencia para la condición de crucero	78
Tabla 48: Resistencia total a vencer y potencia necesaria para la condición de crucero	78
Tabla 49: Características principales del motor seleccionado	79
Tabla 50: Características principales de las baterías seleccionadas	80
Tabla 51: Propiedades principales de la fibra de vidrio E	82
Tabla 52: Distintos tipos de espumas PVC (Arias Padilla, 2019)	84

Tabla 53: Parámetros iniciales	88
Tabla 54: Parámetros iniciales de los paneles de fondo	101
Tabla 55: Presiones de los paneles de fondo	102
Tabla 56: Espesores mínimos de los paneles de fondo	102
Tabla 57: Laminado de los paneles de fondo	102
Tabla 58: Contenido mínimo en fibra para los paneles de fondo	103
Tabla 59: Parámetros iniciales de los paneles de costado	103
Tabla 60: Presiones de los paneles de costado	103
Tabla 61: Espesores mínimos de los paneles de costado	103
Tabla 62: Laminado de los paneles de costado	103
Tabla 63: Contenido mínimo en fibra para los paneles de costado	104
Tabla 64: Parámetros iniciales de los paneles de cubierta	104
Tabla 65: Presiones de los paneles de cubierta	104
Tabla 66: Espesores mínimos de los paneles de cubierta	104
Tabla 67: Laminado de los paneles de cubierta	104
Tabla 68: Espesor mínimo para los paneles de cubierta	104
Tabla 69: Parámetros iniciales del mamparo estanco	105
Tabla 70: Espesor mínimo del mamparo	105
Tabla 71: Laminado del mamparo estanco	105
Tabla 72: Espesores del espejo de popa	106
Tabla 73: Laminado del espejo de popa	106
Tabla 74: Contenido mínimo en fibra para el espejo de popa	106
Tabla 75: Parámetros iniciales de la quilla	107
Tabla 76: Propiedades mínimas de la quilla	107
Tabla 77: Propiedades de la primera quilla seleccionada	108
Tabla 78: Contenido mínimo en fibra de la quilla	108
Tabla 79: Propiedades finales de la quilla	109
Tabla 80: Contenido mínimo en fibra del refuerzo del codillo	109
Tabla 81: Laminado del refuerzo del codillo	109
Tabla 82: Cantidad mínima en fibra de la roda	109
Tabla 83: Laminado del refuerzo de la roda	110
Tabla 84: Pesos y momentos de los paneles	112
Tabla 85: Coordenadas del centro de gravedad de los paneles	112
Tabla 86: Pesos y momentos de los refuerzos	112
Tabla 87: Coordenadas del centro de gravedad de los refuerzos	112
Tabla 88: Pesos y momentos de los equipos	113
Tabla 89: Coordenadas del centro de gravedad de los equipos	113
Tabla 90: Pesos y momentos de la tripulación	113
Tabla 91: Coordenadas del centro de gravedad de la tripulación	113
Tabla 92: Pesos de mástiles y foils	113
Tabla 93: Peso total de la embarcación	114
Tabla 94: Peso de la embarcación sin la estructura de mástiles y foils	114
Tabla 95: Pesos y momentos de la embarcación sin mástiles ni foils	114
Tabla 96: Coordenadas del centro de gravedad de la embarcación sin mástiles ni foils	114

## Resumen

El empleo de foils en embarcaciones ligeras permite aumentar de forma significativa la velocidad a la que se desplazan estas embarcaciones. Esto se debe a que permiten elevar el casco de la embarcación reduciendo la superficie mojada y el volumen de carena. Consecuencia de esto es que se reduce la fuerza de arrastre que debe vencer el empuje, lo que además repercute en la posibilidad de elegir plantas propulsoras menos agresivas con el medio ambiente en términos de contaminación. Esta preocupación por las emisiones y el medio ambiente es la que se está imponiendo en la actualidad a la hora del diseño de nuevas embarcaciones en todos los astilleros de nueva construcción a nivel mundial.

Los fundamentos en los que se basa el uso de foils consisten en la forma en la que desvía el flujo el foil según se mueve la embarcación, generando una componente hacia fuera del fluido, conocida como sustentación, y por tanto elevando la embarcación. En este trabajo se estudiarán los principios hidrodinámicos que rigen el comportamiento de foils, se propondrá un diseño de embarcación ligera utilizando estos foils y se validará el diseño propuesto mediante cálculos y simulaciones.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

El diseño y mejora de las embarcaciones con foils, los también llamados hidroalas o simplemente hydrofoil en inglés, es un tema de cada vez más interés en la industria naval debido a su potencial y al exigente mundo del comercio y la competición. Uno de los principales motivos es sin duda el hecho de que la resistencia total de arrastre a vencer en este tipo de buques es aproximadamente un 50% inferior a la resistencia que tendría que vencer un buque convencional con el mismo desplazamiento (Giallanza, Marannano, Morace & Ruggiero, 2019). Esto supone una doble ventaja ya que, al necesitar menos potencia, necesitamos quemar menos combustible, lo que por un lado nos permite adaptarnos a las normativas cada vez más restrictivas en cuanto a emisiones contaminantes y por otro lado supone un ahorro económico sustancial. Sabiendo que el 90% del comercio mundial de mercancías se realiza vía transporte marítimo y que, por ejemplo, el consumo de fuel de los buques comerciales en el año 2001 fue de 289 millones de toneladas (Corbett and koehler, 2003) las ventajas que supone esta tecnología pueden ser realmente sustanciales.

Sin embargo, el origen de los hidroalas se remonta a más de 100 años. Se suele considerar al bote diseñado y construido en 1906 por el inventor Enrico Forlanini como el primer hydrofoil. Este primer hidroala se caracterizaba por disponer de múltiples foils entre numerosos mástiles y alcanzar una velocidad de 42,5 millas por hora. Basándose en ese modelo, Alexander Bell y Casey Baldwin construyeron el Hydrodome 4 (HD-4) en 1919. Esta embarcación se convertiría en el hidroala más rápido hasta ya entrados los años 60, alcanzando una velocidad de 60 nudos.



*Imagen 1: Hidroala diseñado por Enrico Forlanini (Desconocido, 1910)*

Es a partir de los años 60 cuando se empieza a investigar y estudiar su uso militar, desarrollando distintos modelos como el Patrol Hydrofoil Missiles ship (PHM) en Estados Unidos. En paralelo a este desarrollo también se empezaría a diseñar versiones para el transporte de pasajeros e incluso el ingeniero aeronáutico Walter Woodward desarrollaría lo que se podría considerar el primer esquí acuático con foils.

En España, la introducción de este tipo de embarcaciones empezaría en 1964 con la creación de la empresa “Hydrofoil Española S.A.” en Barcelona con la intención de inaugurar una línea de hidroalas que cubriera distintas rutas entre la costa Brava, Baleares y Francia. En este sentido, el primer hidroala en llegar fue el Carabela la Pinta,

embarcación que podía navegar a 36 nudos y transportar a 76 pasajeros. Aunque hasta mediados de los años 90 muchos hidroalas prestaron servicio haciendo rutas en Canarias, Baleares y Gibraltar, muchos fueron siendo sustituidos gradualmente por fast ferries monocasco o catamaranes pese a que en el resto del mundo nunca han dejado de emplearse (En visita de cortesía, 2019).



*Imagen 2: "Jet-Foil" de la empresa Transmediterránea empleado en Canarias desde principios de los años 80 (Díaz Lorenzo, 2016)*

En la actualidad, además de volver a plantearse su uso para distintas funciones mercantiles debido a sus ventajas, existe una gran utilización de los foils para embarcaciones que practican diversas categorías deportivas e incluso para embarcaciones de recreo. Se pueden encontrar estos foils en embarcaciones de vela para regatas como es el caso de la Copa América y disciplinas tan de moda en la actualidad como el kitesurf. Además, existen distintas empresas dedicadas al diseño y construcción de pequeñas embarcaciones eléctricas sustentadas por foils como son Candela Boats, Quadrofoil y SeaBubbles.



*Imagen 3: Foils (en rojo) de un velero AC75 según el mapa interactivo de la web del Emirates Team New Zealand (Copa América)*

Por todo ello, el propósito de este trabajo consiste en diseñar conceptualmente una pequeña embarcación de recreo con foils que permita una navegación suficientemente eficiente y satisfactoria con una propulsión eléctrica. Para este fin, no sólo se tendrá en cuenta los pequeños hydrofoils eléctricos de las empresas anteriormente mencionadas,



sino también se considerará embarcaciones ligeras de vela y cualquier otro tipo de pequeña embarcación de recreo que pueda resultar útil.

## 1.2. Objetivos

A continuación, se procede a describir los objetivos que se pretenden alcanzar en el presente trabajo. El primero de estos objetivos es abordar una introducción a los principios hidrodinámicos que rigen el comportamiento de los foils. En este sentido es especialmente importante analizar y mostrar los fundamentos en los que se basa la sustentación producida por los foils a la hora de navegar.

El segundo de los objetivos es el de realizar una introducción a los fundamentos y herramientas que permiten modelar geometrías como las que, en este caso, se presentan en los foils. Estas geometrías serán las correspondientes a distintos perfiles alares de tipo NACA. Para ello se trabajará con los distintos softwares de modelado que se han utilizado a lo largo del grado universitario.

Otro de los objetivos es el de realizar una propuesta de diseño de un pequeño hydrofoil. A diferencia del clásico proyecto del buque, se tratará de un diseño conceptual. Además, este hydrofoil contará con propulsión eléctrica.

Finalmente, el cuarto y último de los objetivos a cumplir es el de validar ese mismo diseño propuesto mediante cálculos y simulaciones. Estos cálculos y simulaciones se realizarán con softwares utilizados a lo largo del grado universitario y con otros específicamente empleados para el presente trabajo. Todo ello se complementará con una hoja de cálculo propia. Estas simulaciones serán básicamente de carácter hidrodinámico y estructural.

## 1.3. Metodología

El proceso que se va a seguir para el diseño de la embarcación va a consistir, de la misma manera que es habitual en el campo de la construcción naval, en un proceso iterativo y en espiral. Esto quiere decir, entre otras cosas, que el dimensionamiento del buque y de la planta propulsora a instalar estarán sujetos a cambios en función de los resultados que se obtengan de los distintos foils a probar, teniendo que volver a fases previas del dimensionamiento en caso de que esto sea necesario.

Para el presente trabajo, la planta propulsora consistirá en un motor eléctrico alimentado por baterías. Esta elección se debe a la ventaja que suponen las hidroalas en cuanto a reducción de potencia requerida para la navegación, sumado a que el propósito de este trabajo es diseñar una embarcación ligera.

El proceso por seguir es el siguiente:

1. Se estima un peso inicial para la embarcación, además de la configuración y disposición de los foils
2. Se elige un perfil para los foils. Con ese perfil, se calculan las dimensiones de los foils que se van a utilizar
3. Se procede a estimar los mástiles que van a soportar el casco sobre los foils. Se selecciona un material para su construcción y a partir de un estudio se comprueba la viabilidad estructural de mástiles y foils
4. Se definen unas primeras dimensiones para la embarcación, así como unas formas y una primera disposición general de la misma

5. Se efectúa el cálculo de la planta propulsora de la embarcación, además de su posible autonomía
6. Se escantillona la embarcación en base a la normativa aplicable
7. Se evalúa si la suma de pesos de estructura, componentes y demás obtenidos a lo largo del trabajo cumple con el peso inicialmente estimado. En el caso de superarlo, se procede a comenzar un nuevo ciclo de cálculo con un nuevo peso. Este proceso se repite hasta la obtención de una solución óptima

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Introducción

En el presente capítulo se procede a definir la teoría y las ecuaciones en las que se fundamenta la navegación de una embarcación sustentada por foils. Por un lado, se definirá cómo obtener la sustentación y se detallarán todos aquellos factores que influyen en su cálculo. Por otro lado, se procederá a dar la base teórica para poder obtener la resistencia al avance en este modo de navegación.

### 2.2. Criterios de diseño del foil para la sustentación

Los foils permiten, de la misma manera que sucede con las alas de los aviones, crear una fuerza sustentadora según aumenta la velocidad. Esto da como resultado que a la velocidad de despegue se obtenga una sustentación suficiente como para hacer que la embarcación emerja por encima del agua y que a velocidad de crucero se consiga una fuerza igual al peso que consiga mantenerla en esta situación.

Este es el funcionamiento básico de cualquier hidroala y se puede explicar mediante la ecuación de Bernoulli. Esta ecuación propone que el flujo de una corriente puede ser modelado como continuo, incompresible y no-viscoso y se define de la siguiente forma:

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gy \quad (1)$$

donde  $P_0$  es una constante conocida como presión de estancamiento,  $P$  es la presión del fluido en un punto cualquiera del flujo,  $\rho$  la densidad del fluido,  $V$  es la velocidad del fluido en un punto cualquiera del flujo e  $y$  la altura de ese punto cualquiera. Como se puede deducir a partir de la ecuación, para que  $P_0$  se mantenga constante, un aumento en la velocidad del fluido en un punto supondrá una disminución de la presión en ese mismo punto y viceversa en caso de que lo que aumente sea la presión. Además, se puede ignorar el producto  $\rho gy$  ya que al ser el foil una lámina fina, el valor de  $y$  variará de manera despreciable a lo largo de su superficie.

Cuando el foil recibe el flujo de agua, la parte de este flujo que se mueve sobre la superficie superior del mismo se moverá a mayor velocidad que el flujo que circula por la superficie inferior. Esto se debe a los esfuerzos viscosos que producen la formación de vórtices con giro en sentido antihorario en el borde de salida de la lámina. Como tiene que haber conservación del momento angular, se producirá un momento de respuesta que dará lugar a la circulación del fluido alrededor del foil en sentido horario (Rosado, 1998).

La suma vectorial de las velocidades es la que da como resultado esa mayor velocidad en la superficie superior y, por lo tanto, una disminución de la presión en esa cara del foil, mientras que da lugar a una velocidad menor sobre la superficie inferior del foil y por tanto una mayor presión sobre la misma. La diferencia de presión en ambas caras es la que provoca la fuerza sustentadora.

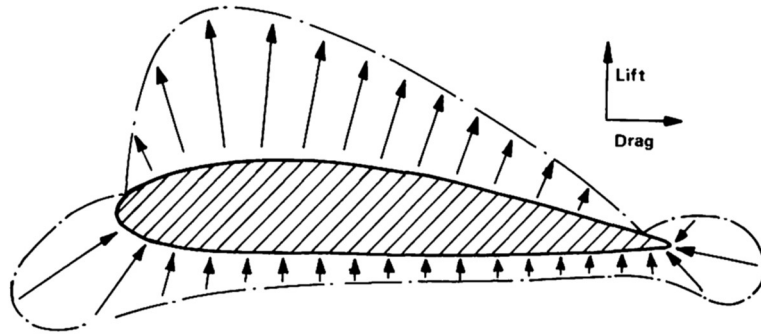


Imagen 4: Distribución de la presión en un foil (Alexander, Grogono and Nigg, 1972)

La sustentación producida por un foil se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (2)$$

donde A es el área de la forma en planta del foil, la cual se define como el área proyectada del foil en la dirección de la sustentación para un ángulo de ataque del foil igual a cero y  $C_L$  es un coeficiente adimensional conocido como coeficiente de sustentación el cual se obtiene por experimentación y que se puede encontrar en la literatura referente a las secciones de los aerofoils.

Como para la navegación se ha de conseguir que el foil seleccionado sustente la embarcación, se puede escribir la anterior expresión de la siguiente manera:

$$Mg = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (3)$$

donde M es la masa a plena carga de la embarcación a diseñar y g la fuerza de la gravedad. Además, el definir el área en planta del foil como se ha hecho, da lugar a poder expresarla como el siguiente producto:

$$A = c \times b \quad (4)$$

siendo c la cuerda del foil y b la envergadura. A partir de aquí podemos llegar a otro parámetro que se utilizará durante el proceso de diseño llamado relación de aspecto:

$$RA = \frac{b^2}{A} \quad (5)$$

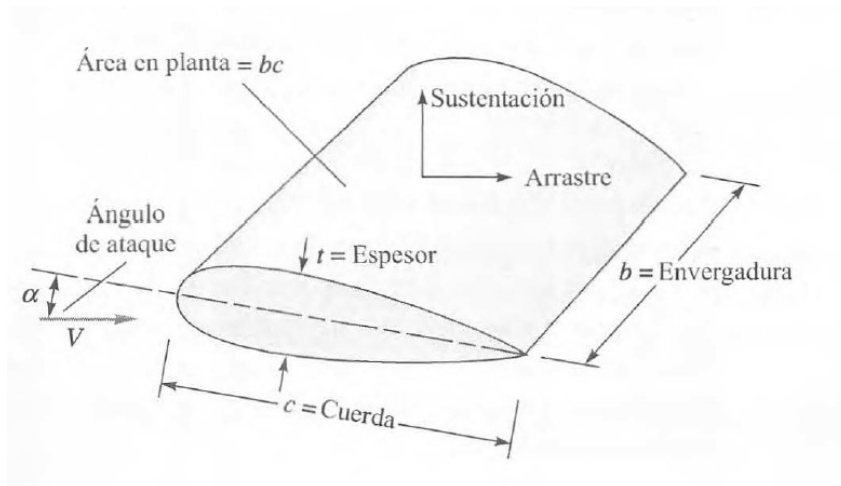


Imagen 5: Geometría básica del foil (White, 2008)

En el presente trabajo, habrá que tener en cuenta que el coeficiente de sustentación depende principalmente de los siguientes parámetros a definir durante el mismo proceso de diseño:

- El ángulo de ataque del foil ( $\alpha$ )
- La comba
- La relación espesor/cuerda ( $t/c$ )
- La relación de aspecto ( $A$ )
- El número de Reynolds referido a la cuerda del foil
- Número de Froude referido a la profundidad del foil
- El índice de cavitación

Se puede definir ángulo de ataque ( $\alpha$ ) como el ángulo entre la cuerda del foil y el flujo de corriente incidente. Cuando el ángulo de ataque es pequeño, la sustentación depende linealmente de este mismo ángulo, pudiendo encontrar un máximo en la relación sustentación/arrastre ( $L/D$ ) sobre los  $3^\circ$  o  $4^\circ$  de ángulo de ataque. Si el foil tiene comba, es decir, si la superficie superior del foil es más convexa que la inferior, la sustentación no es 0 cuando el ángulo de ataque es 0. Normalmente, sobre los  $15^\circ$  de ángulo de ataque la sustentación alcanza su máximo, y si se sigue aumentando el ángulo de ataque se entrará en pérdida: la sustentación caerá bruscamente, la resistencia aumentará considerablemente y el perfil dejará de funcionar (Rosado, 1998).

Dependiendo de la profundidad y velocidad, un ángulo de ataque excesivo también podría provocar ventilación y cavitación. La ventilación es un fenómeno que ocurre cuando el aire entra en contacto con la superficie superior del foil debido a las bajas presiones. La cavitación se explicará más adelante.

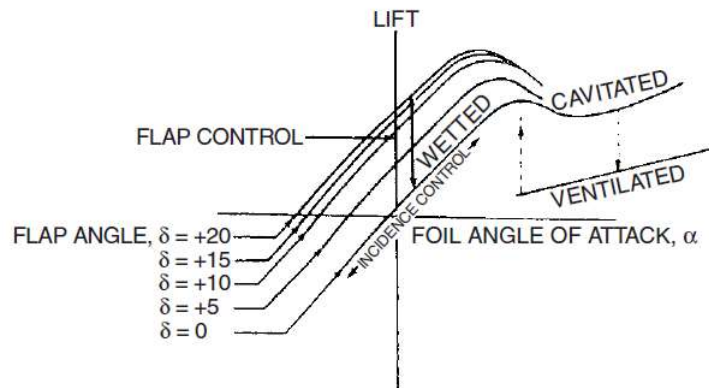


Imagen 6: Variación del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque (Faltinsen, 2005)

La influencia de la relación  $t/c$  en el diseño del foil se debe principalmente a que en secciones relativamente gruesas (una relación  $t/c$  de aproximadamente igual a 15%), la entrada en pérdida se produce de manera estable dando una curva en la gráfica  $\alpha-C_L$  mucho más redondeada. Sin embargo, secciones más finas (aproximadamente igual a 5%) hacen que la entrada en pérdida sea más rápida y brusca (Alexander, Grogono and Nigg, 1972).

En cuanto a la relación de aspecto definida un par de párrafos atrás, un mayor valor de este parámetro permitirá tener una menor pérdida en el coeficiente de sustentación. Esto se debe a que en los dos extremos del foil no se produce sustentación debido a unos vórtices que genera el flujo incidente, siendo la parte central de la envergadura la que más aporta a la sustentación. Por eso, los foils con más envergadura perderán relativamente menos sustentación que aquellos con menor envergadura ya que a estos últimos los vórtices formados por el flujo en los extremos pueden afectar a una mayor proporción de la envergadura total. Estos mismos vórtices son los que provocan también una distorsión en el flujo que les llega a los foils de popa, afectando por tanto a la sustentación.

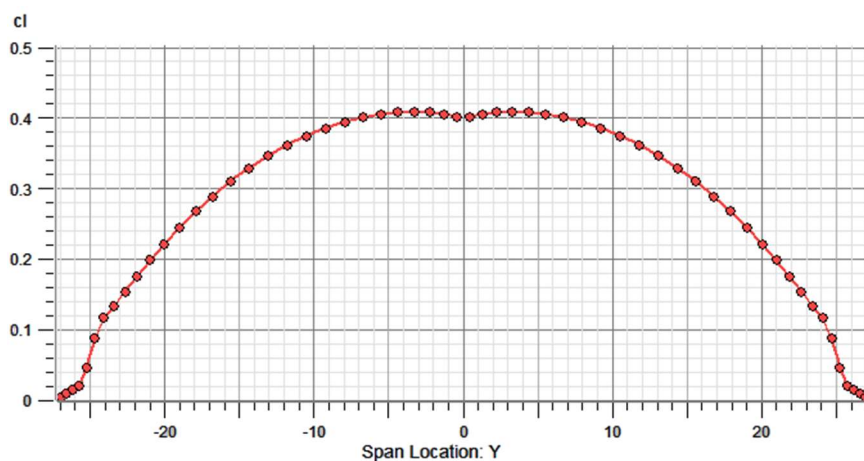


Imagen 7: Ejemplo de distribución del coeficiente de sustentación a lo largo de la envergadura de una sección alar (Badis, 2017)

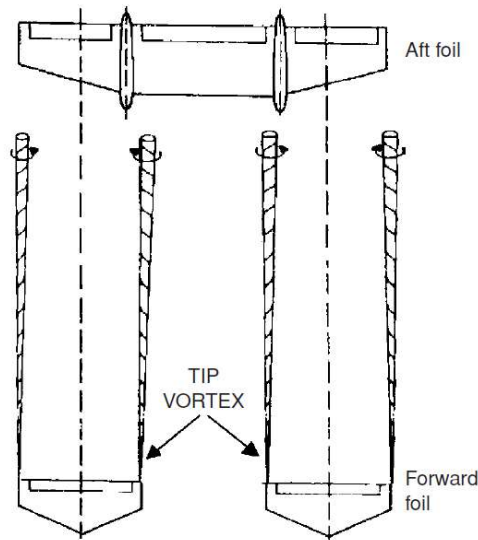


Imagen 8: Aparición de vórtices en los extremos del foil (Faltinsen, 2005)

El número de Reynolds referido a la cuerda del foil tiene gran influencia en el coeficiente de sustentación especialmente a valores menores de  $10^6$ , permitiendo un aumento de la sustentación según va aumentando este número. Una vez excede este número la incidencia normalmente es mínima y puede ser ignorado (Alexander, Grogono and Nigg, 1972). Se define el número de Reynolds referido a la cuerda del foil como:

$$Re_c = \frac{cV}{\nu} \quad (6)$$

siendo  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua.

La influencia en la sustentación del número de Froude referente a la profundidad cobra una gran importancia especialmente cuando la embarcación se mueve en aguas poco profundas, ya que efecto de las olas pasa a ser perjudicial a la sustentación. Se define este número de Froude como:

$$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (7)$$

donde  $h$  es la profundidad. En el presente trabajo se despreciará el efecto de las olas.

Finalmente, uno de los puntos a tener más en cuenta en el diseño es el de evitar la aparición de la cavitación. La cavitación es un fenómeno que aparece cuando la presión del agua que se encuentra en las inmediaciones del foil baja a la presión de vapor del agua, de tal manera que se produce la evaporación de esta misma agua formando burbujas de vapor. Estas burbujas son arrastradas por el flujo y, al llegar a zonas de presiones más altas, vuelven a cambiar de fase, pero esta vez en sentido inverso. En el cambio de vapor a líquido, la burbuja se reduce a una gota de tamaño mucho más pequeño debido a la diferencia de volumen específico entre el vapor y el agua líquida. La burbuja por tanto colapsa y el vacío que crea es rellenado rápidamente por el resto del líquido circundante.

Este proceso de implosión se traduce en vibraciones, ruidos y deterioro del foil, pero también en una reducción de la sustentación y un incremento de la fuerza de arrastre a

vencer. La aparición de la cavitación depende de lo que se conoce como índice de cavitación, el cual se define por la siguiente fórmula:

$$\sigma_i = \frac{P_{atm} + \rho gh - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (8)$$

siendo  $P_{atm}$  la presión atmosférica y  $P_v$  la presión de vapor del agua. Este valor a su vez puede variar dependiendo del espesor de la sección y por el ángulo de incidencia como se ha mencionado en párrafos anteriores. Para que se produzca el inicio de la cavitación, este índice será igual al coeficiente de presión local en la zona del foil en la que ensayemos:

$$C_p = -\sigma_i. \quad (9)$$

Cabe mencionar que, además de modificar tanto la profundidad como la velocidad, así como el espesor y el ángulo de ataque, una manera de minimizar la aparición de la cavitación sería intentar que en el presente diseño la distribución de la presión sea lo más uniforme posible.

### 2.3. Resistencia al avance en la condición de navegación con foils

Además de la sustentación, es fundamental conocer el valor de la resistencia total al avance en la condición del buque de cuando este navega sustentado por los foils. Para la siguiente formulación se ha despreciado la resistencia debida a la formación de olas por la dificultad que supone obtenerla. El coeficiente adimensional de resistencia de un foil ( $C_D$ ) está compuesto de dos componentes:

$$C_D = C_{Df} + C_{Di} \quad (10)$$

donde  $C_{Df}$  es el coeficiente de resistencia del foil y  $C_{Di}$  es el coeficiente de resistencia inducida, el cual además se puede definir del siguiente modo:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi R A e} \quad (11)$$

siendo  $e$  un factor de eficiencia de que se considerará igual a 1 para facilitar los cálculos (Besnard, Schmitz, Tzong, Kaups, Hefazi, Hess, Chen and Cebeci, 1998). Se puede apreciar que el valor de la resistencia inducida depende de la relación de aspecto, ya que esta resistencia es debida a la creación de vórtices en los extremos del foil, fenómeno explicado en el apartado anterior. Por lo tanto, una mayor relación de aspecto que según el apartado anterior permitía una menor pérdida relativa de sustentación, ayudará a disminuir la resistencia inducida y por tanto la resistencia total a vencer en la condición de navegación con foils.

Otra conclusión que se puede extraer de la expresión del coeficiente de resistencia inducida es que, como depende de manera directamente proporcional del coeficiente de sustentación, según aumente la velocidad de la embarcación ésta disminuirá. Esto es debido a que, como la masa del buque se puede considerar constante a lo largo de todo el trayecto, para que se cumpla la igualdad en la ecuación (3), un aumento de la velocidad se traducirá en una disminución del coeficiente de sustentación.



Finalmente, de la misma manera que se había definido la sustentación en la ecuación (2), se puede definir la ecuación de la resistencia total a vencer por cada foil en esta condición de navegación:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D. \quad (12)$$

De igual modo, para calcular la resistencia que ofrece cada mástil que une el foil con el casco de la embarcación se utilizaría la siguiente expresión:

$$D_s = \frac{1}{2} \rho V^2 A_s C_{D_s} \quad (13)$$

donde  $C_{D_s}$  es el coeficiente de resistencia del mástil y  $A_s$  el área proyectada del mástil sobre el plano vertical que va en la dirección de la cuerda del mismo. Por tanto, la resistencia total a vencer será el sumatorio de la resistencia de todos los foils más el sumatorio de la resistencia de todos los mástiles:

$$D_T = \sum D_i + \sum D_{s,j}. \quad (14)$$

### 3. PRIMERAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO

#### 3.1. Introducción

A la hora de empezar con el diseño de la embarcación, se debe partir de aquellos parámetros o consideraciones que permitan avanzar en su posterior definición. En el presente trabajo se ha considerado como punto de partida para el proyecto de una embarcación ligera sustentada con foils: el desplazamiento de la misma y la disposición estructural de sus mástiles y foils. Esto se debe a que el desplazamiento es un parámetro crítico, ya que todo el diseño gira en torno a conseguir una sustentación adecuada para ese mismo peso. Por otro lado, el diseño de los foils sustentadores depende de manera decisiva del tipo de disposición y configuración que se les vaya a dar en la embarcación. Partiendo de estas consideraciones, el proceso de cálculo se vuelve más sencillo.

#### 3.2. Estimación del peso de la embarcación

El primer paso en el diseño conceptual de la embarcación será estimar un peso inicial. Este peso nos servirá como parámetro crítico del proyecto para poder avanzar en la estimación del resto de parámetros del buque y así mediante un proceso iterativo ir avanzando progresivamente hacia el resultado final.

Se puede desglosar el peso total de la embarcación ( $M$ ) en las siguientes partidas:

$$M = M_{Estructura} + M_{Motor} + M_{Baterías} + M_{Componentes} + M_{Carga}. \quad (15)$$

El peso de la carga correspondería al peso muerto mientras que el resto de los pesos conformarían el peso en rosca. En este caso, el peso de la carga consta de la tripulación. La embarcación será diseñada para 1 tripulante y estimando un peso por tripulante de 80 kg se puede fijar en un primer momento que  $M_{Carga} = 80$  kg.

Para el cálculo de baterías hay que tener en cuenta que las baterías normalmente utilizadas en el sector naval son de tecnología AGM y GEL. Ambas se caracterizan por estar selladas y no necesitar mantenimiento. Se pueden encontrar ejemplos de baterías de tecnología AGM en la empresa de baterías Varta en los modelos Profesional LA80, Profesional LA95 y Profesional LA105, las cuales pesan 22,76 kg, 26,4 kg y 29,4 kg. Una empresa en la que se pueden ver ejemplos de baterías tipo GEL sería Sonnenschein GEL, empresa que posee modelos de baterías con características similares a las anteriormente mencionadas como pueden ser los modelos Sonnenschein 12090V 12V 98AH y Sonnenschein 12110V 12V 116AH, de 23 kg y 46 kg respectivamente.



*Imagen 9: Batería Varta Profesional LA95*

También existe la opción de instalar baterías de litio, ya que suelen tener un peso bastante menor. Por ejemplo, el modelo RB 100 12,8V 100 AH de la empresa Relion pesa 12,7 kg. Sin embargo, la gran desventaja de estas baterías es que suelen costar alrededor de 10 veces más en comparación con las AGM/GEL.



*Imagen 10: Batería Relion RB 100 12,8V 100 AH*

Con todo esto expuesto y teniendo en un principio la intención de colocar dos baterías, se supondrá un primer peso por batería de 30 kg. Esto dará lugar a que, en la etapa del diseño conceptual y pese a no saber aún la potencia necesaria, se tome  $M_{\text{Baterías}} = 60\text{kg}$ .

Para estimar el peso del motor eléctrico hay que recurrir a algún catálogo de motores para saber aproximadamente cuáles son sus características. Por ejemplo, si se recurre al catálogo de la empresa de motores eléctricos Krätler Elektromaschinen se puede encontrar el siguiente catálogo de motores eléctricos sumergibles:

Typo	Potencia Absorbida	Potencia suministrada	Voltaje	Intensidad	%	Dimensiones	Peso	Desplazamiento	
								Velero	Barco a Motor
GPV 0,5	0,5 kW	0,4 kW	24 V	21 A	85 %	Ø 118x370 mm	14 kg	0,4 t	-
GPV 0,8	0,8 kW	0,7 kW	24 V	34 A	85 %	Ø 118x370 mm	15 kg	0,7 t	-
GPV 1,6	1,6 kW	1,4 kW	24 V	67 A	85 %	Ø 118x440 mm	20 kg	1,4 t	-
ACV 1,8	2,4 kW	1,8 kW	24 V	100 A	75 %	Ø 140x430 mm	21 kg	1,8 t	-
GPV 2,2	2,2 kW	1,9 kW	36 V	61 A	85 %	Ø 118x440 mm	20 kg	1,9 t	-
ACV 3,5	4,4 kW	3,5 kW	48 V	91 A	80 %	Ø 140x480 mm	29 kg	3,5 t	-
ACV 4,0	5,0 kW	4,0 kW	48 V	104 A	80 %	Ø 140x480 mm	29 kg	4,0 t	-
ACV 8,0	9,7 kW	8,0 kW	48 V	202 A	82 %	Ø 168x550 mm	40 kg	8,0 t	-
GPH 0,5	0,5 kW	0,4 kW	24 V	21 A	85 %	Ø 118x370 mm	15 kg	0,4 t	0,2 t
GPH 0,8	0,8 kW	0,7 kW	24 V	34 A	85 %	Ø 118x370 mm	16 kg	0,7 t	0,3 t
GPH 1,6	1,6 kW	1,4 kW	24 V	67 A	85 %	Ø 118x440 mm	21 kg	1,4 t	0,6 t
ACH 1,8	2,4 kW	1,8 kW	24 V	100 A	75 %	Ø 140x430 mm	22 kg	1,8 t	0,7 t
GPH 2,2	2,2 kW	1,9 kW	36 V	61 A	85 %	Ø 118x440 mm	21 kg	1,9 t	0,8 t
ACH 3,5	4,4 kW	3,5 kW	48 V	95 A	80 %	Ø 140x480 mm	30 kg	3,5 t	1,4 t
ACH 4,0	5,0 kW	4,0 kW	48 V	108 A	80 %	Ø 140x480 mm	30 kg	4,0 t	1,6 t
ACH 8,0	9,7 kW	8,0 kW	48 V	202 A	82 %	Ø 168x550 mm	44 kg	8,0 t	3,2 t

Imagen 11: Catálogo de motores marinos sumergibles de la empresa Krätler Elektromaschinen

Una pequeña embarcación ligera para una persona muy difícilmente va a llegar a los 300 kg (0,3 t del catálogo), con lo que se podría pensar que el peso del motor final estará sobre los 16 kg. Si se recurre otro catálogo de la misma compañía, pero esta vez de un motor fueraborda eléctrico se observaría lo siguiente:

Article no.	Type	Continuous power		Voltage	Current	Total efficiency	Weight	up to boat weight	
		Consumption	Output					Sailing boat	Powerboat
104148	GPE 0,5	0,5 kW	0,4 kW	24 V	21 A	85 %	17 kg	-	0,2 t
140965	GPE 0,8	0,8 kW	0,7 kW	24 V	34 A	85 %	18 kg	-	0,3 t
104144	GPE 1,6	1,6 kW	1,4 kW	24 V	67 A	85 %	23 kg	-	0,6 t
104142	GPE 2,2	2,2 kW	1,9 kW	36 V	61 A	85 %	21 kg	-	0,8 t
139017	ACE 1,8	2,4 kW	1,8 kW	24 V	100 A	75 %	28 kg	-	0,7 t
143924	ACE 2,0	2,6 kW	2,0 kW	24 V	107 A	78 %	33 kg	-	0,8 t
139019	ACE 4,0	5,0 kW	4,0 kW	48 V	104 A	80 %	33 kg	-	1,6 t
possible options									
GPE 0,5 and GPE 0,8 with two-stage switch for speed control									
104903	Rudder for GPE								
138910	Rudder for ACE								
ACE Boost function 30% performance increase for 2 minutes									

Imagen 12: Catálogo de motores fueraborda de la empresa Krätler Elektromaschinen

Con los datos mostrados en ambas tablas sería bastante razonable estimar un primer peso del motor de  $M_{Motor}=20$  kg.



Imagen 13: Motores eléctricos sumergibles de Krätler Elektromaschinen



Imagen 14: Motor eléctrico fueraborda de Krätler Elektromaschinen

Estimar el peso de la estructura y los componentes resulta más complicado ya que, al pretender diseñar una embarcación tan específica, no contamos con una base de datos medianamente decente o una formulación que pueda servir de ayuda al respecto. Una manera de estimar el peso de la estructura y los componentes que faltan puede ser a través de los veleros de competición. Teniendo en cuenta que, por las características de la embarcación, el casco tendrá unas dimensiones similares a un velero clase Europa y difícilmente llegue a algo similar a las de un velero clase Laser, se puede estimar inicialmente que el peso de la estructura y los componentes que puedan faltar es de 50 kg.

Con todo lo descrito anteriormente obtendríamos este peso para una primera iteración:

$$M = 50 + 20 + 60 + 80;$$

$$\mathbf{M = 210 \text{ kg}}$$

### 3.3. Configuración y disposición de los foils

El otro de los primeros puntos a tener en cuenta a la hora de empezar con el diseño de esta embarcación es el de la configuración y disposición de la estructura de los foils. Se deben disponer los foils de tal manera que se garantice una navegación lo más eficiente posible. Para esto, hay que definir la configuración horizontal y lateral de los foils en la embarcación, así como el tipo de foils que se emplearán.

La configuración horizontal depende de la posición longitudinal del centro de gravedad de la embarcación, y en función de éste se tiene una embarcación con una disposición convencional, canard o tándem. En el caso de la embarcación a diseñar en el presente trabajo, debido a que el centro de gravedad estará presumiblemente a popa de la sección media, se opta por una configuración tipo canard.

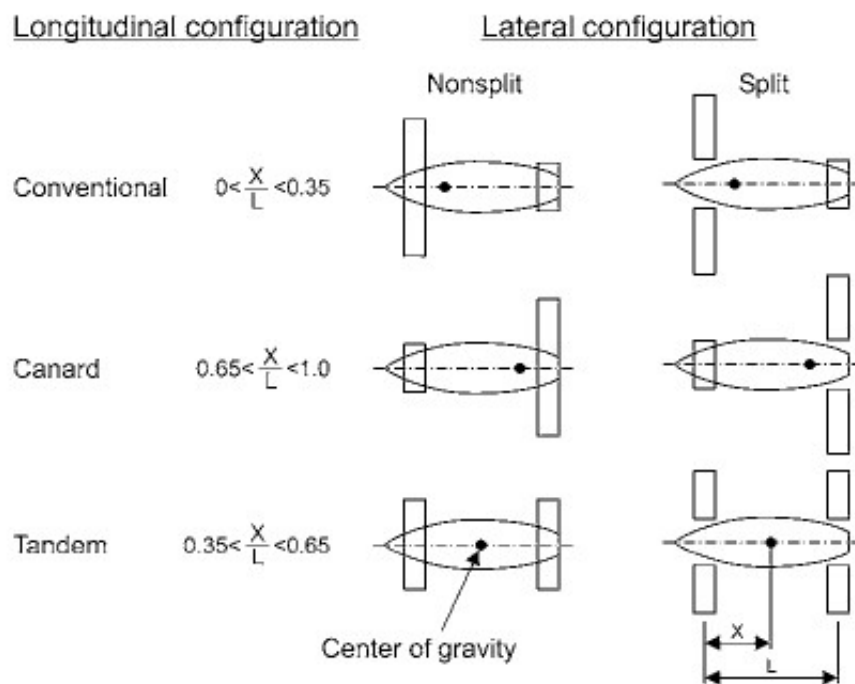
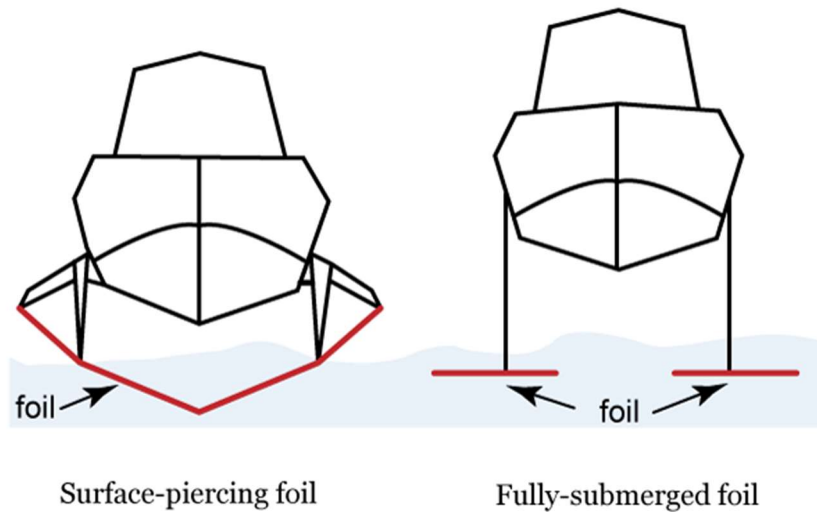


Imagen 15: Tipos de configuración de los foils en un hidroala (Faltinsen, 2005)

Este tipo de configuración se caracteriza por tener el foil de mayor área a popa, siendo éste el que soporta un mínimo del 65% del peso total de la embarcación. En este caso, se proyectará una distribución de áreas tal que el foil de popa representará el 80% del área total y el foil de proa el 20%. Es importante destacar que esta configuración es la más utilizada en el diseño de hidroalas. Finalmente, se termina por definir la configuración lateral de la embarcación precisando que el foil mayor va a ser de tipo non-split, lo que facilita el proceso de diseño.

Los hidroalas también se clasifican en función de si sus foils van completamente sumergidos o si, en cambio, atraviesan la superficie del agua (surface-piercing). En el primer caso, los foils tienen una forma de T invertida mientras que del otro modo disponen de una forma en V.



*Imagen 16: Diferencia entre hidroala con los foils estilo surface-piercing e hidroala con los foils totalmente sumergidos (Lei, 2015)*

Los surface-piercing tienen la ventaja de ser autoestabilizantes y de controlar la sustentación variando el área sumergida del foil, aunque al estar atravesando la superficie del agua favorecen la entrada de aire y la cavitación, y por tanto todos sus problemas asociados en cuanto a pérdida de sustentación. Otra desventaja es la necesidad de la construcción de más superficie de foil y un cálculo más complejo de la misma debido al ángulo que tienen los foils con respecto al plano horizontal. Los foils totalmente sumergidos cuentan con la desventaja de no ser autoestabilizantes pero a cambio son mucho más eficientes que su contraparte. En el presente trabajo, los foils se dispondrán totalmente sumergidos y en forma de T invertida.

## 4. SELECCIÓN DEL PERFIL Y ESTIMACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS FOILS

### 4.1. Introducción

En el presente apartado se probarán tres tipos de perfiles para los foils de la embarcación. Este proceso se llevará a cabo primeramente calculando un foil con el área total necesaria. Posteriormente, ese foil se dividirá en dos con las mismas relaciones de aspecto: un foil de proa que constituirá el 20% del área total y uno de popa que constará del 80% del área restante. Estos perfiles se probarán en JavaFoil<sup>1</sup>. JavaFoil es un software libre creado por el Dr. Martin Happerle que permite el cálculo de la sustentación y resistencia de distintos perfiles de foils en flujo subsónico. Todos los resultados obtenidos durante el dimensionamiento de los foils se pueden consultar en más detalle en el ANEXO I.

Una vez seleccionados los foils de proa y popa, se analizará si producen algún tipo de cavitación para las condiciones de despegue y crucero. Este análisis también se llevará a cabo mediante el uso de JavaFoil.

### 4.2. Selección de perfiles y definición del proceso de cálculo

Tras recabar información sobre distintos tipos de foils (Airfoil Tools, 2020; Suastika, 2018) que se emplean en embarcaciones ligeras, tanto a motor como a vela, los tres candidatos serán los siguientes:

- NACA 63-412
- NACA 64-212
- NACA 0012

El NACA 63-412 y el NACA 64-212 son dos foils asimétricos. Esto significa que son perfiles no simétricos a lo largo de su cuerda. Otra característica importante de este tipo de perfiles es que el coeficiente de sustentación es mayor de 0 para un ángulo de ataque igual a 0°.

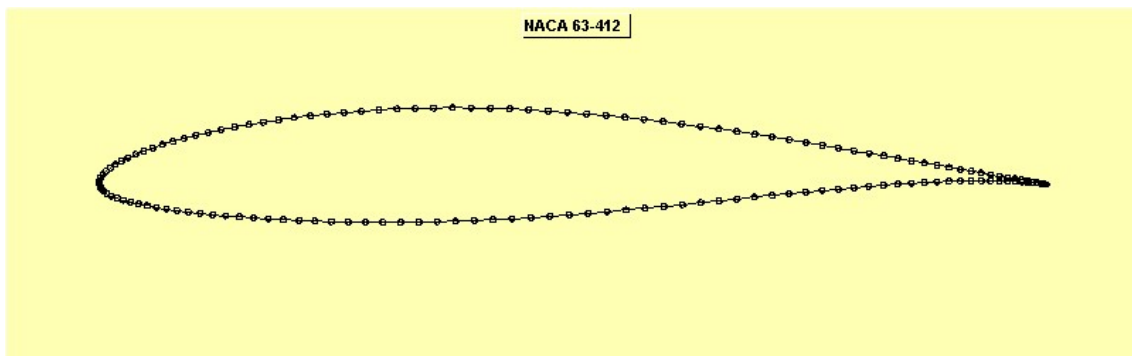


Imagen 17: NACA 63-412

<sup>1</sup> <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm>



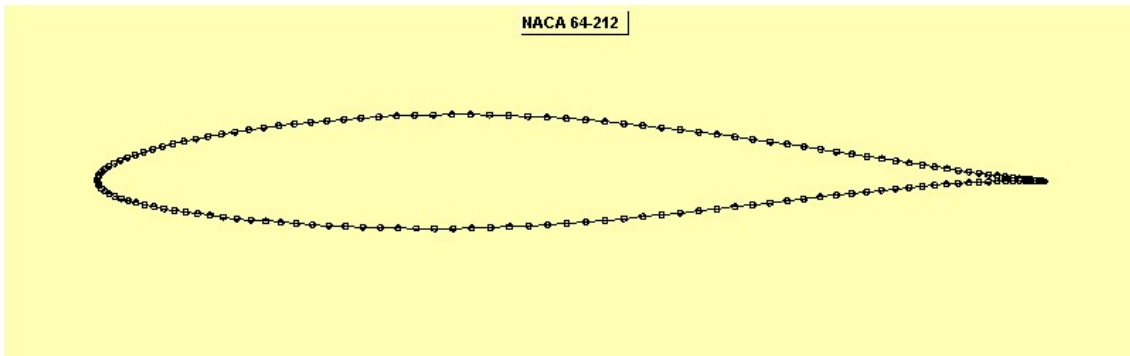


Imagen 18: NACA 64-212

El NACA 0012 en cambio, se trata de un foil simétrico. Esto significa que posee simetría a lo largo de su cuerda y que a un ángulo de ataque igual a  $0^\circ$  el coeficiente de sustentación es nulo.

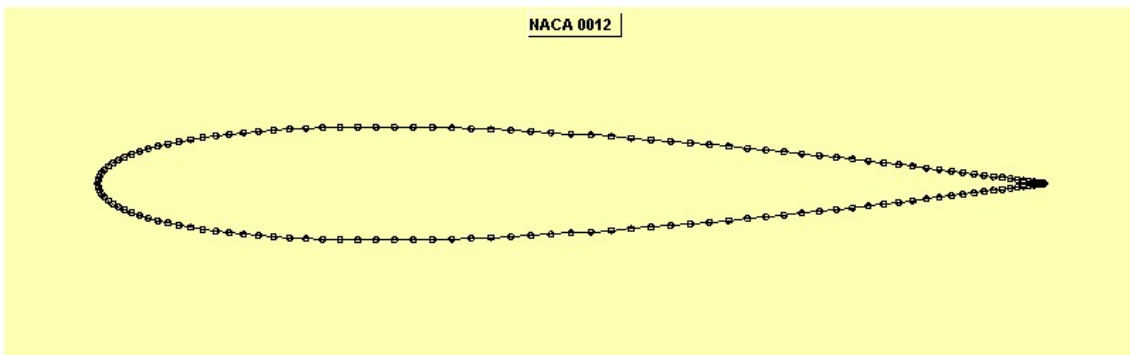


Imagen 19: NACA 0012

Partiendo de una envergadura del ala para el foil de área total de 1,50 metros, se probarán relaciones de aspecto 5, 4,5 y 4 en el programa JavaFoil. En este programa, se insertan en el panel de Opciones dichas relaciones de aspecto, mientras que en el panel de polares se introducen los números de Reynolds relativos a la cuerda a ensayar. Esta cuerda se obtiene utilizando la envergadura del ala y la relación de aspecto en las expresiones (4) y (5). Además, en este trabajo se comienza definiendo una velocidad de despegue de 6 nudos y una velocidad de crucero de 20 nudos.

El objetivo de los apartados posteriores es encontrar un perfil que, para el ángulo de ataque en el cual se produce un coeficiente de sustentación máximo, sea capaz de sustentar la embarcación en la situación de despegue. El ángulo de ataque para la condición de crucero se hallará bajando el mismo hasta encontrar una sustentación similar al peso de la embarcación para la velocidad de crucero. Este peso será:

$$P_{total} = 210 * 9,81 = 2060,1 N$$

A partir de este ángulo de sustentación máxima se pierde sustentación, siendo una zona en la que programas como JavaFoil trabajan muy mal. Es por eso que se mostrará uno o dos valores a partir de este ángulo para apreciar cómo comienza a caer la sustentación.

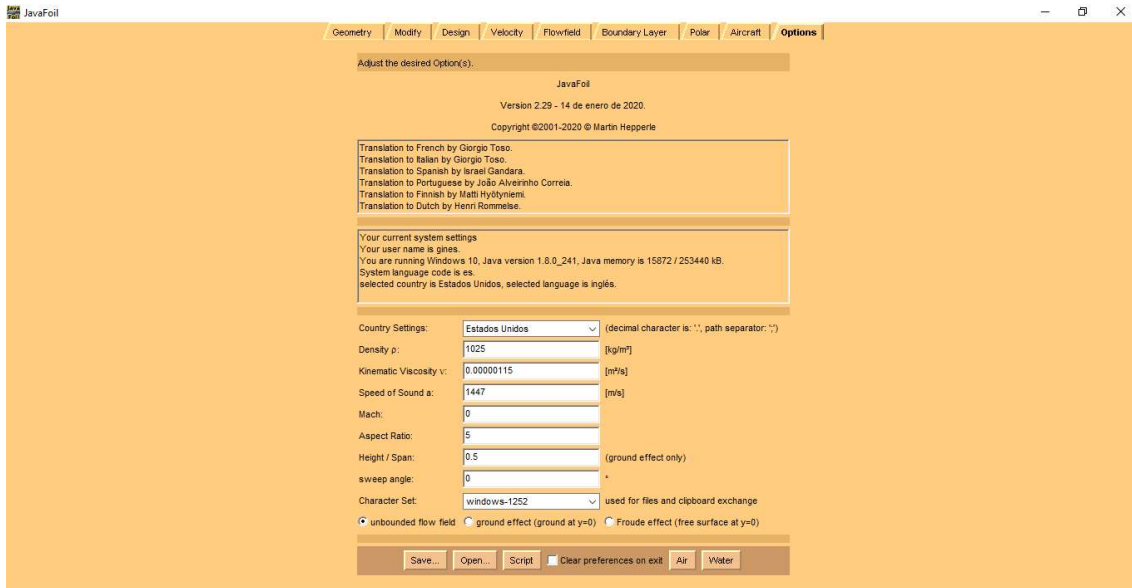


Imagen 20: Panel de opciones del programa JavaFoil



Imagen 21: Panel de Polares del programa JavaFoil

Una vez quede seleccionado un perfil y ese foil con el área total, se calcularán los foils de proa y de popa ajustando el área total lo mejor posible. Cabe destacar que el coeficiente de resistencia obtenido mediante este programa equivale a la suma de lo que se ha definido en apartados anteriores como coeficiente de resistencia del foil ( $C_{Df}$ ) y coeficiente de resistencia inducida ( $C_{Di}$ ). Es por ello que una vez calculados los foils, para saber el coeficiente de resistencia total mostrado en la expresión (10) sólo quedaría calcular el coeficiente de resistencia de los mástiles en próximos apartados.

### 4.3. Comparación entre perfiles y selección de un foil con el área total

#### 4.3.1. NACA 63-412

El primer perfil que se comienza ensayando es el NACA 63-412. Para este perfil, se encuentran posibles soluciones en dos de tres de las relaciones de aspecto que se han

ensayado: para 4,5 y para 4. Para 4,5 se encuentra la siguiente solución en la condición de despegue:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
9	0,887	0,07384	2165,6	180,3	12,0
10	0,895	0,07708	2185,1	188,2	11,6
11	0,879	0,07873	2146,1	192,2	11,2

Tabla 1: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4,5 (despegue)

Lo que significaría bajar el ángulo de ataque en la condición de crucero hasta el siguiente valor:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
-2,6	0,078	0,006	2115,9	162,8	13,0
0	0,293	0,01193	7948,4	323,6	24,6
1	0,375	0,01599	10172,8	433,8	23,5

Tabla 2: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4,5 (crucero)

Para una relación de aspecto igual a 4 se encuentra la siguiente solución en la condición de despegue:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
9	0,855	0,07596	2348,4	208,6	11,3
10	0,863	0,07921	2370,4	217,6	10,9
11	0,85	0,08068	2334,7	221,6	10,5

Tabla 3: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4 (despegue)

Lo que equivale al siguiente ángulo de ataque en la condición de crucero:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
-2,7	0,068	0,00587	2075,3	179,1	11,6
0	0,283	0,0121	8636,7	369,3	23,4
1	0,361	0,01638	11017,2	499,9	22,0

Tabla 4: Resultados NACA 63-412 para una relación de aspecto de 4 (crucero)

#### 4.3.2. NACA 64-212

Posteriormente se procede a ensayar el NACA 64-212. Este perfil sólo tiene una solución y se da para una relación de aspecto igual a 4. La solución en la condición de despegue es la siguiente:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
9	0,736	0,05893	2021,5	161,9	12,5
10	0,75	0,06277	2060,0	172,4	11,9
11	0,626	0,10217	1719,4	280,6	6,1

Tabla 5: Resultados NACA 64-212 para una relación de aspecto de 4 (despegue)

Aunque la sustentación esté ligeramente por debajo de 2060,1 N, al ser la diferencia tan mínima se da por bueno. El ángulo en la condición de crucero sería el siguiente:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
-0,9	0,07	0,00564	2136,3	172,1	12,4
0	0,142	0,00694	4333,6	211,8	20,5
1	0,222	0,00932	6775,1	284,4	23,8

Tabla 6: Resultados NACA 64-212 para una relación de aspecto de 4 (crucero)

#### 4.3.3. NACA 0012

Finalmente, se ensaya el NACA 0012. Este perfil sólo va a encontrar una solución para una relación de aspecto igual a 4. Para la condición de despegue se obtendría lo siguiente:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
11	0,743	0,0617	2040,8	169,5	12,0
12	0,753	0,06845	2068,2	188,0	11,0
13	0,736	0,08189	2021,5	224,9	9,0

Tabla 7: Resultados NACA 0012 para una relación de aspecto de 4 (despegue)

Lo que se traduce en el siguiente ángulo de ataque para la condición de crucero:

$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
0,9	0,072	0,00799	2197,3	243,8	9,0
0	0	0,00751	0,0	229,2	0,0
1	0,08	0,00809	2441,5	246,9	9,9

Tabla 8: Resultado NACA 0012 para una relación de aspecto de 4 (crucero)

#### 4.3.4. Selección final

Una vez mostrados y comparados estos resultados se procede a la sección del perfil NACA 63-412 con una relación de aspecto igual a 4,5. Varios motivos sustentan esta decisión a raíz de los resultados:

1. Es el perfil que menor área de foil necesita y es el que produce un mejor coeficiente de sustentación.
2. Además de la menor área, permite reducirla aún más ya que en la condición de despegue producimos más de 2185 N de sustentación lo que reducirá aún más la resistencia a vencer en la condición de despegue.
3. Una menor área significará la posibilidad de usar mástiles de menor tamaño.
4. La resistencia al avance en la condición de crucero es, de manera considerable, la más baja.

Las dimensiones principales de este foil calculado se pueden resumir en la siguiente tabla:

FOIL (TOTAL)	
NACA	63-412
RA	4,5
b (m)	1,5
c (m)	0,333
A (m <sup>2</sup> )	0,5
Re.despegue	9,76E+05
Re.crucero	3,25E+06

Tabla 9: Características del foil (área total) seleccionado

Siendo sus características de funcionamiento:

	Condición Despegue	Condición Crucero
$\alpha$ (°)	10	-2,6
$C_L$	0,895	0,078
<b>L (N)</b>	2185,1	2115,9
$C_D$	0,07708	0,006
<b>D (Kg)</b>	188,2	162,8
<b>L/D</b>	11,6	13,0

Tabla 10: Características de funcionamiento del foil (área total) seleccionado

#### 4.4. Estimación de los foils de proa y de popa a partir del foil con el área total

Manteniendo la relación de aspecto de 4,5 del foil total, se divide el área de este foil en dos en base a las proporciones anteriormente detalladas. Ahora se ensayan ambos foils de la misma manera que en el apartado anterior, pero esta vez manteniendo fijada la relación de aspecto y disminuyendo el área de ambos hasta encontrar unas dimensiones que permitan obtener una sustentación lo más cercana a 2060,1 N. La disminución del área de ambos foils se tiene que realizar de manera proporcional para que la distribución de áreas no se vea afectada.

Siguiendo este proceso se obtiene la siguiente solución:

FOIL PROA		FOIL POPA	
NACA	63-412	NACA	63-412
RA	4,5	RA	4,5
<b>b (m)</b>	0,657	<b>b (m)</b>	1,311
<b>c (m)</b>	0,146	<b>c (m)</b>	0,291
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	0,096	<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	0,382
<b>Re.despegue</b>	<b>4,28E+05</b>	<b>Re.despegue</b>	<b>8,53E+05</b>
<b>Re.crucero</b>	<b>1,43E+06</b>	<b>Re.crucero</b>	<b>2,84E+06</b>

Tabla 11: Características de los foils de proa y popa

El foil de proa presentará las siguientes características de funcionamiento:

	Condición Despegue	Condición Crucero
$\alpha$ (°)	9	-2,6
$C_L$	0,878	0,078
<b>L (N)</b>	411,6	406,3
$C_D$	0,07585	0,00647
<b>D (N)</b>	35,6	33,7
<b>L/D</b>	11,6	12,1

Tabla 12: Características de funcionamiento del foil de proa

Mientras que el de popa:

	Condición Despegue	Condición Crucero
$\alpha$ (°)	9	-2,6
$C_L$	0,886	0,078
$L$ (N)	1652,6	1616,6
$C_D$	0,07416	0,00602
$D$ (N)	138,3	124,8
$L/D$	11,9	13,0

Tabla 13: Características de funcionamiento del foil de popa

Como el punto de funcionamiento en la condición de crucero a 20 nudos sería con los foils de proa y popa a un ángulo de ataque de entre  $-2,5^\circ$  y  $-2,6^\circ$ , se puede optar por  $-2,6^\circ$  ya que es el ángulo que más cerca está de la solución final.

#### 4.5. Análisis de la cavitación para los foils obtenidos

Para comprobar si se produce o no el fenómeno de la cavitación para este perfil a las velocidades de proyecto se empleará el panel Velocity del programa JavaFoil. Este panel ensaya el modelo de foil seleccionado a partir del número de Reynolds referente a la cuerda introducido en el panel Boundary Layer.

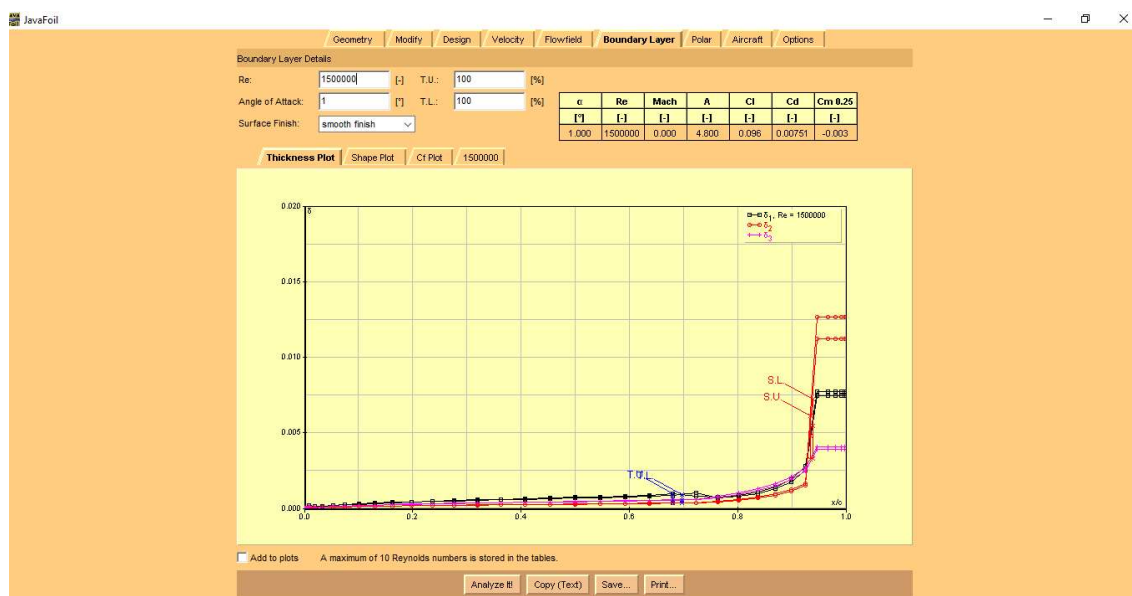


Imagen 22: Panel Boundary Layer del programa JavaFoil

Para ello se estimará en una primera aproximación y para obtener los primeros resultados orientativos, que los mástiles serán de 0,8 metros (es decir, estarán sumergidos 0,8 metros justo en el momento de producirse el despegue) y estarán sumergidos 0 metros en la condición de navegación para la cual se producen las velocidades de despegue y crucero, que no es real pero al ser la situación más extrema servirá para este fin. También habrá que tener en cuenta en futuros apartados las características de otros pequeños hidroalas comerciales dedicados al recreo como pueden ser las embarcaciones Quadrofoil, Seabubbles o los Candela Boats. Quadrofoil posee unos mástiles con un calado de 1 metro en la situación de reposo y de 0,5 metros en la situación de navegación de crucero, mientras que las Seabubbles poseen un calado de 1,6 metros en reposo y 0,94 metros (contando en este caso con la profundidad de los propulsores) en situación de navegación de crucero. En cambio, los hidroalas de la marca Candela sí que tienen unos mástiles que

en la condición de crucero emergen más del 50%, siendo la longitud total de 1,2 metros y la profundidad en la condición de crucero de 0,5 metros. Además, en cuanto a aquellos veleros que navegan usando foils como los de la clase optimist y moth podemos ver longitudes y profundidades de sus foils similares. El optimist suele llevar unos foils de unos 0,8 metros longitud y sumergidos a 0,4 metros en la condición de navegación mientras que el tipo moth tiene foils de 1 metros y sumergidos unos 0,4 metros (Karlsson and Urde, 2018).



Imagen 23: Hidroala de la empresa Quadrofoil

Calculando entonces los coeficientes de presión para las condiciones de despegue y crucero y el índice de cavitación correspondiente a la situación más desfavorable de los mástiles (totalmente emergidos) mediante la ecuación (8), se obtienen los siguientes resultados:

CAVITACIÓN			
ÍNDICE CAVITACIÓN		COEFICIENTE DE PRESIÓN	
$\sigma_{\text{despegue}}$	10,429	$C_{p\text{despegue}}$	-6,342
$\sigma_{\text{crucero}}$	0,939	$C_{p\text{crucero}}$	-0,817

Tabla 14: Resultados de la cavitación para los foils seleccionados

Se puede observar cómo en ningún caso se llega a cumplir la igualdad de la expresión (9) y por lo tanto no hay cavitación.

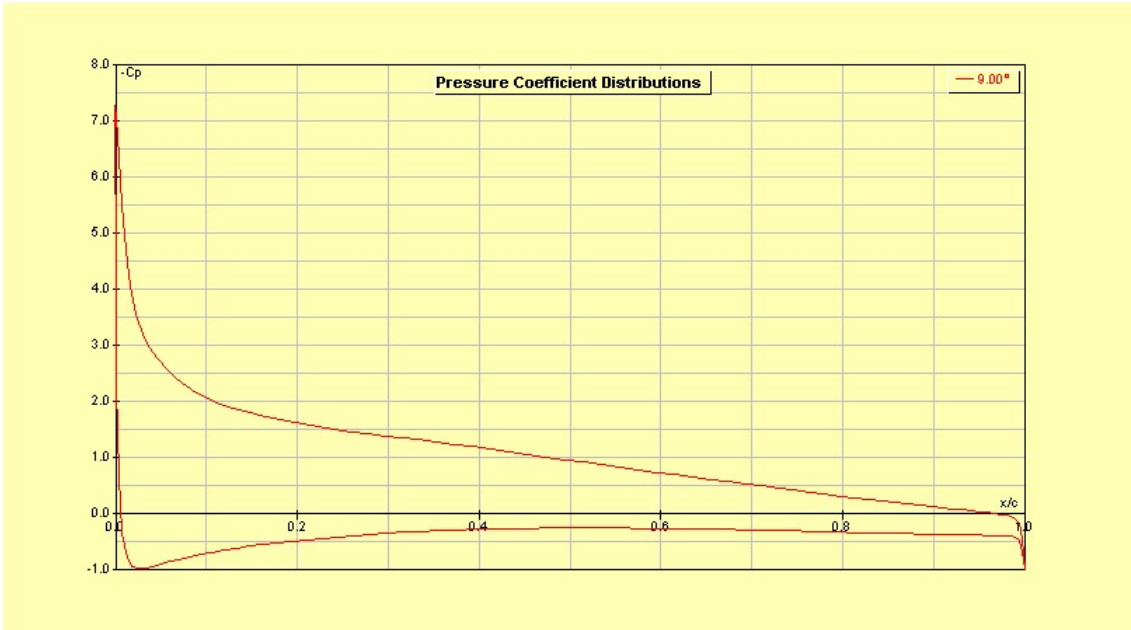


Imagen 24: Variación del coeficiente de presión a lo largo de la cuerda del foil en la condición de despegue

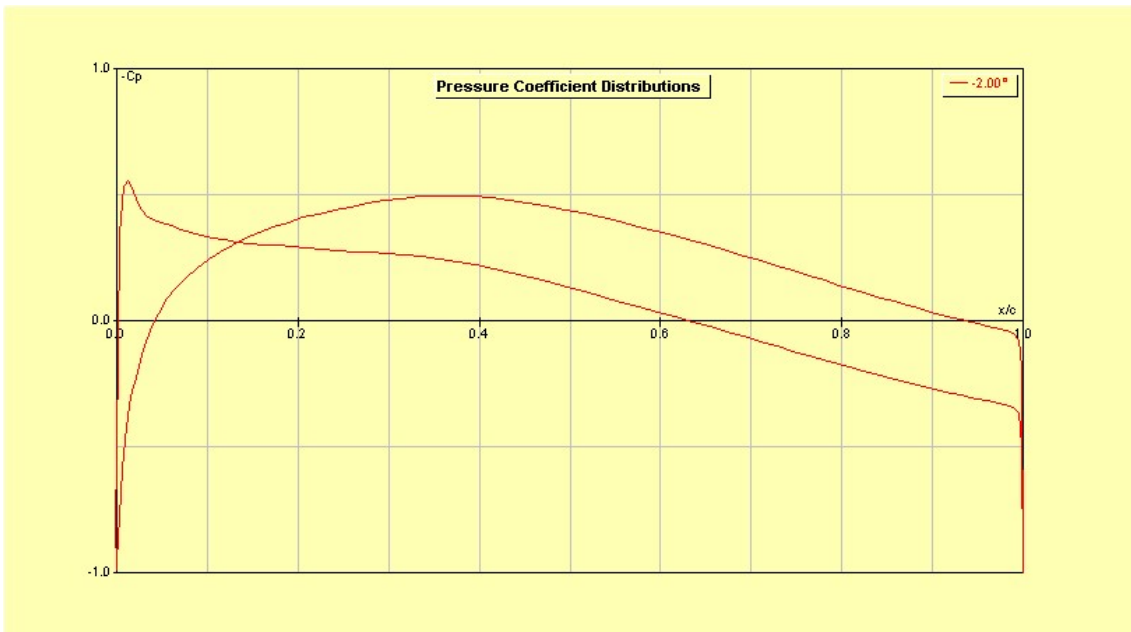


Imagen 25: Variación del coeficiente de presión a lo largo de la cuerda del foil en la condición de crucero



## 5. CÁLCULO DEL CONJUNTO ESTRUCTURAL MÁSTIL-FOIL

### 5.1. Introducción

El presente apartado se dividirá a su vez en tres subapartados principales. El primero de ellos tratará sobre la estimación y selección de un perfil para los mástiles. El segundo de ellos consistirá en la búsqueda dentro de una base de datos de un material óptimo para los requerimientos de la estructura. Finalmente, el tercero y más extenso de los tres subapartados consistirá en realizar un estudio sobre la viabilidad estructural de este sistema mediante la simulación de distintas situaciones de funcionamiento consideradas probables.

### 5.2. Estimación y selección del perfil de los mástiles

Los mástiles de este tipo de embarcaciones, así como las quillas de deriva que se suelen usar en embarcaciones como veleros, tienen perfiles hidrodinámicos correspondientes a foils simétricos, es decir, foils que a un ángulo de ataque de  $0^\circ$  poseen un coeficiente de sustentación igual a 0 y un coeficiente de resistencia extremadamente bajo.

**Drag coefficients for various bodies (continued)**

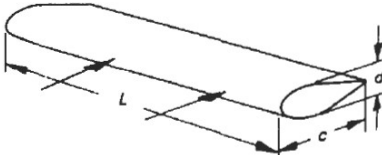
Shape	$\frac{L}{d}$	$C_d$	$\frac{R_e}{10^4}$	$A$	Arrangement
Long symmetrical aerofoil	16	0.005	800	$Ld$	
	8	0.006			
	7	0.007			
	5	0.008			
	4	0.009			

Imagen 26: Coeficiente de resistencia aproximado de un foil simétrico (Carvill, 1994)

Unos perfiles muy utilizados para este fin son los de la serie NACA 16, siendo prueba de ello la cantidad de trabajos en los que son utilizados (Besch, 1974; Besnard, Schmitz, Tzong, Kaups, Hefazi, Hess, Chen and Cebeci, 1998; Bjelke Morch, 1992). Es por ello que en el presente trabajo se calcula el coeficiente de resistencia para un rango de perfiles de esta serie NACA, que en este caso irá desde el NACA 16-006 hasta el 16-012, y así poder comparar sus características posteriormente. Este ensayo será realizado de nuevo en JavaFoil.

Como el foil de proa estimado cuenta con una cuerda de 0,146 metros, es razonable plantear una cuerda para su mástil de 0,145 metros. Esto se debe a que los mástiles se diseñarán para que la cuerda de los mismos coincida con la longitud del foil más pequeño (en este caso el de proa) en el sentido de la eslora para la condición de crucero, es decir, para un ángulo geométrico de  $-2,6^\circ$ . Por tanto, si multiplicamos la cuerda del foil por el coseno de ese ángulo nos saldrá 0,145 metros siendo razonable que este valor coincida con la cuerda del mástil de proa. Tanto las dimensiones del mástil de proa como como las de los mástiles de popa serán las mismas. Utilizando las velocidades de funcionamiento se pueden calcular los números de Reynolds de los mástiles:

MÁSTIL	
c (m)	0,145
L (m)	0,8
Re.despegue	4,25E+05
Re.crucero	1,42E+06

Tabla 15: Características de los mástiles

Además, hay otro aspecto a tener en cuenta. El ángulo de reposo para el foil en la estructura será el ángulo relativo a la velocidad de crucero,  $-2,6^\circ$ . Es decir, para conseguir un ángulo de ataque en los foils de 9 grados en la condición de despegue, habrá que inclinar los mástiles un ángulo de  $11,6^\circ$ . Para tenerlo en cuenta en JavaFoil a la hora de obtener el coeficiente de resistencia, en el panel de opciones se seleccionará  $11,6^\circ$  donde pone Sweep Angle. Por tanto:

ÁNGULO INCLINACIÓN MÁSTILES ( $^\circ$ )	
Despegue	11,6
Crucero	0

Tabla 16: Ángulo de inclinación de los mástiles

Con toda esta información en los paneles de JavaFoil se obtienen los siguientes coeficientes de resistencia:

NACA	t (m)	$C_{Ds}$ (Despegue)	$C_{Ds}$ (Crucero)	$C_p$
16-006	0,009	0,00538	0,00426	-0,14
16-007	0,010	0,00516	0,00463	-0,164
16-008	0,012	0,00491	0,00432	-0,188
16-009	0,013	0,00503	0,0046	-0,213
16-010	0,015	0,00593	0,00422	-0,238
16-011	0,016	0,00611	0,00384	-0,263
16-012	0,017	0,0063	0,00396	-0,289

Tabla 17: Resultados para distintos perfiles de mástiles

De esta manera, se escoge el NACA 16-011 como perfil para nuestros mástiles ya que es el que menos coeficiente de resistencia posee en la condición de crucero.

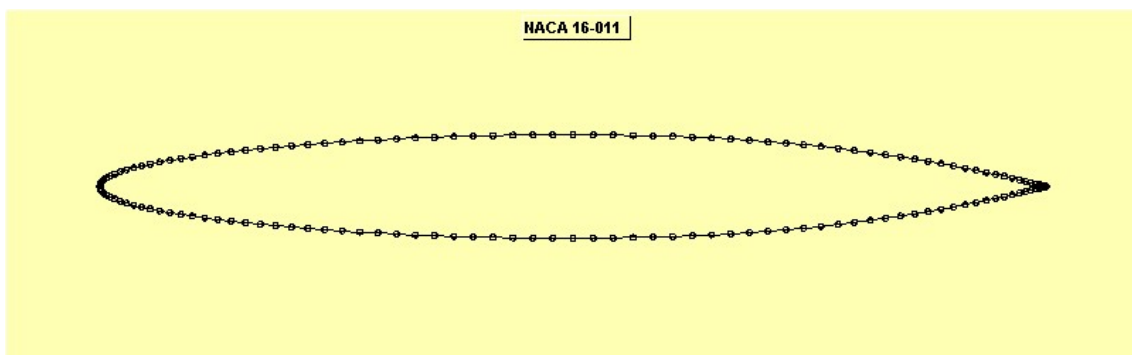


Imagen 27: NACA 16-011

Además, hay que asegurarse de que este perfil no cavite. Teniendo como referencia los índices de cavitación ya calculados en los apartados en los que se definía la geometría del

foil, se comparan con los coeficientes de presión de los perfiles NACA 16 calculados. Como se puede observar, en ningún caso se llega a cumplir la igualdad (9) y por lo tanto ninguno de los NACA 16 que se han ensayado cavita en las condiciones de funcionamiento.

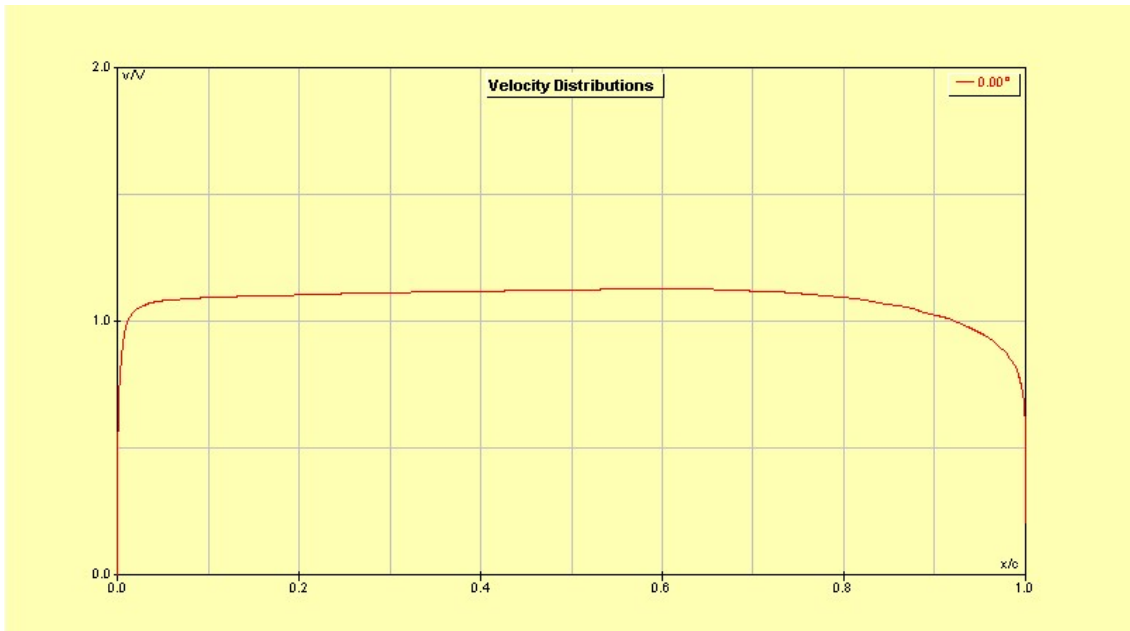


Imagen 28: Variación del coeficiente de presión a lo largo de la cuerda del NACA 16-011 en las condiciones de funcionamiento

### 5.3. Selección del material

Un punto crítico a la hora de construir el conjunto foil-mástiles es el de la selección de un material que sea capaz de aguantar los requerimientos de la navegación cuando el casco sobrevuela por encima del agua. Debido a la geometría y disposición del conjunto, se necesitarán materiales con mejores características mecánicas que la fibra de vidrio o el aluminio, materiales típicos para la construcción de pequeñas embarcaciones.

Para seleccionar el material de estos apéndices se recurrirá al programa CES Edupack<sup>2</sup>. Este software consiste en una base de datos compuesta dividida en tres niveles que permiten ir filtrando materiales en base a numerosos criterios. Los criterios que se emplearán serán referentes a distintas propiedades mecánicas y de durabilidad.

#### 5.3.1. Criterios de selección

Las propiedades mecánicas a tener en cuenta la hora de seleccionar el material son las siguientes:

- **Módulo de Young:** este módulo permite cuantificar y comparar la rigidez de los diversos materiales, siendo una de las principales propiedades a tener en cuenta. Un módulo de Young elevado significará menor deformación del material para un determinado esfuerzo.
- **Límite elástico:** para la aplicación que el material va a llevar a cabo interesa un límite elástico elevado para que el conjunto estructural se mantenga siempre en la zona de deformación elástica.

<sup>2</sup> <https://www.grantadesign.com/es/education/ces-edupack/>

- Tensión de rotura: debido a que los apéndices van a ser sometidos a distintos esfuerzos mecánicos de gran importancia, es vital que esta propiedad sea elevada.

Además, habrá que tener en cuenta otras propiedades que afecten a la durabilidad del material como son las siguientes:

- Resistencia al agua de mar: no hay que descuidar el hecho de que el medio marino es muy agresivo y que por tanto este punto es vital en la elección de un material.
- Resistencia a la radiación ultravioleta: este será otro factor a tener en cuenta ya que, debido a su uso, nuestro material recibirá una gran cantidad de radiación ultravioleta.

Finalmente, es importante destacar otro tipo de propiedades como son las siguientes:

- Densidad: es una de las propiedades de mayor importancia. Es necesario que la densidad del material a utilizar sea baja para lograr una estructura más ligera.
- Precio: el coste es siempre uno de los mayores puntos en contra a la hora de proyectar una embarcación.

### 5.3.2. Etapas del proceso de selección

Entrando al nivel 3 del programa, que es el que más variedad de materiales posee, se empieza a definir gráficas y a ir filtrando materiales a través de las distintas etapas. Debido a que los mejores materiales compuestos para esta aplicación son aquellos que poseen fibra de carbono, se parte de la pestaña en la que se encuentran los polímeros plásticos.

En la primera etapa se buscan materiales según su densidad y su precio. De esta manera, se seleccionan todos los materiales que posean una densidad inferior a  $1600 \text{ kg/m}^3$  y un precio que en ningún caso sobrepase los 100 euros/kg.

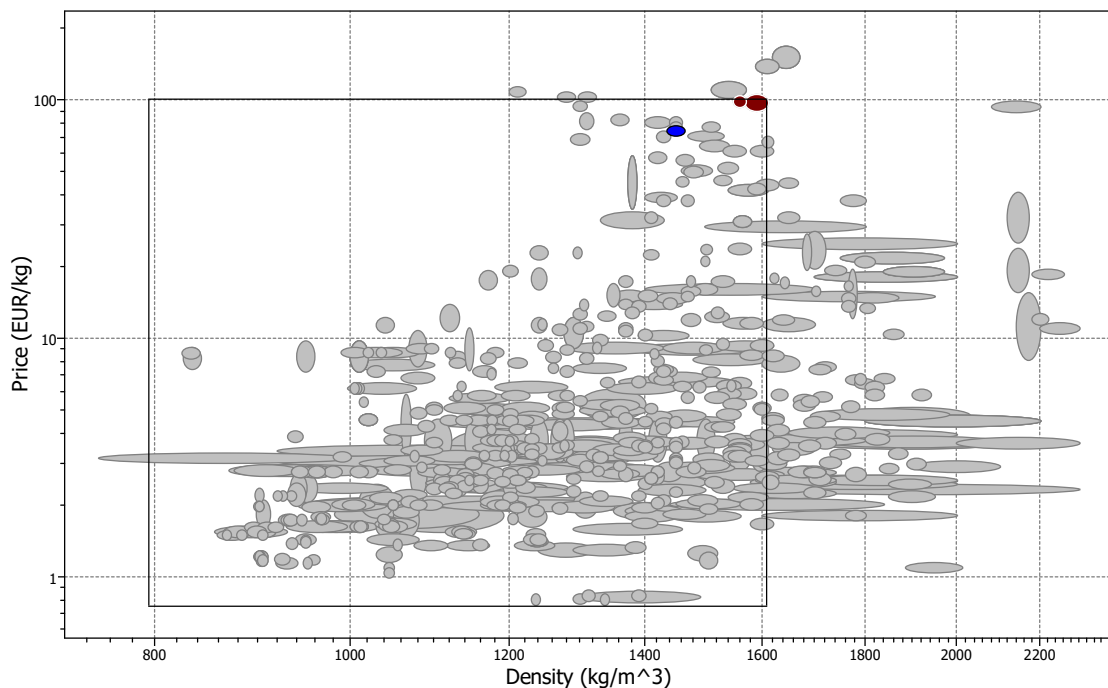


Imagen 29: Gráfica densidad-precio

En la segunda etapa se seleccionan aquellos materiales que posean una resistencia excelente tanto al agua salada como a la radiación ultravioleta producida por el sol.

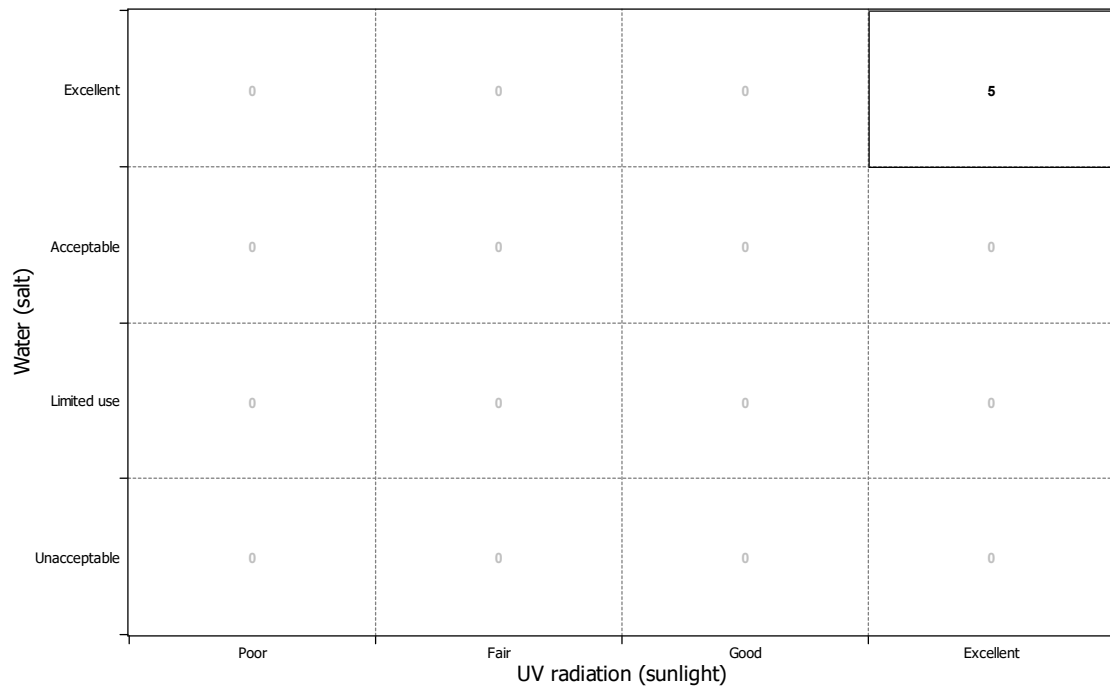


Imagen 30: Gráfica radiación solar-agua salada

En la tercera etapa, se seleccionan aquellos materiales cuya tensión de rotura y límite elástico estén por encima de los 100 MPa.

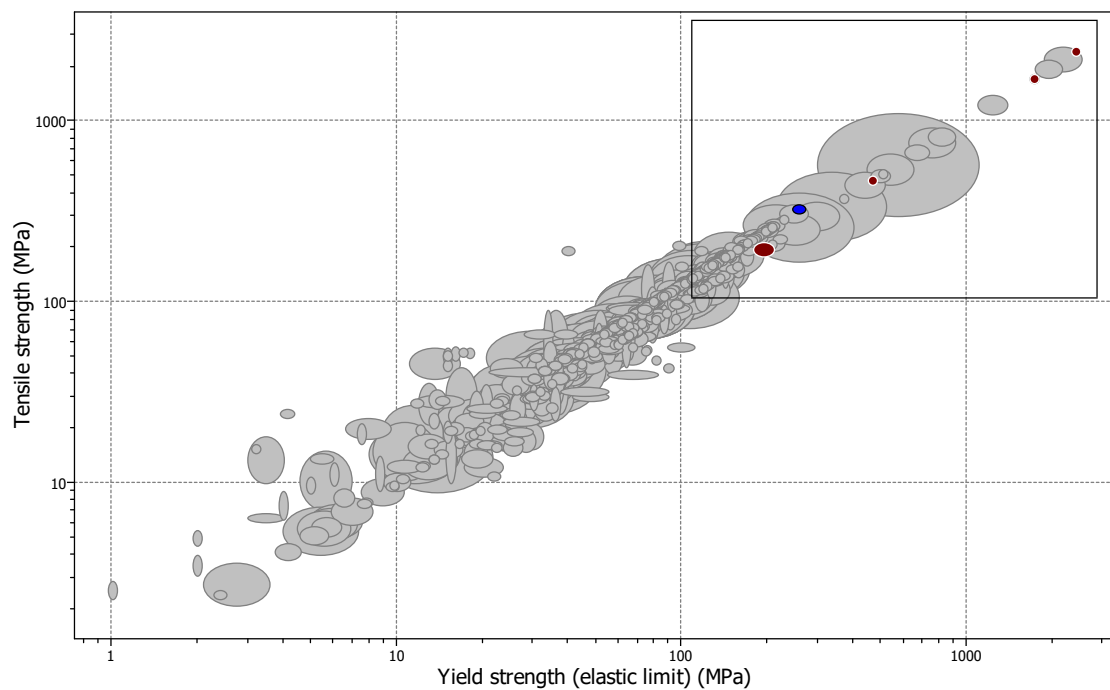


Imagen 31: Gráfica límite elástico-tensión de rotura

Finalmente, para terminar de reducir el número de posibles materiales, se dispone de una cuarta etapa en la que se escogen aquellos materiales cuyo límite elástico esté por encima de los 200 MPa y que además posean un módulo de Young por encima de los 50 GPa.

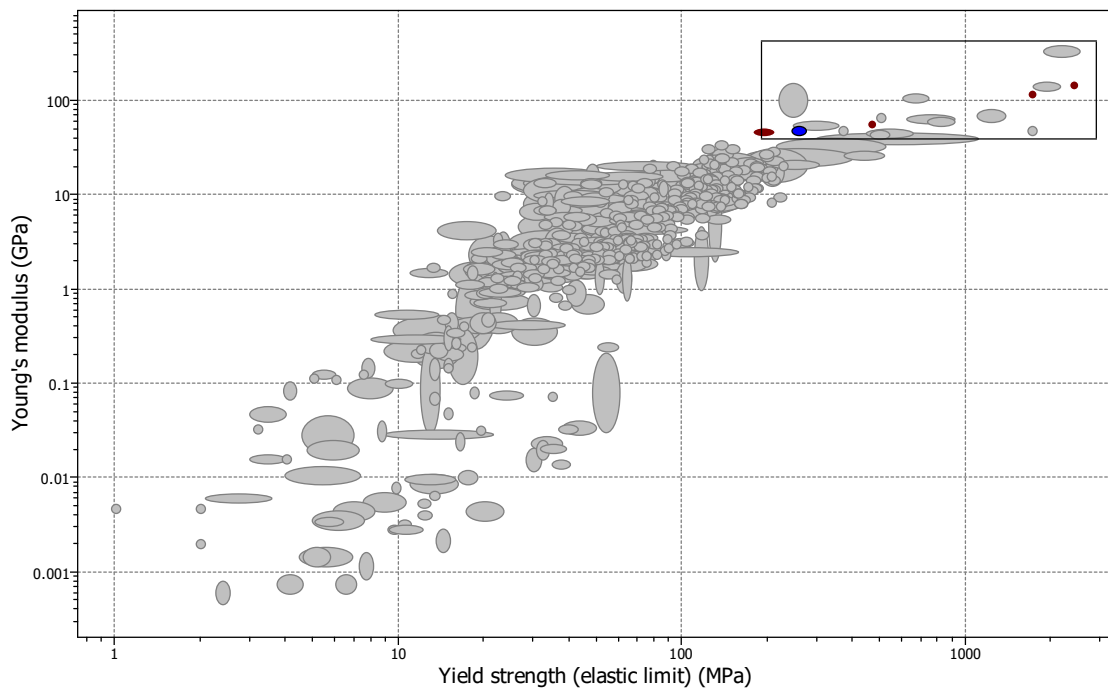


Imagen 32: Gráfica límite elástico-módulo de Young

### 5.3.3. Elección final del material

Una vez de filtrados los materiales a través de estas cuatro etapas se obtienen cinco posibles soluciones. Sin embargo, los materiales compuestos suelen ser anisotrópicos, es decir, con comportamiento diferente según la dirección en la que realice el esfuerzo. Normalmente, estos materiales se simplifican con dos módulos de Young distintos: uno para el eje principal que es más resistente y otro para el eje secundario que es menos resistente. Por este motivo y con la intención de simplificar el cálculo de la estructura en los siguientes apartados, se reduce la lista de posibles materiales a aquellos en los que se especifica que son cuasi-isotrópicos gracias a que su laminado se realiza en base a cuatro capas en las que las fibras se disponen a 0, 45, -45 y 90 grados por capa respectivamente:

- BMI/HS fibra de carbono, UD composite con laminado cuasi-isotrópico
- PEEK/IM fibra de carbono, UD composite con laminado cuasi-isotrópico

De todos ellos el material escogido será finalmente el siguiente:

- PEEK/IM fibra de carbono, UD composite con laminado cuasi-isotrópico

Este material, además de ser el menos denso de los dos, es el que posee valores más altos de módulo de Young, límite elástico y tensión de rotura. Este material está compuesto de polímero en un 30-35% y de fibra de carbono en un 65-70%. Además, sus principales propiedades pueden resumirse en la siguiente tabla:

<b>Densidad <math>\rho</math></b>	1550-1570 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Young E</b>	56,1-57,1 GPa
<b>Coefficiente de Poisson <math>\nu_s</math></b>	0,31
<b>Límite elástico <math>\sigma_e</math></b>	460-473 MPa
<b>Tensión de rotura <math>\sigma_r</math></b>	460-473 MPa

Tabla 18: Propiedades del material seleccionado para la estructura de mástiles y foils

#### 5.4. Cálculo de la viabilidad estructural del sistema

Con todo lo visto anteriormente ya se podría dar una primera definición de la estructura mástil-foil de la embarcación. En base a la configuración y disposición del sistema mástil-foil dados en apartados anteriores, esta estructura será similar a la del hydrofoil de la marca Seabubble y se definirán los siguientes ejes de coordenadas globales:



Imagen 33: Configuración de un hydrofoil de la marca Seabubble, similar a la de la embarcación del presente trabajo

Como se puede apreciar, el eje  $X_G$  es el eje que va de popa a proa, el eje  $Y_G$  el que va de babor a estribor y el eje  $Z_G$  aquel que va de abajo hacia arriba.

En base a todas las embarcaciones citadas anteriormente (veleros e hydrofoils eléctricos), se estima para el presente trabajo una separación entre los mástiles de popa de 0,8 m. Los conjuntos estructurales de proa y popa formados por los mástiles y los foils se encuentran definidos más claramente en el apartado a) del ANEXO V.

Para llevar a cabo el cálculo de la viabilidad estructural de este conjunto, se recurrirá al programa MEFI<sup>3</sup>. MEFI es un software libre y gratuito creado y desarrollado por el Dr. Pedro Castejón de la Universidad Politécnica de Cartagena, cuyas siglas significan Método de los Elementos Finitos en Ingeniería.

Este programa realiza el análisis estático (elástico-lineal), a través del Método de Elementos Finitos (MEF), de problemas de elasticidad y problemas de campos en régimen permanente, y mediante análisis matricial, de estructuras planas articuladas o rígidas. Para ello utiliza un modelo definido mediante la geometría, los materiales, las propiedades, los elementos, los desplazamientos impuestos y las cargas.

Una vez se realice el modelo en MEFI y se analice, se comprobará si este es viable o no mediante el criterio de máxima tensión de Von Mises. Además, habrá que confirmar mediante este mismo análisis que los desplazamientos producidos en la estructura son lo suficientemente pequeños como para que no afecten al óptimo funcionamiento de la embarcación. Para poder llevar a cabo este modelo en MEFI, es necesario asumir que el material empleado posee un comportamiento totalmente isotrópico. Los resultados obtenidos en este apartado se pueden consultar con más detalle en el ANEXO II.

#### 5.4.1. Criterio de máxima tensión de Von Mises

La tensión de Von Mises se puede definir de la siguiente manera:

$$\sigma_{VonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (16)$$

donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  son las tensiones principales.

Según este criterio, el modelo dejará de ser viable siempre que la tensión de Von Mises sea igual o superior a la tensión límite del material que se haya empleado:

$$\sigma_{VonMises} \geq \sigma_e. \quad (17)$$

En este caso se empleará como tensión límite el límite elástico del material hallado en el anterior apartado, ya que es lo más común y además posee valores similares a los de la tensión de rotura.

#### 5.4.2. Cálculo de áreas y momentos de inercia de las secciones transversales de mástiles y foils

Una vez se han calculado el resto de dimensiones de la estructura, sólo queda calcular las áreas y momentos de área de los mástiles y foils para poder trasladar la estructura a MEFI. Esto se llevará a cabo con el software Rhinoceros 3D<sup>4</sup>.

Primero, se exporta la sección girada el ángulo que le corresponde desde JavaFoil hacia Rhinoceros 3D. Mediante los comandos que posee este programa, se escala el perfil y se desplaza la sección de tal manera que el origen de coordenadas del programa coincida con el centroide de área de la sección.

<sup>3</sup> <https://www.upct.es/~deyc/software/mefi.php>

<sup>4</sup> <https://www.rhino3d.com/es/>



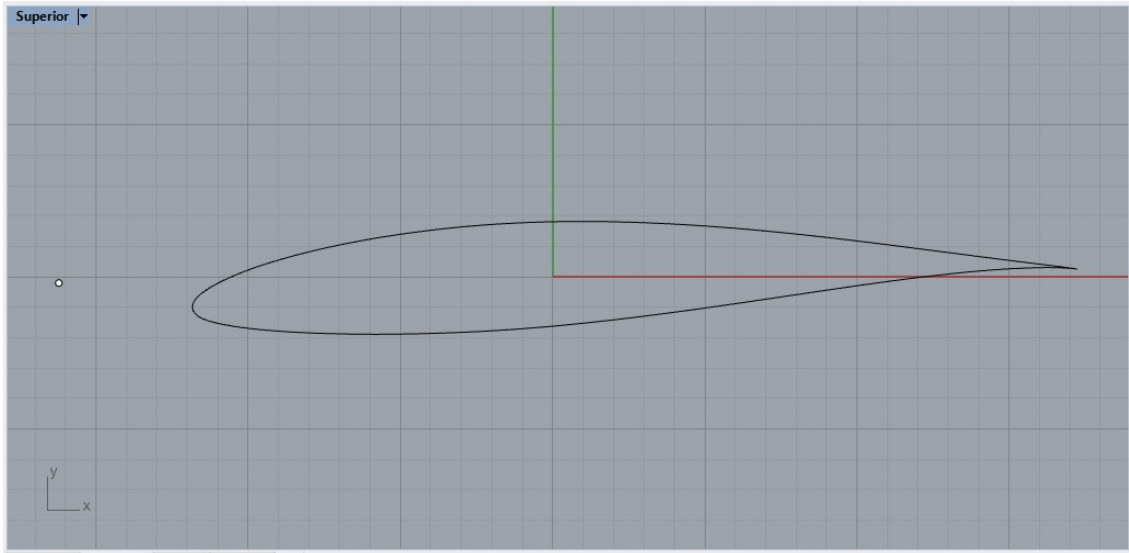


Imagen 34: NACA 63-412 girado -2,6° importado en Rhinoceros 3D

Posteriormente, mediante el comando MomentosDeÁrea se obtienen las inercias y el área de las secciones. El eje x local que define Rhinoceros es el que estaría sobre la cuerda del foil en el caso de que este estuviera a un ángulo geométrico de 0°, tal como se muestra en la Imagen 34. Los resultados para los perfiles que se van a emplear son los siguientes y en base a esos ejes locales x e y:

Características de la sección transversal de los perfiles del conjunto de proa					
Perfil	Ángulo de giro (°)	Cuerda (m)	Área (m <sup>2</sup> )	I <sub>xx</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>yy</sub> (m <sup>4</sup> )
63-412	9	0,146	1,61E-03	1,58E-06	6,24E-08
63-412	-2,6	0,146	1,61E-03	1,61E-06	3,31E-08
16-011	0	0,145	1,68E-03	2,01E-06	2,54E-08

Características de la sección transversal de los perfiles del conjunto de popa					
Perfil	Ángulo de giro (°)	Cuerda (m)	Área (m <sup>2</sup> )	I <sub>xx</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>yy</sub> (m <sup>4</sup> )
63-412	9	0,291	6,39E-03	2,49E-05	9,86E-07
63-412	-2,6	0,291	6,39E-03	2,54E-05	5,22E-07
16-011	0	0,145	1,68E-03	2,01E-06	2,54E-08

Tabla 19: Características de la sección transversal de los perfiles del conjunto estructural mástil-foil

#### 5.4.3. Construcción del conjunto estructural de proa para la condición de despegue (MEFI)

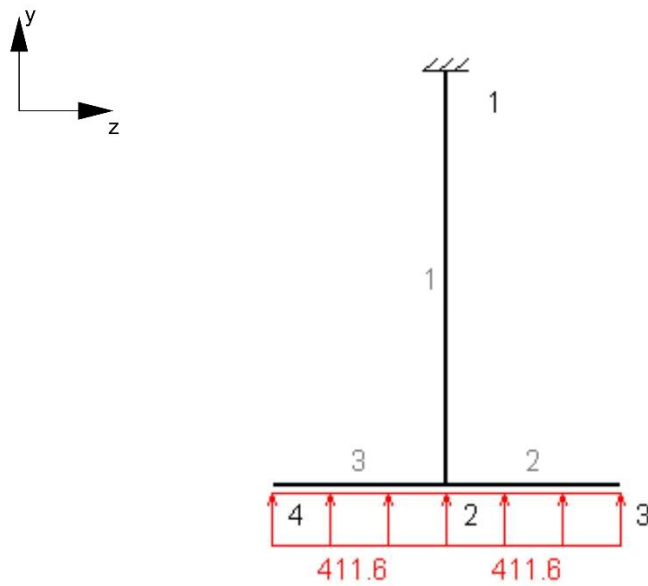
Para comprobar la validez estructural se ensaya a distintas profundidades de despegue. En este primer caso, al ir los mástiles un cierto ángulo para la condición de despegue, esta profundidad irá definida por la siguiente ecuación:

$$h = L \times \cos \theta \quad (18)$$

siendo h la profundidad, L la longitud del mástil y  $\theta$  el ángulo que en este caso será 11,6°. Se asume que es un ángulo con lo suficientemente pequeño como para no entrar en pérdida y que por tanto el conjunto estructural trabaja de manera óptima, aunque con las herramientas empleadas para este trabajo no es posible estimar con precisión esta

condición concreta. En la condición de despegue se ensaya para una longitud del mástil sumergida de 80, 65, 50 y 35 centímetros, lo que equivale a profundidades de 78, 64, 49 y 34 centímetros respectivamente.

Con todos los datos de los apartados anteriores se pueden montar dos modelos en MEFI a partir de una vista lateral y una frontal del mismo, todo ello dejando claro en todo momento los ejes de coordenadas que se utilizan, que en este caso son los ejes locales empleados en Rhinoceros 3D en el apartado anterior. El modelo creado a partir de la vista frontal es el siguiente:



*Imagen 35: Modelo MEFI creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (despegue)*

Cuyos parámetros son:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L 0.78 % m
H 0.657 % m
A1 1.68e-3 % m^2
A2 1.68e-3 % m^2
A A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Ixx1 2.01e-6 % m^4
Ixx2 2.01e-6 % m^4
Ixx Ixx1+(Ixx2-Ixx1)*x1 % Ixx(x1=x/L)
A3 1.61e-3 % m^2
Ixx3 1.58e-6 % m^4

% Carga foil
Fx 0 % N
Fy -411.6 % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

```

Imagen 36: Parámetros modelo proa vista frontal (despegue).

A su vez, el modelo creado a partir de una vista lateral es el siguiente:

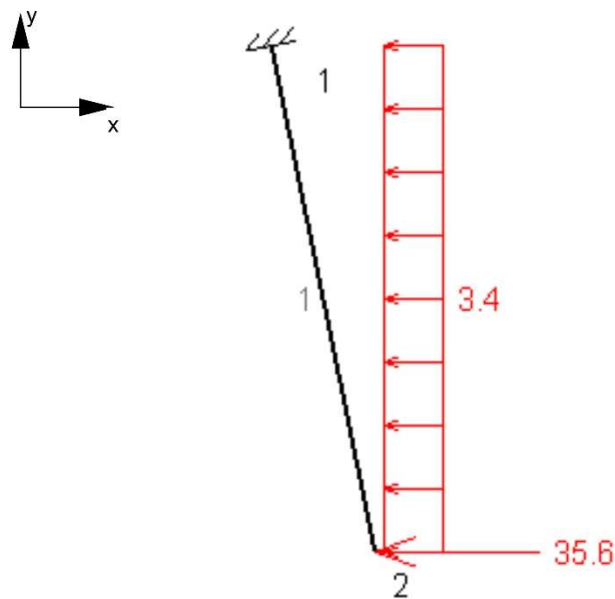


Imagen 37: Modelo MEF1 creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (despegue)

Cuyos parámetros son:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L 0.8 % m
alph 11.6 % degrees
ralph alph*pi/180 % radians
A1 1.68e-3 % m^2
A2 1.68e-3 % m^2
A A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Iyy1 2.54e-8 % m^4
Iyy2 2.54e-8 % m^4
Iyy Iyy1+(Iyy2-Iyy1)*x1 % Iyy(x1=x/L)

% Carga foil
Fy 3.4 % N
Fx -35.6 % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

```

Imagen 38: Parámetros modelo proa vista lateral (despeque)

#### 5.4.4. Construcción del conjunto estructural de popa para la condición de despeque (MEFI)

De manera lógica, el conjunto estructural de popa se ensaya para las mismas profundidades que el de proa e igualmente, los mástiles estarán inclinados 11,6°. En este caso, el modelo creado a partir de una vista frontal de este conjunto es el siguiente:

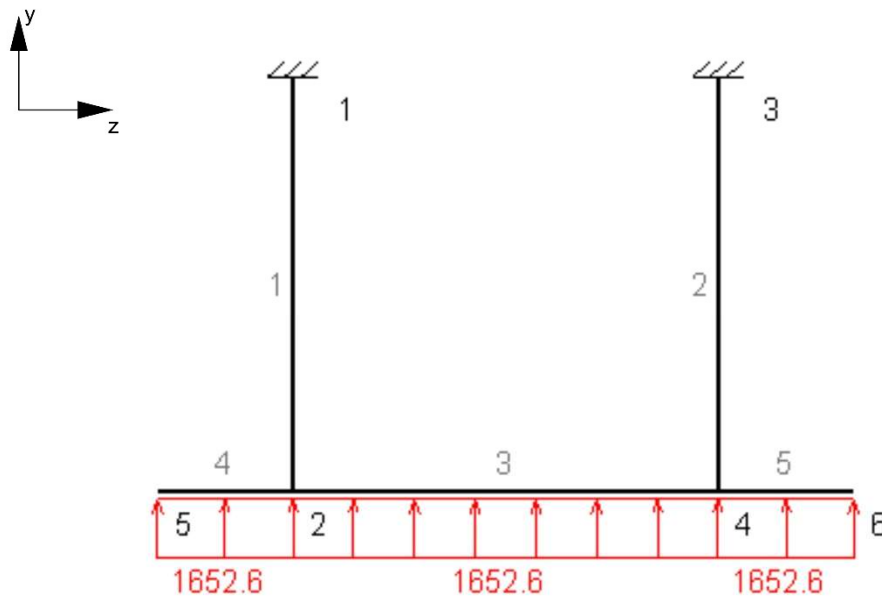


Imagen 39: Modelo MEFI creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (despeque)

Cuyos parámetros serían los siguientes:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L 0.78 % m
h 0.8 % m
H 1.311 % m
hv (H-h)/2 %m
A1 1.68e-3 % m^2
A2 1.68e-3 % m^2
A A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Ixx1 2.01e-6 % m^4
Ixx2 2.01e-6 % m^4
Ixx Ixx1+(Ixx2-Ixx1)*x1 % Ixx(x1=x/L)
A3 6.39e-3 % m^2
Ixx3 2.49e-5 % m^4

% Carga foil
Fx 0 % N
Fy 1652.6 % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

```

Imagen 40: Parámetros modelo popa vista frontal (despegue)

A su vez, el modelo creado a partir de la vista lateral de este conjunto será el siguiente:

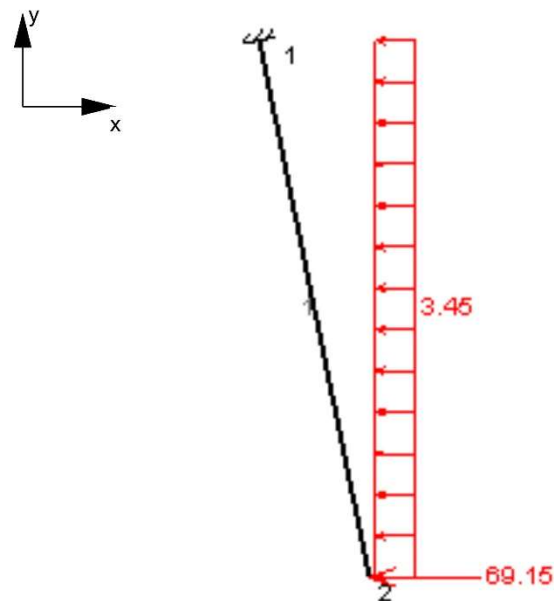


Imagen 41: Modelo MEF1 creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (despegue)

Y cuenta con los siguientes parámetros:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L      0.8           % m
alph   11.6         % degrees
ralph  alph*pi/180  % radians
A1     1.68e-3      % m^2
A2     1.68e-3      % m^2
A      A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Iyy1   2.54e-8      % m^4
Iyy2   2.54e-8      % m^4
Iyy    Iyy1+(Iyy2-Iyy1)*x1 % Iz (x1=x/L)

% Carga foil
Fy     3.45         % N
Fx     69.15        % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

% Superficie mojada
L1     0.80 % longitud sumergida del puntal en metros

% Masa puntual
M      2.0 % kg
g      9.81 % m/s2

```

Imagen 42: Parámetros modelo popa vista lateral (despegue)

En este caso sólo se añade la resistencia provocada por uno de los mástiles y la mitad de la resistencia producida por el foil. Esto se debe a que debido al tipo de modelo que es sólo se puede tener en cuenta la mitad del conjunto total para construir su vista lateral. Por eso, los resultados que se obtienen aquí, tanto de desplazamientos como de tensiones de Von Mises, son los mismos para ambos mástiles y ambas mitades del foil.

5.4.5. Construcción del conjunto estructural de proa para la condición de crucero (MEFI)  
 En la condición de crucero ninguno de los mástiles tiene un ángulo de inclinación, lo que facilita la construcción del modelo. Tanto para proa como popa las profundidades a ensayar son de 15, 30, 45 y 60 centímetros respectivamente.

El modelo de proa que representa la vista frontal es el siguiente:

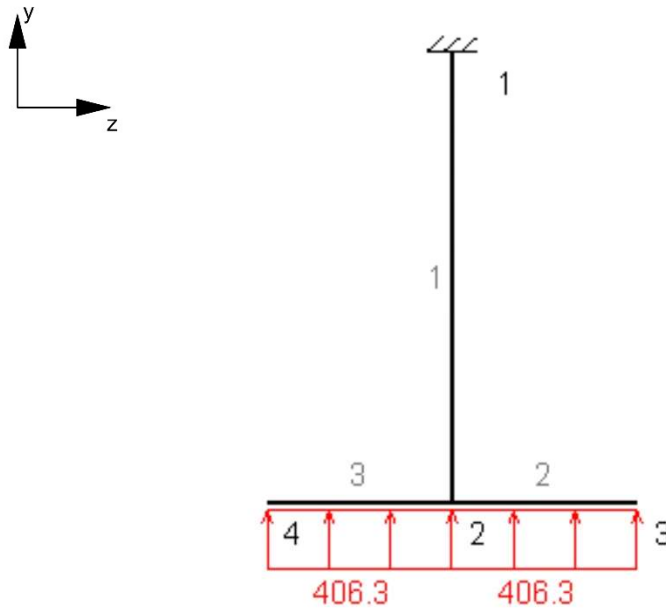


Imagen 43: Modelo MEF1 creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (cruceiro)

Siendo sus parámetros los siguientes:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L 0.8 % m
H 0.657 % m
A1 1.68e-3 % m^2
A2 1.68e-3 % m^2
A A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Ixx1 2.01e-6 % m^4
Ixx2 2.01e-6 % m^4
Ixx Ixx1+(Ixx2-Ixx1)*x1 % Ix(x1=x/L)
A3 1.61e-3 % m^2
Ixx3 1.61e-6 % m^4

% Carga foil
Fx 0 % N
Fy -406.3 % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

```

Imagen 44: Parámetros modelo proa vista frontal (cruceiro)

A su vez, el modelo de proa que representa la vista lateral es el siguiente:

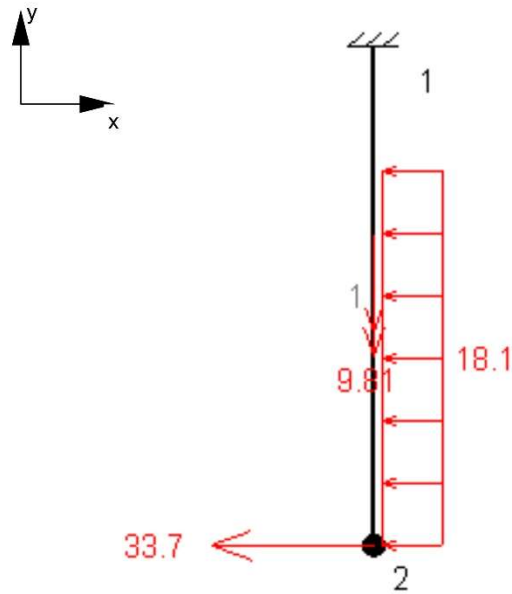


Imagen 45: Modelo MEFI creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de proa con las cargas en newtons (crucero)

Siendo sus parámetros los siguientes:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L 0.8 % m
A1 1.68e-3 % m^2
A2 1.68e-3 % m^2
A A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Iyy1 2.54e-8 % m^4
Iyy2 2.54e-8 % m^4
Iyy Iyy1+(Iyy2-Iyy1)*x1 % Iz (x1=x/L)

% Carga foil
Fy 18.1 % N
Fx -33.7 % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

% Superficie mojada
L1 0.60 % profundidad del foil en metros

% Masa puntual
M 2.0 % kg
g 9.81 % m/s2

```

Imagen 46: Parámetros modelo proa vista lateral (crucero)

#### 5.4.6. Construcción del conjunto estructural de popa para la condición de crucero (MEFI)

El modelo de popa que representa la vista frontal es el siguiente:



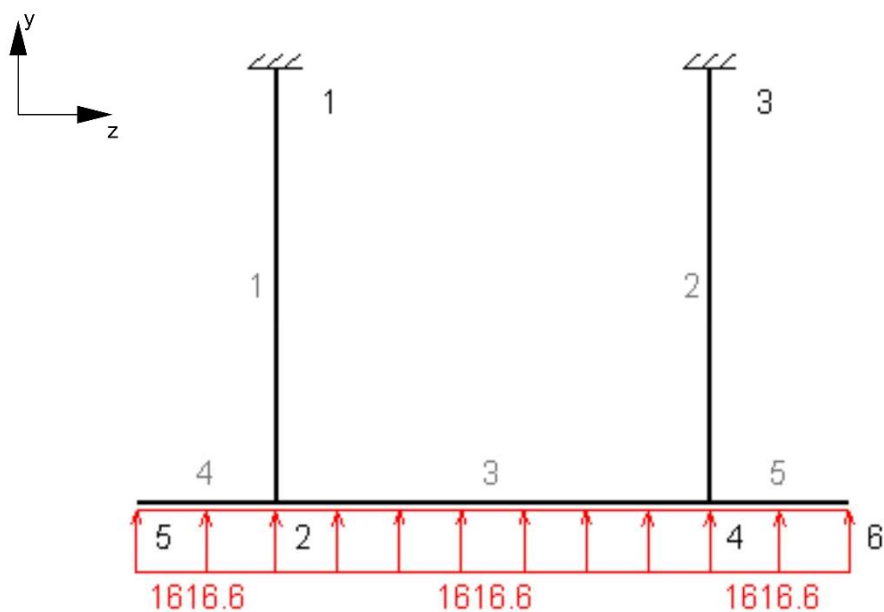


Imagen 47: Modelo MEF creado a partir de una vista frontal del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (crucero)

El cual está definido por los siguientes parámetros:

```

PARÁMETROS
% par val
% Geometria
L 0.8 % m
h 0.8 % m
H 1.311 % m
hv (H-h)/2 %m
A1 1.68e-3 % m^2
A2 1.68e-3 % m^2
A A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Ixx1 2.01e-6 % m^4
Ixx2 2.01e-6 % m^4
Ixx Ixx1+(Ixx2-Ixx1)*x1 % Ix(x1=x/L)
A3 6.39e-3 % m^2
Ixx3 2.54e-5 % m^4

% Carga foil
Fx 0 % N
Fy 1616.6 % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

% Superficie mojada
%L1 0.8 % proporcion de L

```

Imagen 48: Parámetros modelo popa vista frontal (crucero)

A su vez, el modelo de popa que representa la vista lateral es el siguiente:

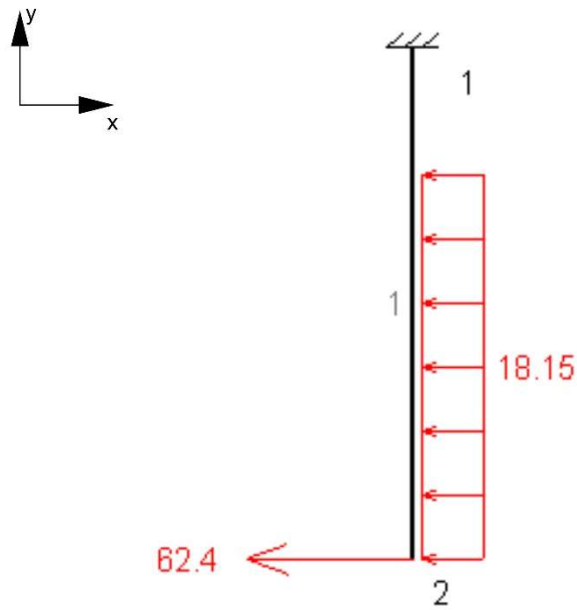


Imagen 49: Modelo MEFI creado a partir de una vista lateral del conjunto estructural de popa con las cargas en newtons (crucero)

Y está definido por los siguientes parámetros:

```

PARÁMETROS
% par_val
% Geometria
L      0.8          % m
A1     1.68e-3     % m^2
A2     1.68e-3     % m^2
A      A1+(A2-A1)*x1 % A(x1=x/L)
Iyy1   2.54e-8     % m^4
Iyy2   2.54e-8     % m^4
Iyy    Iyy1+(Iyy2-Iyy1)*x1 % Iz(x1=x/L)

% Carga foil
Fy     18.15      % N
Fx     62.4       % N

% Material del hydrofoil
you_foil 56.1e9 % Pa
poi_foil 0.31
den_foil 1550 % kg/m3

% Superficie mojada
L1     0.60 % profundidad del foil en metros

% Masa puntual
M      2.0 % kg
g      9.81 % m/s2

```

Imagen 50: Parámetros modelo popa vista lateral (crucero)

#### 5.4.7. Análisis de resultados

Una vez se han realizado las comprobaciones se recogen los resultados y se comprueba que los desplazamientos y las tensiones de Von Mises son óptimas. Para ello primero habrá que tener en cuenta cómo se han definido los puntos en la estructura y los ejes. En el conjunto de proa se definen los siguientes puntos:

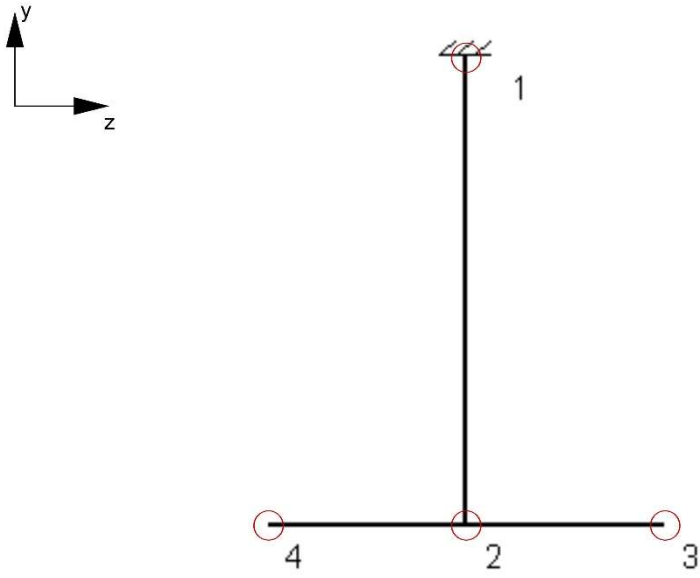


Imagen 51: Definición de nodos en el conjunto estructural de proa

Mientras que en el conjunto de popa:

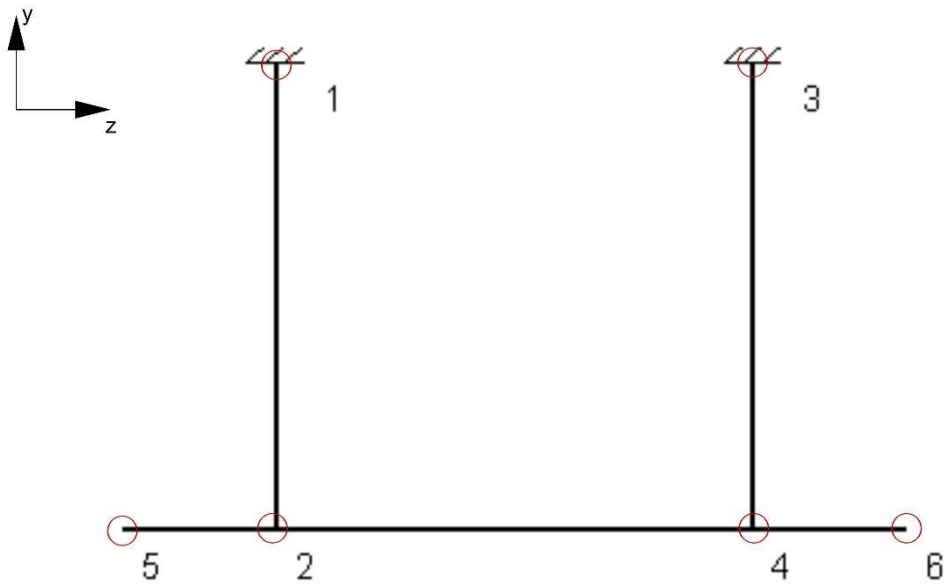


Imagen 52: Definición de nodos en el conjunto estructural de popa

Como se comenta en los apartados 5.4.2. y 5.4.3., los ejes locales que se utilizan son los mismos que se emplearon en un principio para calcular las inercias de las secciones de mástiles y foils.

Por otro lado, aunque en las imágenes de los apartados 5.4.3, 5.4.4, 5.4.5, y 5.4.6. se muestren los modelos parametrizados sólo para una profundidad, el hecho de probar la viabilidad estructural a varias profundidades implicará que las cargas sobre los mástiles en los modelos que representan la vista lateral de la estructura varíen según esta misma profundidad de ensayo. En las imágenes 53 y 54 se muestra la diferencia entre un ensayo a una profundidad de 0,60 metros y otro realizado a 0,30 metros.

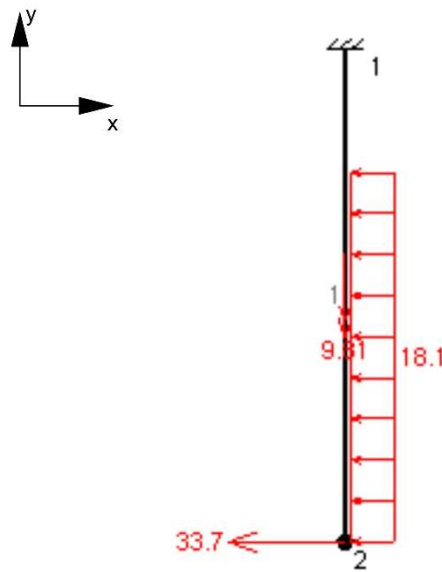


Imagen 53: Cargas en newtons sobre el mástil a una profundidad de 60 cm

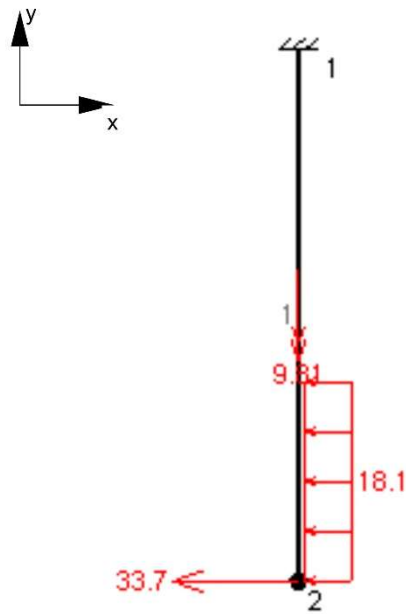


Imagen 54: Cargas en newtons sobre el mástil a una profundidad de 30 cm

5.4.7.1. Resultados del conjunto de proa

Primero se obtienen los resultados para la condición de despegue. Para una profundidad de 0,34 metros:

Puntos	Desplazamientos Totales (m)	
	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,13E-03	-8,46E-04
3	-4,13E-03	-8,39E-04
4	-4,13E-03	-8,39E-04

Tabla 20: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,34 m (despegue)

Para 0,49 metros:

Puntos	Desplazamientos Totales (m)	
	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,16E-03	-8,52E-04
3	-4,16E-03	-8,45E-04
4	-4,16E-03	-8,45E-04

Tabla 21: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,49 m (despegue)

Para 0,64 metros:

Desplazamientos Totales (m)		
Puntos	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,19E-03	-8,57E-04
3	-4,19E-03	-8,50E-04
4	-4,19E-03	-8,50E-04

Tabla 22: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,64 m (despegue)

Para 0,78 metros:

Desplazamientos Totales (m)		
Puntos	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,21E-03	-8,61E-04
3	-4,21E-03	-8,54E-04
4	-4,21E-03	-8,54E-04

Tabla 23: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,78 m (despegue)

En cuanto a las tensiones de Von Mises obtenemos lo siguiente:

Profundidad (m)	Tensión Von Mises (Pa)
0,34	8,25E+06
0,49	8,32E+06
0,64	8,38E+06
0,78	8,44E+06

Tabla 24: Tensiones de Von Mises del conjunto de proa para las distintas profundidades (despegue)

Posteriormente se obtienen los resultados para la condición de crucero. Para una profundidad de 0,15 metros:

Desplazamientos Totales (m)		
Puntos	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,11E-03	2,02E-06
3	-4,11E-03	8,56E-06
4	-4,11E-03	8,56E-06

Tabla 25: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,15 m (crucero)

Para 0,30 metros:

Desplazamientos Totales (m)		
Puntos	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,27E-03	2,02E-06
3	-4,27E-03	8,56E-06
4	-4,27E-03	8,56E-06

Tabla 26: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,30 m (crucero)

Para 0,45 metros:

Desplazamientos Totales (m)		
Puntos	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,48E-03	2,02E-06
3	-4,48E-03	8,56E-06
4	-4,48E-03	8,56E-06

Tabla 27: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,45 m (crucero)

Para 0,60 metros:

Desplazamientos Totales (m)		
Puntos	Eje x	Eje y
1	0,00E+00	0,00E+00
2	-4,67E-03	2,02E-06
3	-4,67E-03	8,56E-06
4	-4,67E-03	8,56E-06

Tabla 28: Desplazamientos totales del conjunto de proa para una profundidad de 0,60 m (crucero)

Dando como resultado las siguientes tensiones de Von Mises:

Profundidad (m)	Tensión Von Mises (Pa)
0,15	8,05E+06
0,3	8,39E+06
0,45	8,85E+06
0,6	9,36E+06

Tabla 29: Tensiones de Von Mises del conjunto de proa para las distintas profundidades (crucero)

Como se puede apreciar en las tablas resultantes, la mayor tensión de Von Mises ha sido calculada para el supuesto de una navegación de crucero con los mástiles a una profundidad de 0,6 m dando un valor de 9,36 MPa. Esta tensión sólo supone un pequeño porcentaje del límite elástico del material de construcción:

$$\frac{9,36}{460} \times 100 = 2\%$$

Con todos estos resultados se puede concluir que el conjunto de proa será estructuralmente viable.

#### 5.4.7.2. Resultados del conjunto de popa

De la misma manera que en el apartado anterior, se obtienen primero los resultados para la velocidad de despegue. Para 0,34 metros de profundidad:

Desplazamientos Totales (m)			
Puntos	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-7,99E-03	-1,63E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-7,99E-03	-1,63E-03	-1,04E-08
5	-7,99E-03	-1,63E-03	1,04E-08
6	-7,99E-03	-1,63E-03	-1,04E-08

Tabla 30: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,34 m (despegue)

Para 0,49 metros:

Desplazamientos Totales (m)			
Puntos	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-8,02E-03	-1,64E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-8,02E-03	-1,64E-03	-1,04E-08
5	-8,02E-03	-1,64E-03	1,04E-08
6	-8,02E-03	-1,64E-03	-1,04E-08

Tabla 31: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,49 m (despegue)

Para 0,64 metros:

Desplazamientos Totales (m)			
Puntos	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-8,04E-03	-1,64E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-8,04E-03	-1,64E-03	-1,04E-08
5	-8,04E-03	-1,64E-03	1,04E-08
6	-8,04E-03	-1,64E-03	-1,04E-08

Tabla 32: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,64 m (despegue)

Para 0,78 metros:

Desplazamientos Totales (m)			
Puntos	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-8,06E-03	-1,65E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-8,06E-03	-1,65E-03	-1,04E-08
5	-8,06E-03	-1,65E-03	1,04E-08
6	-8,06E-03	-1,65E-03	-1,04E-08

Tabla 33: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,78 m (despegue)

Siendo las tensiones de Von Mises en esta condición:



Profundidad (m)	Tensión Von Mises (Pa)
0,34	2,97E+07
0,49	2,98E+07
0,64	3,00E+07
0,78	3,01E+07

Tabla 34: Tensiones de Von Mises del conjunto de popa para las distintas profundidades (despegue)

A continuación, obtenemos los resultados para la condición de crucero. Para una profundidad de 0,15 metros:

Puntos	Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-7,54E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-7,54E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	-7,54E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	-7,54E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tabla 35: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,15 m (crucero)

Para 0,30 metros:

Puntos	Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-7,71E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-7,71E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	-7,71E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	-7,71E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tabla 36: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,30 m (crucero)

Para 0,45 metros:

Puntos	Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-7,91E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-7,91E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	-7,91E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	-7,91E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tabla 37: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,45 m (crucero)

Para 0,60 metros:

Puntos	Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	-8,11E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	-8,11E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	-8,11E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	-8,11E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tabla 38: Desplazamientos totales del conjunto de popa para una profundidad de 0,60 m (crucero)

Para esta condición obtenemos las siguientes tensiones de Von Mises:

Profundidad (m)	Tensión Von Mises (Pa)
0,15	2,75E+07
0,3	2,82E+07
0,45	2,91E+07
0,6	3,01E+07

Tabla 39: Tensiones de Von Mises del conjunto de popa para las distintas profundidades (crucero)

En este caso, se observa que las mayores tensiones de Von Mises se obtienen para el supuesto de navegación en condición de despegue para una profundidad de foils de 0,78 m y para la condición de despegue con los foils sumergidos 0,6 m. El valor de estas tensiones será de 30,1 MPa. De la misma manera que con el conjunto de proa, esta tensión sólo supone un pequeño porcentaje del límite elástico del material de construcción:

$$\frac{30,1}{460} \times 100 = 6,5\%$$

De esta manera, también se puede concluir que el conjunto de popa será estructuralmente viable.

## 6. DEFINICIÓN BÁSICA DE LA EMBARCACIÓN

### 6.1. Introducción

Una vez definidos mástiles y foils, se procede a dar una primera definición de la embarcación. Esta definición se realizará primero dimensionando la embarcación mediante una base de datos compuesta de embarcaciones similares. Posteriormente, se detallarán las formas que se van a definir para la embarcación. Finalmente, se concluirá esta definición básica mediante una primera definición de la distribución general.

### 6.2. Dimensionamiento de la embarcación

El dimensionamiento de una embarcación o de un buque mayor es un proceso que normalmente comienza con una investigación de buques similares y fiables que configuren una base de datos de referencia. Posteriormente, a partir de esta base de datos y de los requisitos y restricciones de proyecto se pasa a definir el resto de conceptos, como pueden ser las dimensiones principales, la planta propulsora o la distribución de pesos entre otros mediante regresiones estadísticas que establecen la relación entre los distintos parámetros.

#### 6.2.1. Base de datos

La elaboración de la base de datos se ha contado con un total de 11 embarcaciones. Estas embarcaciones son pequeños botes de recreo y utilitarios propulsados por motores fueraborda cuyas dimensiones y formas se ajustan a lo que necesita la embarcación a proyectar. Esta base es la siguiente:

Embarcación	Eslora -L (m)	Manga - B (m)	Puntal - D (m)	Desplazamiento - $\Delta$ (kg)
Lowe V1258	3,76	1,473	-	273,52
Starcraft Marine Alaskan 13 DLX	3,939	1,676	0,66	283,95
SL 12 Starcraft Marine	3,58	1,422	0,508	272,155
MirroCraft 4652	3,66	1,346	0,584	276,691
MirroCraft 4602	3,711	1,473	0,689	274,214
Crestliner 1260L Outreach	3,685	1,524	-	283,495
Crestliner 1000	3,05	1,219	0,406	161,025
Crestliner 1200	3,609	1,219	0,406	217,271
Princecraft Seasprite 12	3,7	1,5	0,5	280
Klamath 10 JAC	3,202	1,346	0,445	190,68
Klamath 12 Deluxe	3,762	1,6	0,597	290,299

Tabla 40: Base de datos de embarcaciones similares

#### 6.2.2. Relación entre dimensiones

Una vez se cuenta con la base de datos se procede a estudiar las distintas relaciones entre las dimensiones de las embarcaciones para conseguir unas rectas de regresión lo suficientemente válidas. Para ello se procura que el índice de correlación  $R^2$  resultante en estas rectas no sea menor en ningún momento de 0,6. El objetivo es encontrar unas rectas que permitan calcular el resto de dimensiones a partir del desplazamiento de la embarcación.

De esta manera se obtienen unos resultados aceptables para las relaciones:

- Desplazamiento – eslora

- Desplazamiento – manga
- Desplazamiento – puntal

Para la relación desplazamiento- eslora se obtiene lo siguiente:

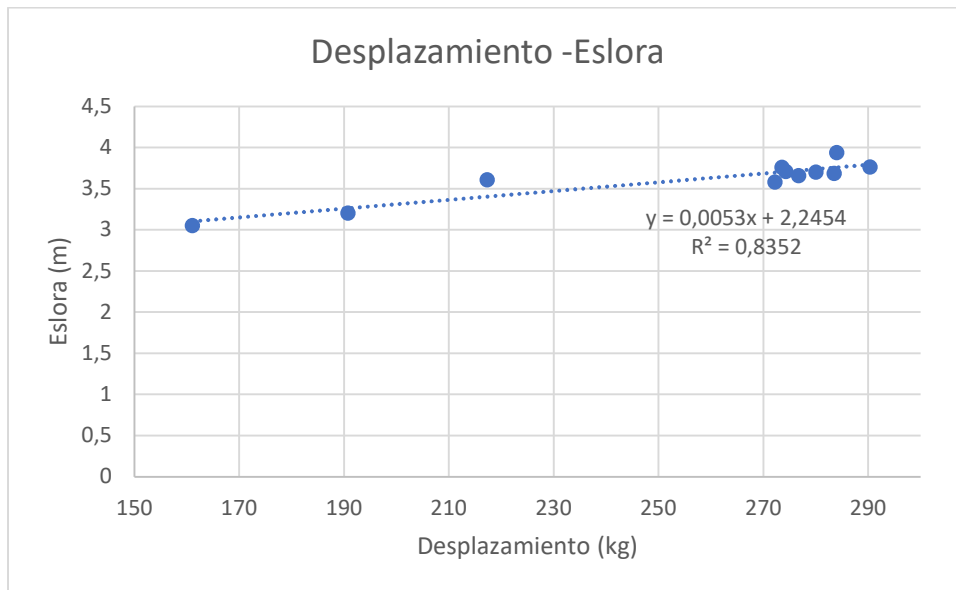


Imagen 55: Gráfica desplazamiento-eslora

Mientras que para la relación desplazamiento-manga:

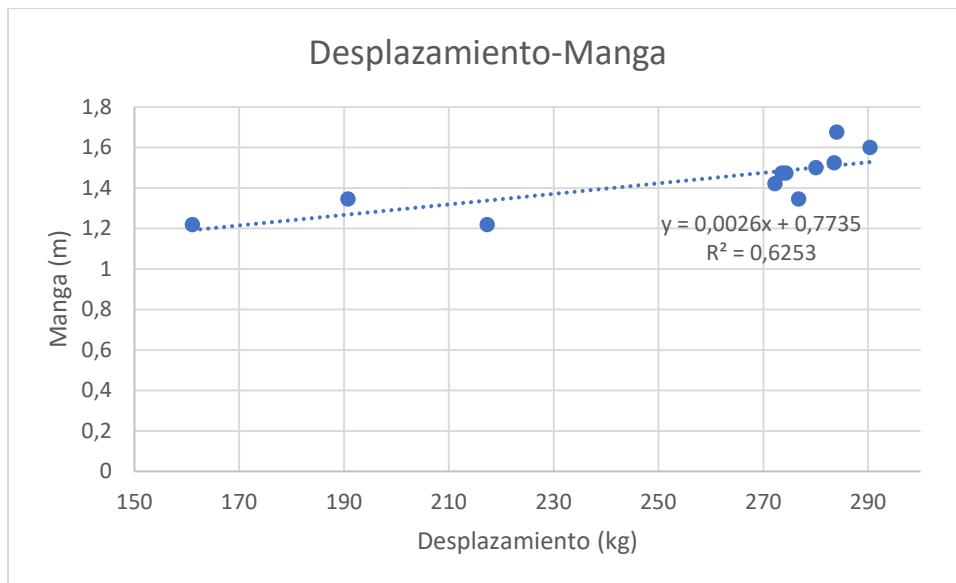


Imagen 56: Gráfica desplazamiento-manga

Y finalmente, la relación desplazamiento-puntal:

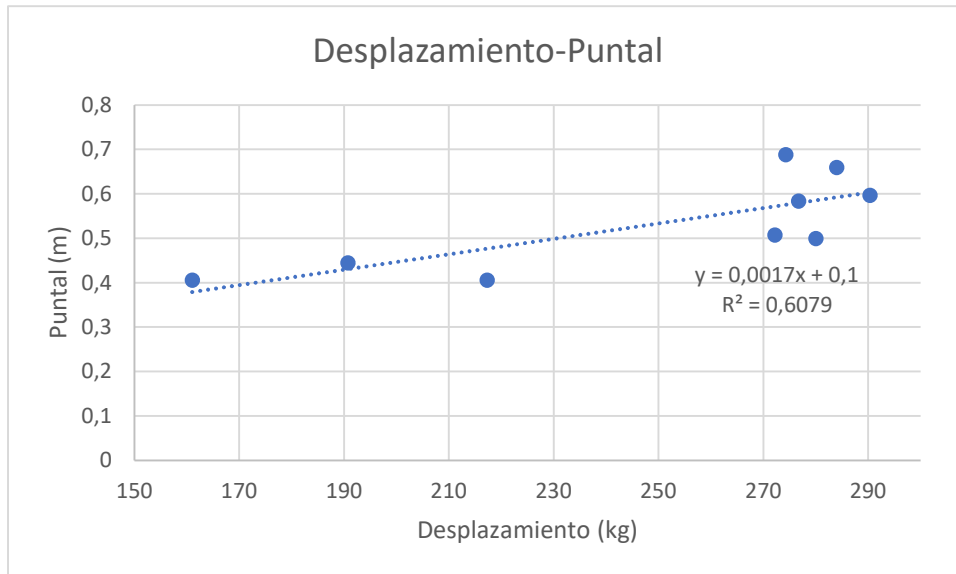


Imagen 57: Gráfica desplazamiento-puntal

### 6.2.3. Resultados

A partir de estas relaciones, se puede hacer un primer cálculo las dimensiones principales de la embarcación. Sin embargo, el desplazamiento de 210 kg estimado en apartados anteriores no es el correcto para introducir en las rectas de regresión. Esto se debe es necesario restar a este desplazamiento el peso correspondiente a los foils y mástiles ya que las embarcaciones de la base de datos no son hidroalas. Como el peso de mástiles y foils suele suponer el 10% del total (Faltinsen, 2005):

$$\Delta = 0,9 \times 210 = 189 \text{ kg}$$

Luego se obtendría:

<b>Desplazamiento -<math>\Delta</math> (kg)</b>	<b>189</b>
<b>Eslora - L (m)</b>	<b>3,247</b>
<b>Manga - B (m)</b>	<b>1,265</b>
<b>Puntal - D (m)</b>	<b>0,421</b>

Tabla 41: Dimensiones generales de la embarcación

### 6.3. Formas de la embarcación

La definición de las formas se realiza en paralelo a la definición de las dimensiones principales durante la fase de dimensionamiento. Por lo general, se pueden desarrollar las formas de una embarcación:

- Utilizando un buque existente como base para extrapolar las formas del buque del buque proyecto
- Generando unas formas propias que cumplan los requisitos objetivo del proyecto y probar estas formas en un canal de experiencias hidrodinámicas
- Generando las formas a partir de una serie sistemática desarrollado por un canal de experiencias o un astillero

La elaboración de la base de datos se realiza con buques similares no sólo por las dimensiones de la embarcación, sino además para facilitar la obtención de unas formas adecuadas para la embarcación proyectada.

### 6.3.1. Justificación de las formas de la embarcación

De manera lógica, dependiendo de la función futura de la embarcación las formas idóneas de esta serán unas u otras. Por ejemplo, debido a que la embarcación del presente trabajo estará sumergida siempre que la velocidad sea menor de 6 nudos, es decir, a bajas velocidades y número de Froude, la resistencia por formación de olas será baja mientras que, comparativamente la resistencia viscosa será alta. Esto hará que sea favorable buscar relaciones L/B relativamente bajas para disminuir la resistencia viscosa.

Para el diseño de esta embarcación también es conveniente un coeficiente de bloque bajo que implique menor resistencia al avance y permita que la embarcación despegue con relativa facilidad empleando un motor eléctrico. Este coeficiente además deberá ser el adecuado para el número de Froude de la embarcación. Un coeficiente de bloque bajo también se traduce en que la superficie mojada alcanzará un mínimo para relaciones B/T relativamente altas.

Otro parámetro a tener en cuenta para definir las formas será el coeficiente prismático. Aumentar el coeficiente prismático se traduce en llenar las formas del barco y por tanto aumentar la resistencia viscosa. Además, a velocidades bajas como va a ser nuestro caso, aumentar el coeficiente prismático manteniendo el desplazamiento supone un aumento de la resistencia por formación de olas.

En cuanto al diseño de la proa de la embarcación, se recomienda unas formas en V cuando el número de Froude relativo a la eslora sea mayor de 0,25 como es este caso. La proa será lanzada ya que por lo general favorece a embarcaciones con bajo coeficiente prismático.

Como la velocidad en la condición previa al despegue va a ser muy baja, en la sección central se puede disponer de unas formas en el fondo en forma de V muy abierta siendo casi totalmente plano. Como es lógico, esto se traduce en una astilla muerta reducida. Esta será la forma de la embarcación hasta la zona de popa, siendo el propósito de esto intentar minimizar la incidencia de torbellinos y los problemas de configuración de estela. La popa será de espejo debido a que puede reducir la resistencia al avance e implica sobre todo una mayor facilidad constructiva.

### 6.3.2. Definición de la embarcación en Maxsurf

A partir de las dimensiones estimadas mediante las regresiones del anterior apartado se puede definir la embarcación con el software Maxsurf<sup>5</sup>. Desde el inicio de Maxsurf Modeler, se generan las formas de la embarcación utilizando eslora, manga y puntal usando el tipo de embarcación “Hard Chined Hull”. Este tipo de embarcación posee el casco que mejor se adapta a las necesidades de la embarcación, poseyendo las características descritas anteriormente. A continuación, se define el calado correspondiente al desplazamiento utilizando los comandos del programa. Este calado sí que ha de definirse en base al peso total de la embarcación, peso de foils incluidos.

Se obtienen por tanto las siguientes características principales:

---

<sup>5</sup> <https://www.bentley.com/es/products/brands/maxsurf>

<b>Eslora (m)</b>	3,247
<b>Manga (m)</b>	1,265
<b>Calado (m)</b>	0,129
<b>Puntal (m)</b>	0,421
<b>Desplazamiento (kg)</b>	210

Tabla 42: Características generales de la embarcación

Las siguientes características hidrostáticas:

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	0,2091	t
2	Volume (displaced)	0,204	m <sup>3</sup>
3	Draft Amidships	0,129	m
4	Immersed depth	0,129	m
5	WL Length	2,783	m
6	Beam max extents on WL	1,190	m
7	Wetted Area	2,831	m <sup>2</sup>
8	Max sect. area	0,096	m <sup>2</sup>
9	Waterpl. Area	2,671	m <sup>2</sup>
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,760	
11	Block coeff. (Cb)	0,478	
12	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,628	
13	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,807	
14	LCB length	1,100	from zero pt. (+ve fwd)
15	LCF length	1,155	from zero pt. (+ve fwd)
16	LCB %	39,520	from zero pt. (+ve fwd)
17	LCF %	41,491	from zero pt. (+ve fwd)
18	KB	0,082	m
19	KG fluid	0,000	m
20	BMt	1,318	m
21	BML	6,358	m
22	GMt corrected	1,399	m
23	GML	6,440	m
24	KMt	1,399	m
25	KML	6,440	m
26	Immersion (TPc)	0,027	tonne/cm
27	MTc	0,005	tonne.m
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	0,005	tonne.m
29	Length:Beam ratio	2,339	
30	Beam:Draft ratio	9,223	
31	Length:Vol <sup>0.333</sup> ratio	4,727	
32	Precision	Medium	60 stations

Imagen 58: Características hidrostáticas de la embarcación definida.

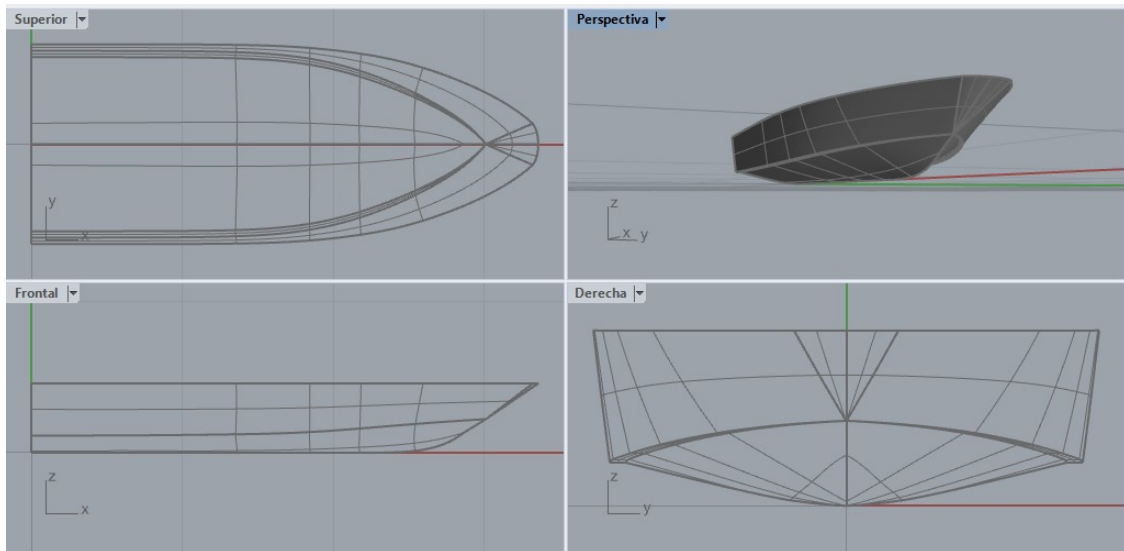


Imagen 59: Embarcación generada de diferentes vistas.

El plano de formas obtenido para esta embarcación se encuentra en el apartado b) del ANEXO V.

#### 6.4. Disposición general

La realización de la disposición general es de nuevo un proceso iterativo que se tiene que llevar a cabo ya desde las primeras fases del proyecto. Ya desde la estimación de las dimensiones principales se tiene una idea general de cuáles son los espacios y de cómo van a ir distribuidos. En iteraciones del proyecto posteriores, según se define la configuración estructural, esta disposición también se va perfilando paralelamente.

Existen infinidad de disposiciones generales diferentes, tantas como tipos de embarcaciones. Para el proceso de dimensionamiento, es también vital analizar la disposición general de embarcaciones similares o de algún buque de referencia concreto.

##### 6.4.1. Definición y distribución de espacios

La primera definición de los espacios de la embarcación es bastante sencilla. Esta descripción es de carácter orientativo para determinar posteriormente el peso de la embarcación y una definición más exacta. La embarcación deberá contar con los siguientes espacios:

- Una zona de mando para el usuario de la embarcación. Esta estará centrada sobre crujía y a popa de la cuaderna maestra. Constará de un asiento para el usuario y de la consola de mando, la cual dispondrá de todo lo necesario para la navegación.
- Un compartimento estanco para almacenar las baterías. Este compartimento se situará a proa de la embarcación, colocando las baterías a ambos lados del plano de crujía de manera que se mantenga el centro de gravedad del peso en rosca sobre el plano de crujía. Además, esta posición de las baterías ayuda a mantener un buen equilibrio durante la navegación sobre los foils. De esta manera la embarcación se asemeja al hidroala de la empresa sueca Candela Boats.



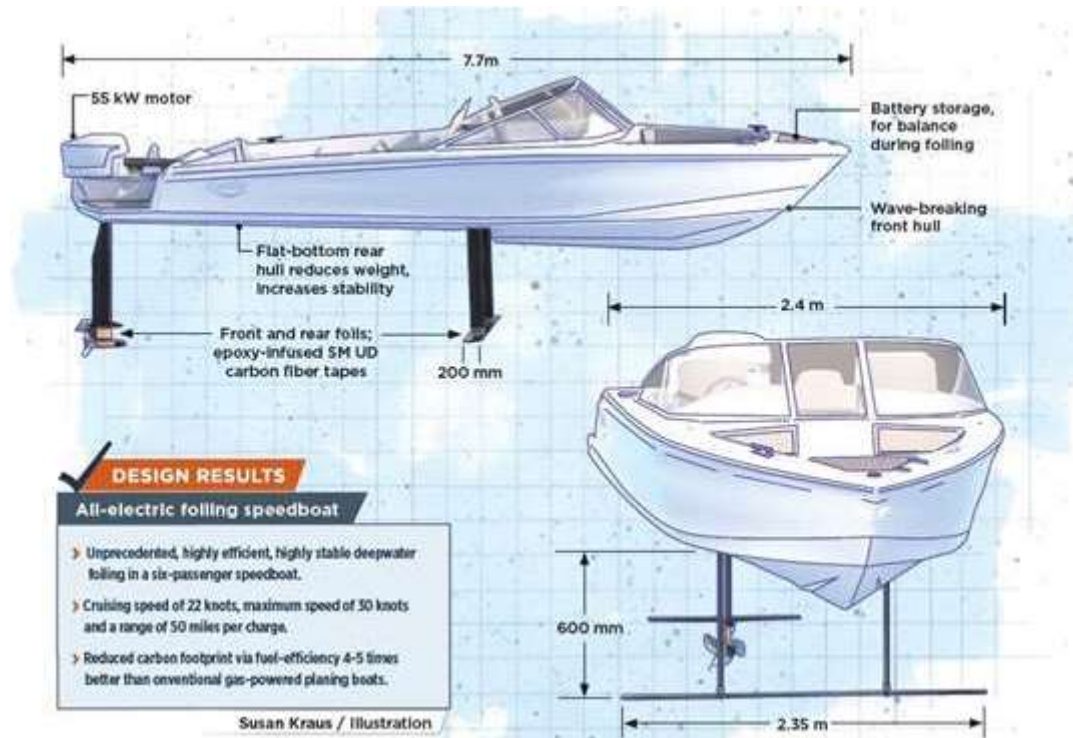


Imagen 60: Disposición general de distintos equipos en el hidroala eléctrico de Candela Boats

La embarcación no contará con ningún compartimento para el motor, debido a que este será fueraborda. De esta manera, se podría definir en un primer bosquejo la representación en planta, perfil y alzado de la disposición general. Este bosquejo se encuentra en el apartado c) del ANEXO V. En esta primera disposición, el punto A corresponde a la posición del motor fueraborda, mientras que B es la localización del asiento y de la zona de mando. C corresponde a las baterías, colocadas en un compartimento estanco separado por un mamparo.

## 7. CÁLCULO DEL SISTEMA PROPULSIVO

### 7.1. Introducción

Para el cálculo del sistema propulsivo y la posterior elección de motor y baterías habrá que volver a diferenciar entre las condiciones de despegue y crucero debido a lo singular de la embarcación. Una vez estimada la potencia necesaria para ambas condiciones de navegación, se procederá a la búsqueda de un motor eléctrico adecuado y a la selección de unas baterías que aporten una autonomía suficiente sin un peso excesivo.

### 7.2. Cálculo de la resistencia al avance producida por el casco

Para realizar el cálculo de la potencia propulsora requerida habrá que estudiar la resistencia que ofrece el casco a 6 nudos, es decir, en la condición de despegue de la embarcación. Esta resistencia, será posteriormente añadida a la producida por los mástiles y foils para calcular la potencia total requerida. Para este fin, se calculará la resistencia utilizando el método de Savitsky en una hoja de cálculo propia y a través del software Maxsurf resistance.

El método de Savitsky o Marcier-Savitsky (Savitsky and Brown, 1976) desarrollado entre la década de los años 60 y 70 del siglo pasado es un método numérico que permite estimar la resistencia al avance de pequeñas embarcaciones como la del presente trabajo, ya sea en régimen de planeo o de preplaneo. En este método, el régimen de preplaneo se caracteriza porque el número de Froude referido al volumen de la embarcación ( $F_{nV}$ ) es menor a 2 y porque la longitud mojada de la quilla ( $\lambda_K$ ) es mayor al cociente formado entre la eslora de flotación ( $L_{WL}$ ) y la eslora máxima entre codillos ( $B_{PX}$ ). Presumiblemente, este será el régimen de funcionamiento en el que se encontrará la embarcación debido a su baja velocidad en la condición de despegue.

#### 7.2.1. Método de Savitsky

El primer paso consiste en constatar que definitivamente la embarcación se va a encontrar en régimen de preplaneo. Para ello se dispone de los siguientes datos referentes a la embarcación generada por Maxsurf:

	Item	Value	Units
1	LWL	2,783	m
2	Beam	1,19	m
3	Draft	0,129	m
4	Displaced volume	0,204	m <sup>3</sup>
5	Wetted area	2,919	m <sup>2</sup>
6	Prismatic coeff. (Cp)	0,761	
7	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,807	
8	1/2 angle of entrance	31,4	deg.
9	LCG from midships(+ve for'd)	-0,292	m
10	Transom area	0,096	m <sup>2</sup>
11	Transom wl beam	1,19	m
12	Transom draft	0,129	m
13	Max sectional area	0,096	m <sup>2</sup>
14	Bulb transverse area	0	m <sup>2</sup>
15	Bulb height from keel	0	m
16	Draft at FP	0,129	m
17	Deadrise at 50% LWL	12,7	deg.
18	Hard chine or Round bilge	Round bilge	
19			
20	Frontal Area	0	m <sup>2</sup>
21	Headwind	0	kn
22	Drag Coefficient	0	
23	Air density	0,001	tonne/
24	Appendage Area	0	m <sup>2</sup>
25	Nominal App. length	0	m
26	Appendage Factor	1	

Imagen 61: Parámetros principales de la embarcación para la estimación de potencia por el método de Savitsky

El número de Froude referido al volumen de la embarcación se define de la siguiente manera:

$$Fn_{\nabla} = \frac{V}{\sqrt{g\nabla^3}} \quad (19)$$

siendo  $\nabla$  el volumen de carena. Mientras, la longitud mojada de la quilla se puede definir mediante la siguiente expresión:

$$\lambda_K = \lambda - 0,03 + \frac{(0,57 + \frac{\beta}{1000})(\frac{\tan \beta}{2 \tan \tau} - \frac{\beta}{137})}{2} \quad (20)$$

donde  $\beta$  es el ángulo de astilla muerta,  $\tau$  es el ángulo de trimado y  $\lambda$  es el ratio eslora-manga mojada medio. Tanto  $\tau$  como  $\lambda$  se obtienen utilizando la siguiente tabla:

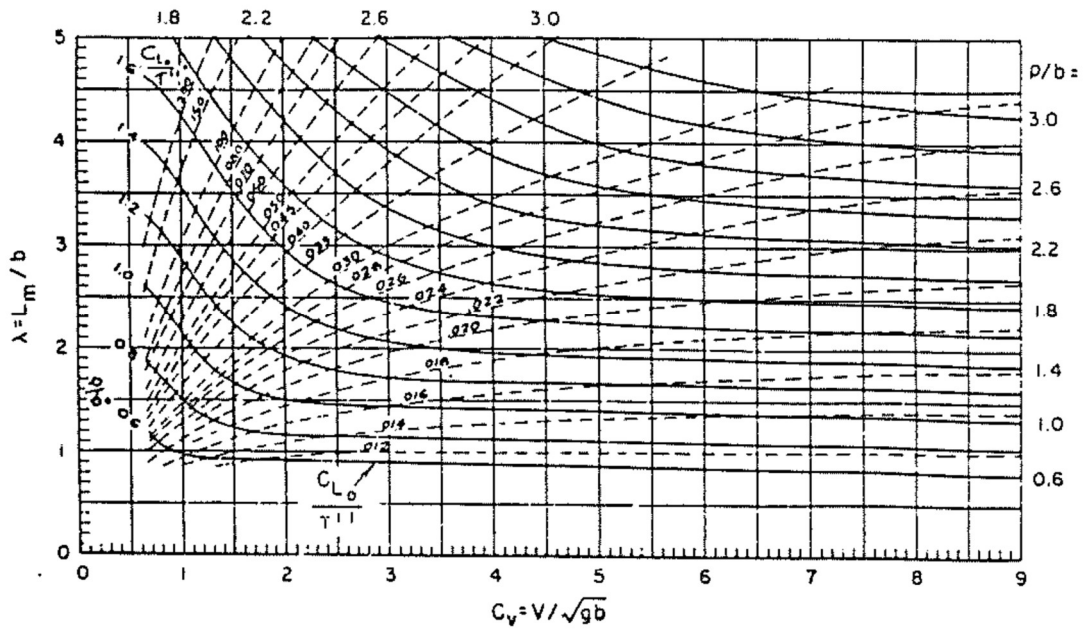


Imagen 62: Gráfico utilizado para situar la embarcación en la zona de planeo o preplaneo (Savitsky and Brown, 1976)

De esta manera se llega los siguientes resultados:

$F_n \nabla$	1,3
$\lambda_k$	2,6
$L_{wl}/B_{px}$	2,3

Tabla 43: Resultados para verificar la condición de navegación

Luego efectivamente la embarcación se encuentra en régimen de preplaneo durante el despegue. Para realizar el cálculo de la resistencia en régimen de preplaneo se utilizan los siguientes coeficientes:

$$X = \frac{1}{L_{WL} \sqrt[3]{\nabla}} \quad (21)$$

$$Z = \frac{\nabla}{B_{Px}^3} \quad (22)$$

$$U = \sqrt{2i_e} \quad (23)$$

$$W = \frac{A_T}{A_X} \quad (24)$$

donde  $i_e$  es el semiángulo de entrada en la flotación,  $A_T$  el área del espejo de popa y  $A_X$  el área de la sección maestra. Con estos coeficientes se procede a calcular la siguiente ecuación referida a un buque base de 100000 libras (45360 kg):

$$\left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{\Delta_0} = A_1 + A_2X + A_4U + A_5W + A_6XZ + A_7XU + A_8XW + A_9ZU + A_{10}ZW + A_{15}W^2 + A_{18}XW^2 + A_{19}ZX^2 + A_{24}UW^2 + A_{27}WU^2. \quad (25)$$

Los valores de los coeficientes  $A_{ij}$  vienen dados en función del número de Froude relativo al volumen de carena. A partir de este resultado, se puede calcular la resistencia total de nuestra embarcación empleando una serie de correcciones:

$$\left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{\Delta} = \left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{\Delta_0} + \frac{(C'_F + C_A - C_{F0}) S F n_{\nabla}^2}{2\nabla^{\frac{2}{3}}} \quad (26)$$

donde  $S$  es la superficie mojada de la embarcación,  $C'_F$  el coeficiente de resistencia de fricción de la embarcación a calcular y  $C_{F0}$  el coeficiente de resistencia a la fricción referido al buque base de 100000 libras. El coeficiente de fricción viene definido en el presente trabajo por la fórmula de la ITTC-57:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (27)$$

siendo el número de Reynolds empleado para calcular  $C_{F0}$  el siguiente:

$$Rn = \frac{F n_{\nabla} \frac{L_{WL}}{1} \sqrt{32,2 \times \frac{100000}{64}}}{1,2817 \times 10^{-5}}. \quad (28)$$

Finalmente, los resultados obtenidos para 6 nudos mediante este método son:

Resistencia total (N)	Potencia (W)
198,6	613,02

Tabla 44: Resultados propios de resistencia y potencia

Estos resultados se pueden consultar con más detalle en el ANEXO III.

### 7.2.2. Método de Savitsky mediante Maxsurf Resistance

Utilizando el Maxsurf Resistance se obtiene el siguiente resultado para el momento del despegue:

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Savitsky Pre-planing Resist. (N)	Savitsky Pre-planing Power (W)	Savitsky Planing Resist. (N)	Savitsky Planing Power (W)
1	6,000	0,591	1,285	202,05	623,66	--	--

Imagen 63: Estimación de la potencia mediante el método de Savitsky a través de Maxsurf Resistance

### 7.2.3. Análisis de resultados

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos en la hoja de cálculo propia y a través de Maxsurf son muy similares. Esta similitud invita a pensar que los resultados son lo suficientemente fiables como para trabajar con ellos. Sin embargo, para siguientes apartados se opta por utilizar los resultados obtenidos por Maxsurf Resistance debido a que estos son ligeramente superiores.

### 7.3. Cálculo de la potencia total

Una vez calculada la resistencia que ofrece el casco, podemos calcular la resistencia total de toda la embarcación, así como la potencia a instalar. Para ello, hay que apoyarse en los resultados que han arrojado tanto los mástiles como los foils en apartados anteriores para las condiciones de despegue y de crucero.

#### 7.3.1. Condición de despegue

Para calcular la potencia en la condición de despegue se asumirá que los mástiles van completamente sumergidos. Por lo tanto, la resistencia que estos ofrecen será la misma que la empleada durante el análisis de la viabilidad estructural del conjunto mástil-foil en la condición más desfavorable durante el despegue. Con el resto de datos ya obtenidos en anteriores apartados se tiene que:

Res. Foil Pr. (N)	Res. Foil Pp. (N)	Res. Mástil Pr.(N)	Res. Mástiles Pp. (N)	Res. Casco (N)
35,6	138,3	3,4	6,9	202,1

Tabla 45: Distintas componentes de la resistencia para la condición de despegue

Lo que se traduce en los siguientes resultados:

CONDICIÓN DE DESPEGUE	
Res. Total (N)	Potencia (kW)
386,3	1,2

Tabla 46: Resistencia total a vencer y potencia necesaria para la condición de despegue

#### 7.3.2. Condición de crucero

Para calcular la potencia en la condición de crucero se analizará la potencia necesaria para navegar a las mismas profundidades que las ensayadas durante el apartado del cálculo de la viabilidad estructural. Como es lógico, en esta condición de navegación el casco no ofrece ninguna resistencia al avance. Con el resto de datos obtenidos en anteriores apartados tenemos que:

Profundidad (m)	Res. Foil Pr. (N)	Res. Foil Pp. (N)	Res. Mástil Pr.(N)	Res. Mástiles Pp. (N)
0,15	33,7	124,8	4,5	9,1
0,3	33,7	124,8	9,1	18,1
0,45	33,7	124,8	13,6	27,2
0,6	33,7	124,8	18,1	36,3

Tabla 47: Distintas componentes de la resistencia para la condición de crucero

Lo que a su vez se traduce en los siguientes resultados:

Profundidad (m)	CONDICIÓN DE CRUCERO	
	Res. Total (N)	Potencia (kW)
0,15	172,1	1,8
0,3	185,7	1,9
0,45	199,3	2,1
0,6	212,9	2,2

Tabla 48: Resistencia total a vencer y potencia necesaria para la condición de crucero

#### 7.4. Selección del motor y de las baterías

Para la selección del motor se opta por un motor fueraborda se opta finalmente por un motor eléctrico de la compañía Krätzler Elektromaschinen. Este motor cuenta con las siguientes especificaciones:

Modelo	ACAV 2,0 Pi
Potencia consumida (kW)	2,6
Potencia de salida (kW)	2
Voltaje (V)	12
Intensidad (A)	107
Eficiencia (%)	78
Peso (kg)	33
Longitud máxima del eje (m)	1

Tabla 49: Características principales del motor seleccionado

Este motor cuenta con control remoto de velocidad y con la posibilidad de navegar hacia atrás. La disposición del motor y sus componentes sería la siguiente:

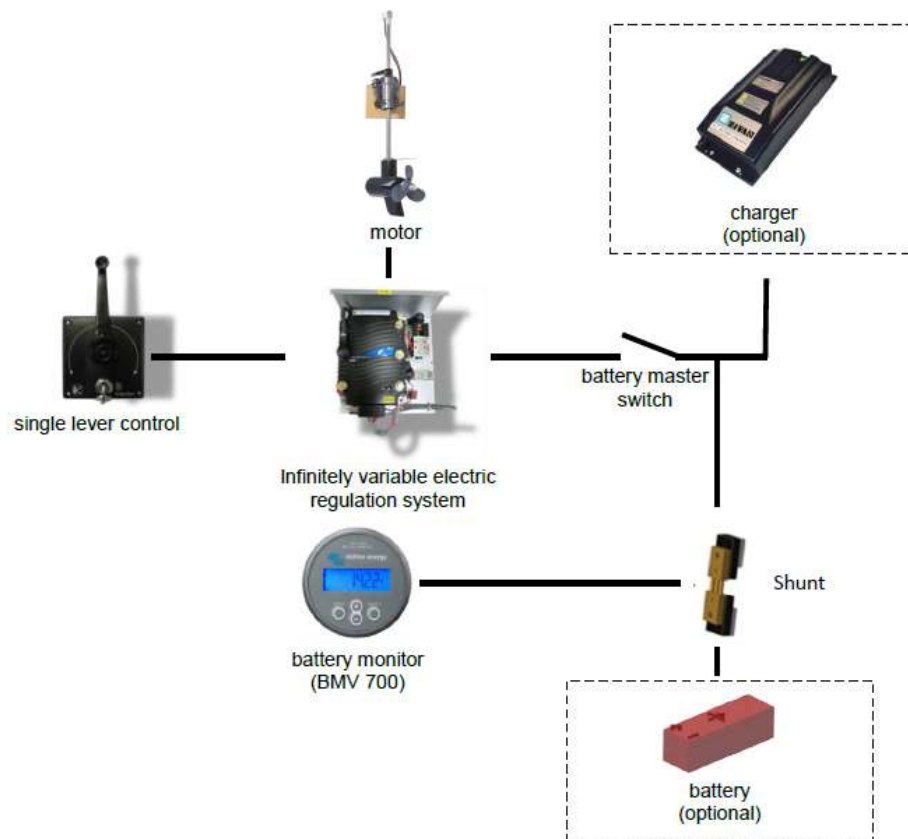


Imagen 64: Disposición de motor y baterías a bordo según Krätzler Elektromaschinen

La selección de este motor implica que se escoja una profundidad de los foils de 15 cm para la condición de crucero ya que no resultaría lógico tener al motor trabajando al 100% de su capacidad.



A la hora de seleccionar las baterías hay que tener en cuenta la autonomía que proporcionarán trabajando con el motor seleccionado. La autonomía mínima de una batería se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$Autonomía(horas) = \frac{Voltaje(V) \times Amperaje\ Batería(Ah)}{Potencia\ Motor\ (W)} \quad (29)$$

Para este caso concreto, se seleccionará finalmente dos baterías de ion litio ya que las de GEL o AGM que necesitaríamos serían demasiado pesadas. De esta manera se escogerán dos baterías de la compañía RELION:

<b>Modelo</b>	RB200
<b>Voltaje (V)</b>	12
<b>Amperaje (Ah)</b>	200
<b>Dimensiones (mm)</b>	520x267x228
<b>Peso (kg)</b>	27,7

Tabla 50: Características principales de las baterías seleccionadas

Al ser 2 baterías y contando con que el motor trabajará al 90% de su capacidad para la condición de crucero, esto se traduce en la siguiente autonomía mínima:

$$Autonomía = \frac{2 \times 12 \times 200}{0,9 \times 2600} = 2,05 \text{ horas} = \mathbf{2 \text{ horas y } 3 \text{ minutos}}$$

Esto en distancia se traduciría en **75,9 kilómetros** o lo que es lo mismo, **41 millas náuticas**.

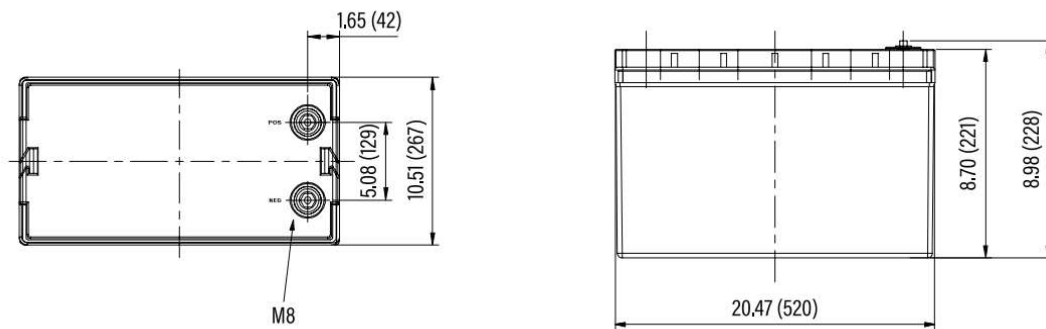


Imagen 65: Dimensiones de una batería Relion RB200



## 8. ESCANTILLONADO DE LA EMBARCACIÓN

### 8.1. Introducción

En el presente apartado se procederá al escantillonado de la embarcación mediante el empleo de la norma UNE-ISO 12215: construcción de cascos y escantillones, utilizando las partes 12215-5 y 12215-6 respectivamente. La 12215-5 es la referente al cálculo de presiones de diseño, tensiones de diseño y determinación de escantillón, y es por tanto la parte que más se va a emplear. Por otro lado, la 12215-6 permite definir los dispositivos estructurales y detalles de construcción. Además del empleo de estas normas, se definirán los materiales de uso y otros datos de interés para el correcto escantillonado de la embarcación.

### 8.2. Materiales

El primer paso para el escantillonado de la embarcación es definir los materiales que se van a utilizar. Al igual que para foils y mástiles, se procederá construir la embarcación con materiales compuestos, pero esta vez para el laminado no se empleará de fibra de carbono. A continuación, se definen los distintos materiales que se van a utilizar, así como el porqué de su elección.

#### 8.2.1. Matriz

La matriz que se empleará para construir la embarcación será de tipo polimérica termoestable ya que es la más empleada en el sector naval. Esto se debe a que no necesitan grandes inversiones en moldes y en control de la temperatura, puesto que la mayor parte de las resinas se procesan a temperatura ambiente. Los moldes utilizados son sencillos y las propiedades físicas y mecánicas obtenidas son más que satisfactorias. Además, el precio razonable de la materia prima y tampoco se requiere de una mano de obra de alta cualificación.

En cuanto a la resina que llevará la matriz, la elección final se escoge entre las resinas de poliéster, resinas de viniléster y resinas epoxi. Las resinas de poliéster son las más utilizadas mundialmente, constituyendo el 90% del total de las matrices termoestables. Gracias a ellas se obtienen sistemas sencillos y económicos presentando facilidad de uso y buena resistencia química. Por todo ello son las resinas más utilizadas en la construcción de embarcaciones en serie, especialmente en cascos, cubiertas y superestructuras entre otros.

De mejores propiedades mecánicas, químicas y térmicas que las resinas de poliéster, las resinas de viniléster se las puede considerar intermedias entre las resinas de poliéster y las de epoxi. Cuentan con la desventaja de ser entre 1,5 y 2 veces más caras que las resinas de poliéster. En la industria naval se utilizan fundamentalmente en la construcción de cascos de embarcaciones o piezas sumergidas la mayor parte del tiempo. También se pueden emplear en combinación con resinas de poliéster en las primeras capas de laminado para evitar osmosis, así como en la fabricación de depósitos, tanques, tuberías y otras piezas que necesiten una alta resistencia química.

Finalmente, las resinas epoxi poseen las mejores propiedades mecánicas, mayor resistencia térmica y buena resistencia a la abrasión. Además, su baja absorción de agua las hace ideales para la construcción de estructuras marinas. Cuentan como mayores inconvenientes su alto precio y su alta viscosidad. Existen distintos tipos de resinas epoxi en el mercado en función de nuestras necesidades y de las técnicas a utilizar. Se suelen

utilizar en embarcaciones que necesiten la máxima resistencia con el mínimo peso, como es el caso de embarcaciones de regata o de alta velocidad.

Como la embarcación del presente trabajo no está pensada para ser diseñada en serie y se busca minimizar el peso del casco lo máximo posible para un mejor uso del sistema propulsivo eléctrico, se opta por el empleo de una resina del tipo epoxi.

### 8.2.2. Refuerzo

Como refuerzo del material compuesto se opta por la fibra de vidrio tipo E (Eléctrico). Este tipo de fibra fue pensada en un inicio para aplicaciones eléctricas, pero en la actualidad también se caracteriza por su extendido uso en la construcción naval. Es básicamente un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio con un contenido muy bajo o nulo de potasio y sodio. La fibra de vidrio destaca por su excelente relación resistencia/precio, siendo su mayor limitación su bajo módulo elástico en comparación con otras fibras como la fibra de vidrio tipo S. Se pueden definir sus principales propiedades en la siguiente tabla:

<b>Densidad <math>\rho</math></b>	2550-2600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Young E</b>	72-85 GPa
<b>Coefficiente de Poisson <math>\nu_s</math></b>	0,21-0,23
<b>Límite elástico <math>\sigma_e</math></b>	1,8-1,85 GPa
<b>Tensión de rotura <math>\sigma_r</math></b>	1,95-2,05 GPa
<b>Precio</b>	1,53-3,07 euros/kg

Tabla 51: Propiedades principales de la fibra de vidrio E

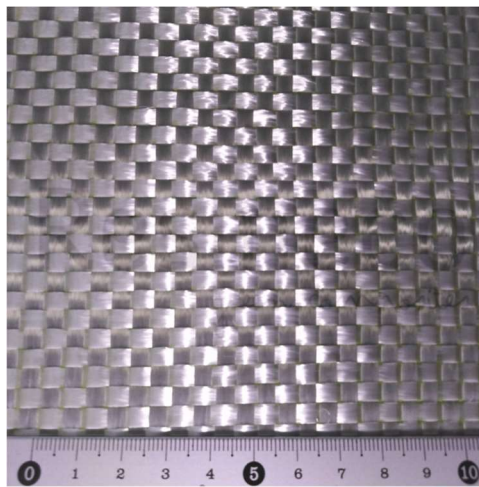
Otros aspectos que caracterizan la fibra de vidrio tipo E son su gran resistencia a la humedad, también a la producida en ambientes marinos, y a su excelente resistencia a la radiación ultravioleta producida por el sol.

En cuanto a las estructuras textiles de las que dispondrá el laminado, se alternarán distintas capas de fieltros (mat) y tejidos (roving). Los fieltros son estructuras textiles de fibras de refuerzo que no poseen una orientación preferente, con una distribución intercalada y aleatoria. Para mantener unidas las fibras antes de la impregnación se les aplica un tipo de ligante en función del tipo de ligante a utilizar, en este caso resina epoxi. Pueden estar formados por fibras continuas o por fibras cortas de una longitud entre 40 y 50 mm. Los fieltros se consideran estructuras textiles isotrópicas bidimensionales, con valores no muy elevados de resistencia y rigidez, utilizándose para mejorar la adherencia interlaminar entre capas de laminado sucesivas. Los gramajes típicos que se encuentran en el mercado son de 100, 200, 300, 450 y 600 gr/m<sup>2</sup>. En el presente trabajo se empleará un gramaje de 200 gr/m<sup>2</sup>.



*Imagen 66: Fieltro de fibra de vidrio*

Los tejidos en cambio son estructuras textiles formadas por fibras que se cruzan perpendicularmente, denominadas trama (hilos en sentido longitudinal) y urdimbre (hilos en sentido perpendicular), dando lugar a los puntos de entrecruzamiento denominados ligamentos. En un tejido, las direcciones de máxima resistencia coinciden con las direcciones de la trama y la urdimbre. Los tejidos se pueden subdividir en tela, sarga, satén y raso, siendo la tela el tipo de tejido más sencillo y utilizado y por tanto el que se va a emplear en la presente embarcación. Gramajes de 300, 500 y 800 gr/m<sup>2</sup> son típicos para este tipo de estructura textil. En el presente trabajo se empleará un gramaje de 300 gr/m<sup>2</sup>.



*Imagen 67:Tejido tipo tela de fibra de vidrio*

### 8.2.3. Recubrimientos

Los recubrimientos empleados en los procesos de laminado son el gelcoat y el topcoat. El gelcoat es la primera capa de resina que se aplica sobre el molde, formando la superficie que estará en contacto con el exterior. Esta capa de resina protege al material del ataque de la humedad y del medioambiente, proporcionando además una superficie más atractiva. Aporta además color, brillo, resistencia al calor, a la abrasión y permiten la ausencia total de porosidad superficial.

Por otro lado, el topcoat es la capa última del laminado que se aplica para proteger a este de la humedad. El topcoat es un producto similar al gelcoat pero con una pequeña cantidad

de parafina. Durante el proceso de curado, esta parafina se difunde hacia el exterior creando una película protectora. Los topcoats también ejercen como compensadores del laminado, compensando en la cara rugosa la utilización de gelcoat en la capa buena. Si se realiza algún laminado sobre una superficie protegida con topcoat, hay que eliminar la película de parafina por medio de abrasivos para poder garantizar una buena adhesión al laminado base.

#### 8.2.4. Materiales del núcleo

Para la construcción de grandes superficies de interiores de barcos, cascos de barcos y yates y otras muchas aplicaciones, la baja rigidez a flexión que presentan los laminados de fibra de vidrio es un problema. Una solución a este problema es optar por las estructuras tipo sándwich. Se denomina estructura sándwich a aquella formada por dos pieles o láminas delgadas exteriores, no necesariamente del mismo espesor y material, que encierran un núcleo de mayor espesor y baja densidad íntimamente unidos entre sí, generalmente por una capa de adhesivo capaz de transmitir las cargas axiales y las de cortadura hacia y desde el núcleo y que hace que el material compuesto se comporte como una estructura continua.

Existen diversos materiales con los que hacer los núcleos de estas estructuras. Desde maderas como la de balsa, el cedro rojo o el contrachapado marino hasta espumas sintéticas. En este caso se empleará espuma de cloruro de polivinilo (PVC). La espuma PVC es un material de altas prestaciones, utilizada especialmente en aplicaciones marinas y comercializada en paneles prefabricados. Estas espumas se clasifican en función de la densidad con valores entre 40 y 210 kg/m<sup>3</sup> y también en función de la estabilidad térmica.

Las espumas de PVC presentan buena resistencia mecánica, buena resistencia térmica, poseen buenas características como aislante acústico y tienen una alta resistencia a la penetración del agua, siendo además muy adaptables. Entre las espumas de PVC, podemos encontrarlas con estructura entrecruzada o lineal. Se pueden definir las principales propiedades de las siguientes espumas PVC:

<b>Estructura/densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	Lineal 80	Entrecruzada 75	Entrecruzada 80	Entrecruzada 96
<b>Resistencia al corte (MPa)</b>	1,17	-	1,00	1,5
<b>Módulo de corte (MPa)</b>	20	11	30	45
<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	1,38	1,21	1,79	2,48
<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	0,86	1,1	1,17	1,79

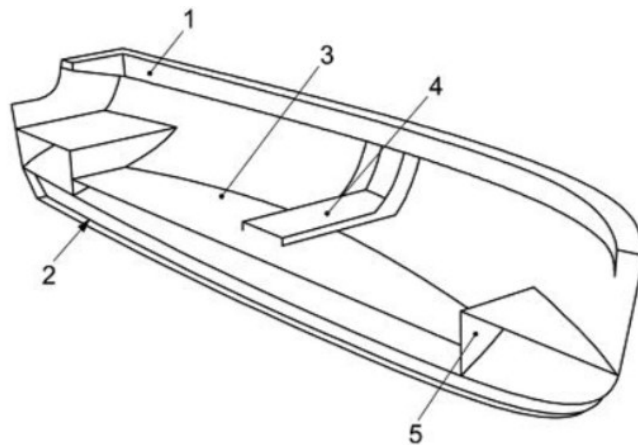
Tabla 52: Distintos tipos de espumas PVC (Arias Padilla, 2019)

#### 8.3. Disposición estructural de la embarcación

La embarcación no contará con una estructura longitudinal ni transversal. En cambio, como sucede para las embarcaciones más pequeñas (motorizadas y no motorizadas), no se contará con refuerzos específicos. Esto se debe a que componentes incluidos en la

embarcación que en principio no tenían un propósito inicial de ser refuerzos pueden actuar como tales, siendo necesario en alguna ocasión reforzar estos elementos. Entre estos elementos destacan las bancadas, los pañoles, o el suelo de la cabina y la regala. Todos estos elementos son de gran apoyo a los otros refuerzos naturales de la embarcación como pueden ser la quilla o los bordes de la cubierta.

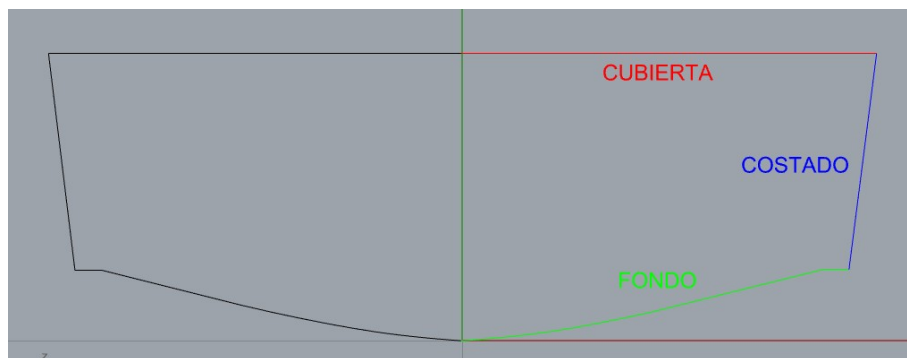
En el caso específico de la presente embarcación, estos refuerzos vendrían dados por la bancada en la que se dispondría el asiento del tripulante, así como el mamparo utilizado para el compartimento estanco a proa de la embarcación dirigido al almacenamiento de baterías. Todo eso complementaría a la quilla, a la roda y al codillo.



- Leyenda**
- 1 Tapa de regala
  - 2 Quilla
  - 3 Suelo estructural
  - 4 Bancada
  - 5 Varenga profunda

*Imagen 68: Disposición estructural típica de una pequeña embarcación según la ISO 12215-6*

En cuanto a los paneles, a la hora de definirlos se diferenciará entre paneles de cubierta, de costado y de fondo de la siguiente manera:



*Imagen 69: Diferenciación de los paneles según la zona*

Se procura que la división y distribución de los paneles sea lo más equitativa posible. De esta manera se intenta un reparto de las presiones lo más regular posible a lo largo de la embarcación. Los paneles que se han definido para el fondo son los siguientes:

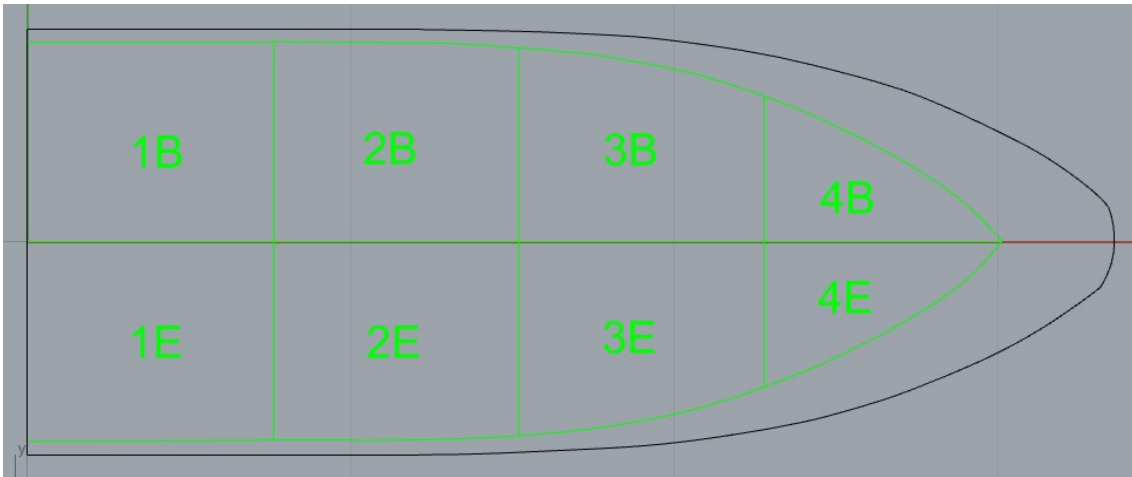


Imagen 70: Definición de paneles de fondo

Los paneles de costado son:

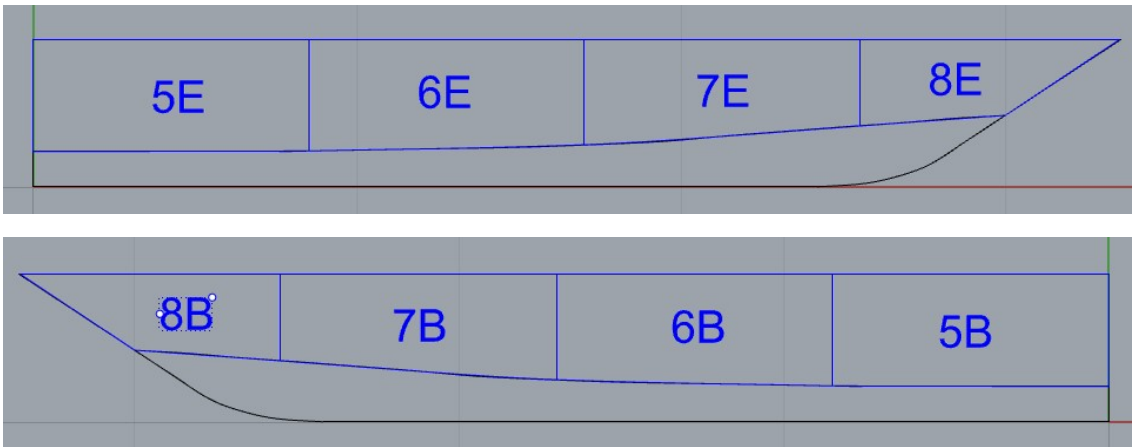


Imagen 71: Definición de paneles de costado

Y finalmente, los paneles de cubierta también quedan definidos:

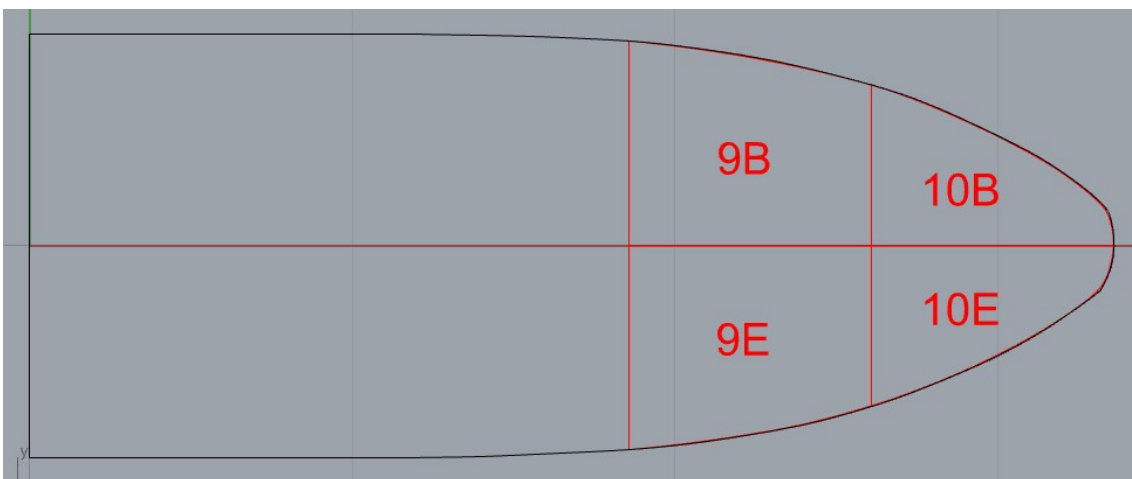


Imagen 72: Definición de paneles de cubierta

Siendo a popa de los paneles 9B y 9E donde se colocaría un mamparo estanco que permitiría definir el compartimento donde se alojan las baterías. Los paneles se definen

con su dimensión menor ( $b$ ) y su dimensión mayor ( $l$ ). Sin embargo, cuando no son rectangulares, estos paneles han de evaluarse mediante otros equivalentes que posean igual superficie y sí sean rectangulares.

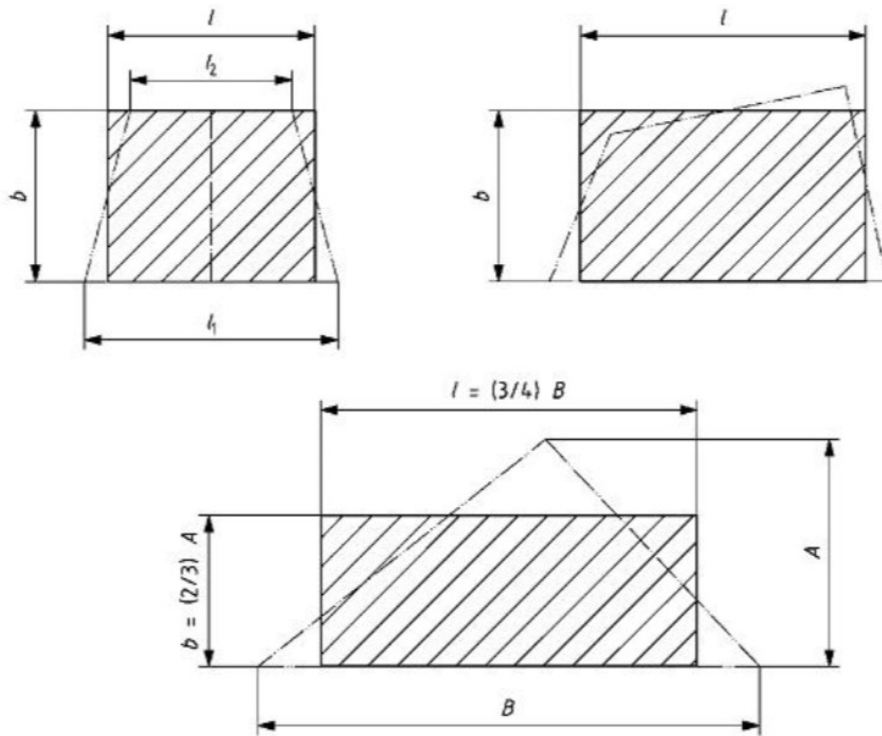


Imagen 73: Ejemplos de cómo crear paneles rectangulares equivalentes

#### 8.4. Cálculo del escantillonado

A partir de este punto se procede a aplicar las normativas ISO 12215-5 e ISO 12215-6 para el cálculo de paneles y refuerzos respectivamente. Esto se realizará mediante la utilización de hojas de cálculo propias. Los resultados obtenidos en este apartado se pueden consultar con más detalle en el ANEXO IV.

##### 8.4.1. Parámetros iniciales y ámbito de aplicación de la norma

En primer lugar, se observa que la norma nos indica una serie de parámetros o dimensiones principales a partir de los cuales se estiman el resto de coeficientes necesarios para el escantillonado. Estos parámetros son:

- **$m_{LDC}$** : masa de la embarcación a plena carga (kg)
- **$L_h$** : eslora de la embarcación (m)
- **$L_{wl}$** : eslora en la flotación, con la embarcación en condiciones de plena carga (m)
- **$B_c$** : manga en el pantoque, medida a  $0,4 L_{wl}$  a proa de su extremo de popa (m)
- **$\beta_{0,4}$** : semiángulo del diedro del fondo a  $0,4 L_{wl}$  a proa de su extremo de popa cuyo valor debe estar entre  $10$  y  $30^\circ$
- **$V$** : velocidad máxima en aguas tranquilas declarada por el constructor (nudos)



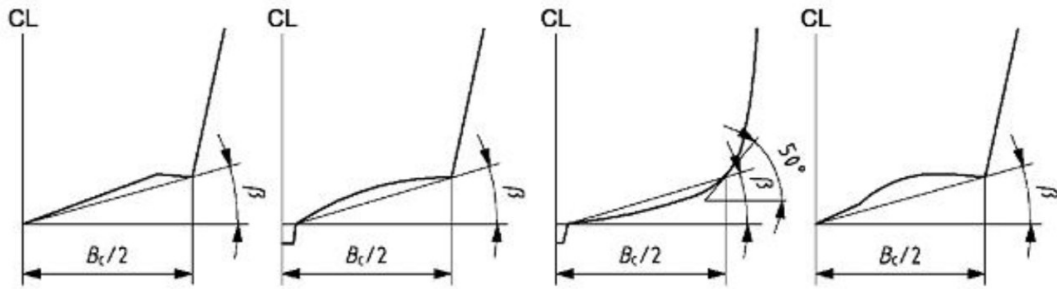


Imagen 74: Semiángulo del diedro del fondo según el tipo de embarcación, siendo la presente embarcación del primer tipo

En la presente embarcación todos estos parámetros son:

$m_{LDC}$ (kg)	L (m)	$L_{WL}$ (m)	$B_C$ (m)	$\beta_{0,4}$ (°)	V (nudos)
210	3,247	2,783	1,166	10,6	20

Tabla 53: Parámetros iniciales

Donde  $B_C$  y  $\beta_{0,4}$  han sido calculados mediante distintos comandos de Rhinoceros 3D utilizando el archivo creado en Maxsurf para definir la embarcación. Posteriormente, se tiene que comprobar que efectivamente la normativa seleccionada es la correcta para escantillonar la embarcación. En el primer punto de la norma ISO 12215-5 se especifica que la embarcación debe cumplir con una eslora situada entre 2,5 y 24 m así como una velocidad menor de 50 nudos. Ambos puntos se cumplen.

Por otro lado, la norma diferencia entre embarcaciones de planeo y de desplazamiento a la hora de realizar el escantillado. La embarcación se considera de planeo si cumple lo siguiente

$$\frac{V}{\sqrt{L_{wl}}} \geq 5. \quad (30)$$

El valor esta expresión es:

$$\frac{20 \times 0,51445}{\sqrt{2,859}} = 6,17$$

Por tanto, nos encontramos en la situación de planeo para esta condición. Finalmente, también es necesario que para las embarcaciones de motor se cumpla que:

$$V > 2,36\sqrt{L_{wl}}. \quad (31)$$

Expresión que se cumple ya que:

$$20 > 2,36\sqrt{2,783} = 3,94$$



#### 8.4.2. Factores de ajuste de presión

Para el cálculo de los paneles, hay que tener en cuenta los distintos ajustes de presión que se definen en la norma. En este caso se definen cinco parámetros:  $k_{DC}$ ,  $n_{CG}$ ,  $k_L$ ,  $k_{AR}$ ,  $k_Z$ .

##### 8.4.2.1. Factor de categoría de diseño $K_{DC}$

Este parámetro varía según la categoría de diseño de la embarcación. Las categorías de diseño se pueden dividir en:

- Categoría de diseño A (“alta mar”): en esta categoría se encuadran las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas por encima de 4 m y una velocidad del viento que puede superar la fuerza 8 de la escala Beaufort, con exclusión de las condiciones excepcionales como son los huracanes
- Categoría de diseño B (“aguas litorales”): en esta categoría se encuadran las embarcaciones apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas de hasta 4 m y una velocidad del viento con una fuerza igual o inferior a 8 en la escala Beaufort
- Categoría de diseño C (“en la proximidad de la costa”): en esta categoría se encuadran las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas de hasta 2 m y una velocidad característica estable del viento de una fuerza igual o inferior a 6 en la escala Beaufort
- Categoría de diseño D (“aguas abrigadas”): en esta categoría se encuadran a las embarcaciones consideradas apropiadas para operar en mares con una altura significativa de olas de hasta 0,3 m, con olas ocasionales de 0,5 m de altura y una velocidad característica estable del viento de una fuerza igual o inferior a 4 en la escala Beaufort. Debido a que la navegación con foils debe hacerse en el escenario que cuente con menos oleaje posible, esta será la categoría de diseño de la embarcación

Categoría de diseño	A	B	C	D
Valor de $k_{DC}$	1	0,8	0,6	0,4

Imagen 75: Valores de  $K_{DC}$  según la categoría de diseño

##### 8.4.2.2. Factor de carga dinámica $n_{CG}$

El factor de carga dinámica se considera que está próximo a la aceleración medida en la embarcación al nivel de su centro de gravedad, a la frecuencia adecuada según un cierto período de tiempo. Este valor se calcula utilizando las siguientes expresiones en el caso de trabajar con una embarcación en la condición de planeo:

$$n_{CG} = 0,32 \left( \frac{L_{lw}}{10 \times B_C} + 0,084 \right) \times (50 - \beta_{0,4}) \times \frac{V \times B_C^2}{m_{LDC}} \text{ para } n_{CG} \leq 3 \quad (32)$$

$$n_{CG} = \frac{0,5 \times V}{m_{LDC}^{0,17}} \text{ para } n_{CG} > 3 \quad (33)$$

siendo en ningún caso  $n_{CG} > 7$ . En el caso de encontrarnos en la situación de desplazamiento el valor de este coeficiente nunca será menor de 3.

#### 8.4.2.3. Factor longitudinal de distribución de la presión $k_L$

Este factor tiene en cuenta la variación de las cargas de presión debidas a la situación de la embarcación. Se puede determinar mediante las siguientes expresiones:

$$k_L = \frac{1 - 0,167 \times n_{CG}}{0,6} \frac{x}{L_{wl}} + 0,167 \times n_{CG} \text{ pero sin ser } > 1 \text{ para } \frac{x}{L_{wl}} \leq 0,6 \quad (34)$$

$$k_L = 1 \text{ para } \frac{x}{L_{wl}} > 0,6 \quad (35)$$

donde  $x/L_{wl}$  es la posición del centro del panel o del punto medio del refuerzo analizado proporcional a  $L_{wl}$ , donde  $x/L_{wl}=0$  y  $1$  respectivamente a proa y popa de  $L_{wl}$  y  $x$  es la posición longitudinal del centro del panel o del punto medio del refuerzo analizado a proa y popa de  $L_{wl}$  en condiciones de  $m_{LCD}$ .

#### 8.4.2.4. Factor de reducción de presión según la superficie $k_{AR}$

Este coeficiente tiene en cuenta la variación de las cargas de presión según el tamaño del panel o del refuerzo. Su valor se define mediante la siguiente expresión:

$$k_{AR} = \frac{k_R \times 0,1 \times m_{LDC}^{0,15}}{A_D^{0,3}} \quad (36)$$

donde  $K_R$  es el factor estructural del elemento y tipo de embarcación y  $A_D$  el área de diseño en metros cuadrados.  $K_R$  puede tomar distintos valores:

- $k_R = 1,0$  para paneles de fondo, costados y cubierta, así como refuerzos en embarcaciones planeadoras a motor que funcionen en modalidad planeadora
- $k_R = 1,5 - 3 \times 10^{-4} \times b$  para los paneles de fondo, costados y cubierta de los veleros y de las embarcaciones de desplazamiento a motor, así como para las embarcaciones planeadoras a motor que funcionen en la modalidad de desplazamiento

En cuanto al área de diseño, también se pueden tomar distintos valores:

- $A_D = (l \times b) \times 10^{-6}$  para las chapas, pero no se debe tomar un valor superior a  $2,5 \times b^2 \times 10^{-6}$
- $A_D = (l_u \times s) \times 10^{-6}$  para los refuerzos, pero no se debe tomar un valor superior a  $0,33 \times l_u^2 \times 10^{-6}$  siendo  $s$  la separación entre refuerzos y  $l_u$  la luz entre apoyos de un refuerzo

El valor máximo que puede tomar  $k_{AR}$  es igual a 1, y el menor no puede ser inferior a los valores de la siguiente tabla:

Categoría de diseño	Paneles de una sola capa y refuerzos de fondo y costados Paneles de una sola capa o tipo sandwich y refuerzos de cubiertas y superestructuras	Paneles tipo sandwich de fondo y costados <sup>a</sup>		
		$\frac{x}{L_{WL}} \leq 0,4$	$0,4 < \frac{x}{L_{WL}} < 0,6$	$\frac{x}{L_{WL}} \geq 0,6$
A	0,25 todas las embarcaciones casco y cubierta	0,4 todas las embarcaciones	Interpolación entre los valores $\frac{x}{L_{WL}} = 0,4$ y $0,6$	0,5 fondo de veleros y costado 0,5 fondo embarcaciones a motor 0,4 costado embarcaciones a motor
B	0,25 todas las embarcaciones casco y cubierta	0,4 todas las embarcaciones		0,4 todas las embarcaciones
C y D	0,25 todas las embarcaciones casco y cubierta	0,4 todas las embarcaciones		

a El valor mínimo de  $k_{AR}$  se aplica a los requisitos de resistencia a la flexión o cizalla y con la flecha máxima.

Imagen 76: Valores mínimos de  $k_{AR}$

#### 8.4.2.5. Factor de reducción de presión en el costado $k_z$

Este factor interpola la presión del costado entre la presión en la flotación y la presión de la cubierta en su borde superior:

$$k_z = \frac{Z - h}{Z} \quad (37)$$

donde  $Z$  es la altura superior del casco o el límite casco/ cubierta por encima de la flotación (m) y  $h$  la altura del centro del panel o del punto medio del refuerzo por encima de la flotación a plena carga (m).

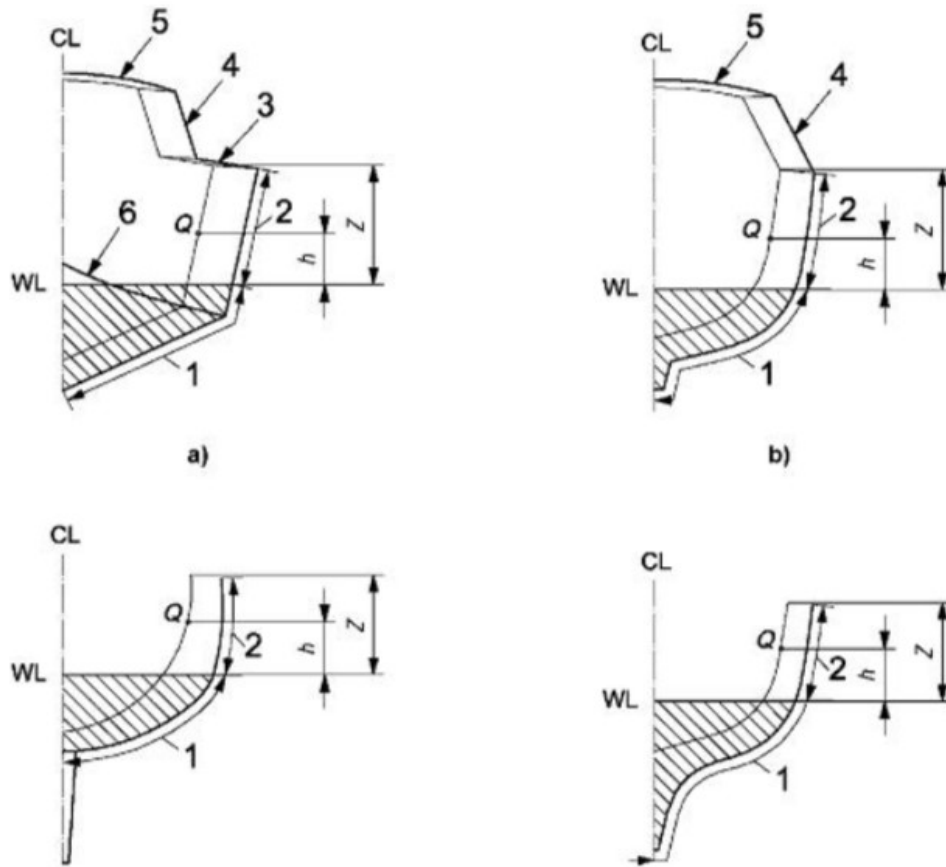


Imagen 77: Definición de las zona y altura de los paneles por encima de la flotación

### 8.4.3. Presiones de diseño de la embarcación

En la normativa se definen a las presiones de diseño para los paneles de fondo, costado, cubierta y otros elementos de interés, además de unas presiones mínimas necesarias.

#### 8.4.3.1. Presión de diseño en los fondos para las embarcaciones a motor

La presión de diseño en los fondos de una embarcación a motor debe ser la mayor de la presión de los fondos en la modalidad de desplazamiento y la presión de los fondos en la modalidad planeadora. Este doble requisito es debido a que, con mar gruesa, las embarcaciones que normalmente planean con mar llana deben avanzar a una velocidad más reducida, de la misma forma que una embarcación de desplazamiento.

La presión de diseño en los fondos para las embarcaciones a motor en la modalidad de desplazamiento viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{BMD} = P_{BMD\ BASE} \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \text{ kN/m}^2 \quad (38)$$

donde  $P_{BMD\ BASE}$  es la presión base definida por la siguiente expresión:

$$P_{BMD\ BASE} = 2,4m_{LDC}^{0,33} + 20 \text{ kN/m}^2. \quad (39)$$

Por otro lado, la presión de diseño en los fondos de una embarcación a motor en la modalidad de planeo se define como:

$$P_{BMP} = P_{BMP\ BASE} \times k_{AR} \times k_L \text{ kN/m}^2 \quad (40)$$

siendo  $P_{BMP\ BASE}$  la presión base definida como:

$$P_{BMP} = \frac{0,1m_{LDC}}{L_{wl} \times B_C} \times (1 + k_{DC}^{0,5} \times n_{CG}) \text{ kN/m}^2. \quad (41)$$

Además, la presión de diseño calculada por estas expresiones nunca debe ser menor del siguiente valor:

$$P_{BM\ MÍN} = 0,45m_{LDC}^{0,33} + (0,9 \times L_{wl} \times k_{DC}) \text{ kN/m}^2. \quad (42)$$

#### 8.4.3.2. Presión de diseño en el costado para las embarcaciones a motor

Para las embarcaciones a motor de las categorías de diseño C y D, la presión en el costado debe ser la que corresponda al modo de planeo o desplazamiento siendo elegido aquel que fue seleccionado para las planchas de fondo. La presión en el costado para las embarcaciones a motor en la modalidad de desplazamiento se define como:

$$P_{SMD} = [P_{DM\ BASE} + k_Z \times (P_{BMD\ BASE} - P_{DM\ BASE})] \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \text{ kN/m}^2 \quad (43)$$

siendo esta misma presión para embarcaciones a motor en la modalidad de desplazamiento la siguiente:

$$P_{SMP} = [P_{DM\ BASE} + k_Z \times (0,25 \times P_{BMP\ BASE} - P_{DM\ BASE})] \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \text{ kN/m}^2 \quad (44)$$

donde la presión base es:

$$P_{DM\ BASE} = 0,35L_{wl} + 14,6 \text{ kN/m}^2. \quad (45)$$

La presión de diseño en ningún caso debe ser menor del siguiente valor:

$$P_{SM\ MÍN} = 0,9L_{wl} \times k_{DC} \text{ kN/m}^2. \quad (46)$$

#### 8.4.3.3. Presión de diseño en cubierta para las embarcaciones a motor

Esta presión toma el siguiente valor:

$$P_{DM} = P_{DM\ BASE} \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \text{ kN/m}^2. \quad (47)$$

En cualquier caso, la presión de diseño nunca debe ser menor del siguiente valor:

$$P_{DM\ MÍN} = 5 \text{ kN/m}^2. \quad (46)$$

#### 8.4.3.4. Presión de diseño para mamparos estancos

La presión de diseño de este tipo de mamparos viene definida por la siguiente expresión:

$$P_{WB} = 7h_B \text{ kN/m}^2 \quad (49)$$

donde  $h_B$  se puede definir como:

- La distancia medida desde la parte superior del mamparo a un punto situado a 2/3 de la altura total del mamparo en el caso de tratarse de chapas de costado
- La distancia medida desde la parte superior del mamparo a un punto situado a 2/3 de la altura total del refuerzo en el caso de tratarse de refuerzos verticales

- La altura medida desde el refuerzo hasta la parte superior del mamparo en el caso de tratarse de refuerzos horizontales

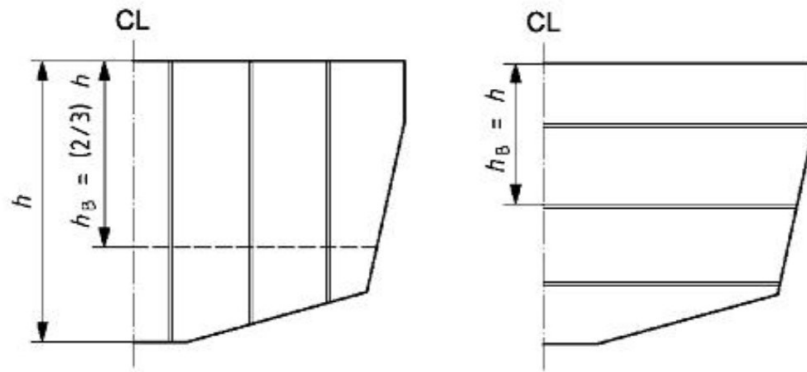


Imagen 78: Distintas formas de definir hB para un mamparo estanco

#### 8.4.4. Espesor mínimo de los paneles

El espesor mínimo en milímetros que deben tener los paneles de la embarcación se define por la siguiente expresión:

$$t_{\text{mín}} = b \times k_C \times \sqrt{\frac{P \times k_2}{1000 \times \sigma_d}} \quad (50)$$

donde P es la presión de diseño correspondiente,  $k_C$  el factor de corrección de curvatura para los paneles curvos,  $k_2$  el factor de alargamiento del panel por resistencia a la flexión y  $\sigma_d$  la tensión de diseño de la chapa. A continuación, se definen  $k_C$ ,  $k_2$  y  $\sigma_d$  con más detalle.

##### 8.4.4.1. Factor de corrección de la curvatura de los paneles $k_C$

Este factor de corrección se obtiene de la siguiente tabla:

$c/b$	$k_C$
0 a 0,03	1,0
0,03 a 0,18	$1,1 - \frac{3,33c}{b}$
> 0,18	0,5

Imagen 79: Valores posibles de  $k_C$

donde c se define como el abombamiento o curvatura del panel.

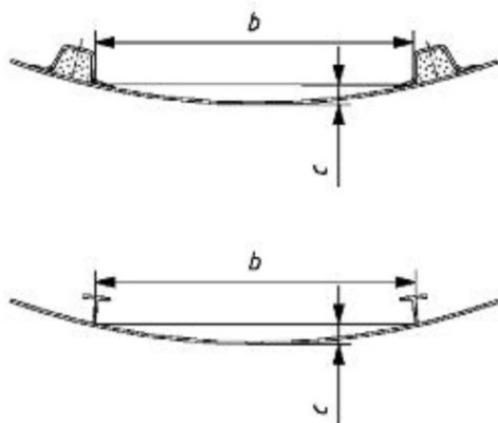


Imagen 80: Medición de la curvatura

8.4.4.2. Factor de alargamiento del panel por resistencia a la flexión  $k_2$

Este factor de alargamiento viene definido por la siguiente tabla:

Alargamiento del panel $l/b$	Factor $k_2$ $k_2$ debe tomarse = 0,5 para un costado de madera laminada	Factor $k_3$
> 2,0	0,500	0,028
2,0	0,497	0,028
1,9	0,493	0,027
1,8	0,487	0,027
1,7	0,479	0,026
1,6	0,468	0,025
1,5	0,454	0,024
1,4	0,436	0,023
1,3	0,412	0,021
1,2	0,383	0,019
1,1	0,349	0,016
1,0	0,308	0,014
	$k_2$ puede evaluarse mediante la fórmula siguiente manteniendo $0,308 < k_2 < 0,5$	$k_3$ puede evaluarse mediante la fórmula siguiente manteniendo $0,014 < k_3 < 0,028$
	$k_2 = \frac{0,271 (l/b)^2 + 0,910 (l/b) - 0,554}{(l/b)^2 - 0,313 (l/b) + 1,351}$	$k_3 = \frac{0,027 (l/b)^2 - 0,029 (l/b) + 0,011}{(l/b)^2 - 1,463 (l/b) + 1,108}$

Imagen 81: Valores de  $k_2$  y  $k_3$

En esta tabla también se define un factor  $k_3$ , sin embargo, este sólo afecta a los paneles laminados tipo “sándwich”.

8.4.4.3. Tensión de diseño para las chapas de costado de FRP de una sola capa

Según la normativa consultada,  $\sigma_d$  se obtiene de la siguiente forma:

Material	Elemento estructural	Tensión de diseño $\sigma_d$ N/mm <sup>2</sup>
FRP de una sola capa	Todos los elementos	0,5 $\sigma_{uf}$



Para calcular  $\sigma_{uf}$  es necesario recurrir al anexo C de la norma y seleccionar el nivel de evaluación con el que se va a trabajar:

Nivel de evaluación	Definición	Método
EL-a	Las propiedades mecánicas y el contenido de fibra se determinan por mediciones efectuadas con la ayuda de normas de ensayo reconocidas sobre escantillones representativos del producto fabricado.	Utilizar los resultados de las mediciones corregidas según el apartado C.1.1.
EL-b	El contenido de fibra en masa ase determina por mediciones. Se efectúan verificaciones puntuales con ayuda de normas de ensayo reconocidas sobre escantillones representativos del producto fabricado para garantizar que el producto cumple o excede los valores de las tablas C.4 a la C.7.	Valores por defecto (tablas C.4 a la C.7)
EL-c	No se hacen mediciones explícitas ni del contenido de fibra ni de las propiedades mecánicas. El contenido de fibra se deduce de la tabla C.2 o de otros valores nominales.	Multiplicar los valores por defecto (tablas C.4 a la C.7) por 0,8.

Imagen 82: Método de determinación del nivel de evaluación de las propiedades mecánicas

En el presente trabajo, como no se van a realizar mediciones ni ensayos sobre fibras reales se escoge el nivel C. A continuación, se recurre a la siguiente tabla para calcular el contenido nominal de fibra en masa:

Tipo de capa de refuerzo	Laminado de fibra de vidrio. Contenido en masa de vidrio $\psi$		
	Moldeado abierto		Bolsa de vacío
	Superficie simple <sup>b</sup>	Superficie compleja <sup>b</sup>	
Mat proyectado (CSM)	0,30	0,25	(0,36)
Mat estratificado (WR) a la mano por contacto	0,30	0,25	(0,36)
Roving tejido (WR)	0,48	0,36	0,58
Combinación roving-mat <sup>a</sup>	0,46-0,18 R	0,35-0,11 R	0,56-0,22 R
Tejidos multidireccionales	0,50	0,38	0,60
Tejidos unidireccionales	0,55	0,41	0,66
<b>Fibras diferentes de las de vidrio</b> (corresponden a un contenido equivalente de vidrio en masa superior a 0,4, es decir, no son de CSM)			
<b>Para las fibras de carbono</b> El contenido de fibra en masa $\psi$ que da el mismo contenido de fibra en volumen que los valores anteriores para el vidrio puede estimarse utilizando $\psi_{\text{carbono}} = 0,99 \psi_{\text{vidrio}}$ de la tabla - 0,08 (véase el ejemplo del C.3.3). Alternativamente se puede tomar el valor de $\phi$ correspondiente a $\psi_{\text{vidrio}}$ de la tabla C.4 b) y utilizar el mismo valor en la tabla C.5.			
<b>Para las fibras de aramida</b> El contenido de fibra en masa que da el mismo contenido de fibra en volumen que los valores anteriores para el vidrio puede estimarse utilizando $\psi_{\text{aramida}} = 0,95 \psi_{\text{vidrio}}$ de la tabla - 0,11.			
a R = masa total del mat (kg/m <sup>2</sup> ) / masa total del vidrio en el laminado (mat y tejido roving) (kg/m <sup>2</sup> ).			
b Una superficie "simple" es aquella en la que la impregnación y el secado de la resina son fáciles (por ejemplo las superficies grandes y accesibles como el casco, la cubierta y el fondo de la cabina de mando). Una superficie "compleja" es aquella en la que no son fáciles la impregnación y el secado de la resina (por ejemplo las brazolas altas, refuerzos profundos o moldeados en bandeja, etc.). La diferenciación entre unas y otras superficies corresponde al fabricante.			

Imagen 83: Contenido nominal de fibra en masa



Como se ha definido en apartados anteriores, el laminado va a ser una combinación roving-mat. Además, se optará por un moldeado abierto de superficies simples. Con todo ello habría que predefinir un laminado teórico para hallar el coeficiente adimensional R, que como bien refleja la tabla es un cociente entre el contenido de masa total de mat ( $\text{kg/m}^2$ ) y la masa total de vidrio ( $\text{kg/m}^2$ ). Como para el presente trabajo se alternarán capas de mat y roving con gramaje de  $200 \text{ gr/m}^2$  y  $300 \text{ gr/m}^2$  respectivamente, R resultará:

$$R = \frac{200}{200 + 300} = 0,400$$

Lo que se traduce en:

$$\psi = 0,46 - 0,18 \times 0,400 = 0,388$$

A partir de ahí, se podría calcular  $\sigma_{uf}$  recurriendo a la siguiente tabla:

Propiedad	Valores N/mm <sup>2</sup>
<b>Mat laminado a mano (CSM), combinado roving/mat, tejido roving (WR) y refuerzos alternados (CP) – 0/90<sup>a</sup></b>	
Resistencia de rotura por tracción, $\sigma_{ut}$	$800 \psi^2 - 80 \psi + 37$
Resistencia de rotura por compresión, $\sigma_{uc}$	$150 \psi + 72$
Resistencia de rotura por flexión, $\sigma_{uf}$	$502 \psi^2 + 107$
Resistencia de rotura por cizalla en el plano (intralaminar), $\tau_u$	$80 \psi + 38$
Módulo elástico en el plano, E	$38\,000 \psi - 5\,000$
Módulo de cizalla en el plano, G	$1\,700 \psi + 2\,240$
Resistencia de cizalla interlaminar (fuera del plano), $\tau_{u\text{ inter}}$	$22,5 - 17,5 \psi$

Imagen 84: Propiedades mecánicas del laminado de fibra de vidrio E

Al haber seleccionado el nivel de evaluación C anteriormente se obtendría:

$$\sigma_{uf} = 0,8 \times (502 \times 0,388^2 + 107) = 146,06 \text{ N/mm}^2$$

Y finalmente:

$$\sigma_d = 0,5 \times 142,06 = 73,03 \text{ N/mm}^2$$

#### 8.4.5. Contenido mínimo de masa para el laminado o espesor mínimo

##### 8.4.5.1. Contenido mínimo en masa en fondo y costado

Una vez calculado el laminado hay que comprobar que, además, lleva una cantidad de fibra acorde a la normativa. Para fondo y costado, esto se calcula con la siguiente expresión:

$$w_{MÍN} = 0,43 \times k_5 \times (A + k_7 \times V + k_8 \times m_{LDC}^{0,33}) \text{ kg/m}^2. \quad (51)$$

Material	Situación	A	$k_5$	$k_7$	$k_8$
FRP	Fondo	1,5	Como se define en el apartado 10.5.6	0,03	0,15
	Costado/espejo de popa	1,5		0	0,15
Aluminio	Fondo	1,0	$\sqrt{(125 / \sigma_y)}$	0,02	0,1
	Costado/espejo de popa	1,0		0	0,1
Acero	Fondo	1,0	$\sqrt{(240 / \sigma_y)}$	0,015	0,08
	Costado/espejo de popa	1,0		0	0,08
Contrachapado	Fondo	3,0	$\sqrt{(30 / \sigma_{uf})}$	0,05	0,3
	Costado/espejo de popa	3,0		0	0,3

Imagen 85: Valor de los distintos parámetros a emplear

El factor  $k_5$  puede tomar los siguientes valores:

- $k_5 = 1,0$  para los refuerzos de fibra de vidrio E que contengan hasta un 50% de fibras trenzadas de mat en masa
- $k_5 = 0,9$  para los refuerzos de fibra de vidrio
- $k_5 = 0,7$  para los refuerzos continuos que utilicen aramida, carbono o mezcla de los dos

#### 8.4.5.2. Espesor mínimo de la cubierta

Para el caso de la cubierta, no hay que contar con un contenido en masa mínimo sino con un espesor mínimo. Éste se calcula, dependiendo del material de construcción, con la siguiente tabla:

Situación	Espesor mínimo requerido para la cubierta $t_{MIN}$ mm			
	FRP	Aluminio	Acero	Madera, contrachapado
Cubierta	$k_5 (1,45 + 0,14 L_{WL})$	$1,35 + 0,06 L_{WL}$	$1,5 + 0,07 L_{WL}$	$3,8 + 0,17 L_{WL}$

Imagen 86: Espesor mínimo de la cubierta

#### 8.4.6. Factores de ajuste de las propiedades de los refuerzos

Al igual que ocurre con los paneles, la norma ISO 12215-5 también dispone de distintos coeficientes de corrección a la hora de calcular los refuerzos. Estos factores son dos:  $k_{CS}$  y  $k_{SA}$ .

##### 8.4.6.1. Factor de ajuste por curvatura de los refuerzos $k_{CS}$

Este factor de ajuste viene definido por la siguiente tabla:

$\frac{c_u}{l_u}$	$k_{CS}$
0 a 0,03	1
0,03 a 0,18	$1,1 - 3,33 (c_u/l_u)$
> 0,18	0,5

Imagen 87: Valores del factor de ajuste por curvatura de los refuerzos

donde  $c_u$  es el abombamiento del refuerzo curvado en milímetros y  $l_u$  la luz entre apoyos de un refuerzo o cuaderna.

#### 8.4.6.2. Factor de superficie de cizalla de un refuerzo $k_{SA}$

Este factor de ajuste viene definido por la siguiente tabla:

Disposición del refuerzo	$k_{SA}$
Unido al costado	5
Otras disposiciones (flotante)	7,5

Imagen 88: Valores del factor de superficie de cizalla

#### 8.4.7. Tensiones de diseño de los refuerzos

Las tensiones de diseño de los refuerzos vienen definidas en la norma por la siguiente tabla:

Material	Tensión de diseño en tracción y compresión $\sigma_d$ N/mm <sup>2</sup>	Tensión de diseño a la cizalla $\tau_d$ N/mm <sup>2</sup>
Laminado FRP	0,5 $\sigma_{ut}$ y 0,5 $\sigma_{uc}$ <sup>a</sup>	0,5 $\tau_u$
Aleaciones de aluminio	0,7 $\sigma_{yw}$ <sup>b</sup>	0,4 $\sigma_{yw}$ <sup>b</sup>
Acero	0,8 $\sigma_y$	0,45 $\sigma_y$
Cuadernas de madera laminada	0,45 $\sigma_{uf}$ <sup>c</sup>	0,45 $\tau_u$
Cuadernas de madera maciza	0,4 $\sigma_{uf}$ <sup>c</sup>	0,4 $\tau_u$
Cuadernas de contrachapado sobre los bordes	0,45 $\sigma_{uf}$ <sup>c</sup>	0,45 $\tau_u$
NOTA Estas tensiones de diseño se aplican también al costado asociado a los refuerzos, en función del material.		
a Se utiliza $\sigma_c$ cuando se considera que la tensión es por compresión (normalmente el ala superior del refuerzo) y $\sigma_t$ cuando se considera que la tensión es por tracción (normalmente las chapas del costado), se tienen que hacer las dos verificaciones.		
b Para los refuerzos soldados. Si los refuerzos de aluminio no están soldados, es decir están remachados, encolados, etc., se deben utilizar las propiedades de los no soldados.		
c Deben tomarse en la tabla E.1 los valores de $\sigma_{uf}$ para los refuerzos de madera laminada y los de $\sigma_{uf}$ para la madera maciza. Para el contrachapado no se debe tomar $\sigma_{uf}$ en la tabla E.2, sino en las tablas E.3 o E.6.		

Imagen 89: Tensiones de diseño para refuerzos en función del material

En el caso del presente trabajo, como se está trabajando con un laminado FRP, sólo se calculará  $\sigma_{ut}$ ,  $\sigma_{uc}$  y  $\tau_u$ . Para ello habrá que recurrir a la tabla de la imagen 44 y calcular esos valores con los datos que ya disponemos:

$$\sigma_{ut} = 0,8 \times (800 \times 0,388^2 - 80 \times 0,388 + 37) = 101,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{uc} = 0,8 \times (150 \times 0,388 + 72) = 104,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_u = 0,8 \times (80 \times 0,388 + 38) = 55,2 \text{ N/mm}^2$$

#### 8.4.8. Requisitos generales para el diseño de refuerzos

A la hora de diseñar los refuerzos de esta embarcación, se debe procurar que tanto la superficie del alma, como el módulo de inercia mínimo y el segundo momento de inercia de la chapa asociada al mismo no sean inferiores a los definidos por la norma. Por un lado, la superficie del alma se define de la siguiente forma:

$$A_w = \frac{k_{SA} \times P \times s \times l_u}{\tau_d} 10^{-6} \text{ cm}^2 \quad (52)$$

donde P es la presión de diseño del panel, s la separación entre refuerzos y  $\tau_d$  la tensión de cizalla de diseño.

Por otro lado, el módulo de inercia mínimo se define como:

$$SM = \frac{83,33 \times k_{CS} \times P \times s \times l_u^2}{\sigma_d} 10^{-9} \text{ cm}^3. \quad (53)$$

Y finalmente, se define el momento de inercia de la chapa asociada como:

$$I = \frac{26 \times k_{CS}^{1,5} \times P \times s \times l_u^3}{k_{1S} \times E_{tc}} 10^{-11} \text{ cm}^4 \quad (54)$$

donde  $E_{tc}$  es la media de los módulos de elasticidad en tracción/compresión del material y  $k_{1S}$  es un factor de deflexión igual a 0,05.  $E_{tc}$  se define en el apartado 8.4.4.3. a partir de la siguiente de la siguiente expresión:

$$E_{tc} = 38000\psi - 5000 \text{ N/mm}^2 \quad (55)$$

#### 8.4.9. Requisitos específicos para los refuerzos de la embarcación

El refuerzo en el pantoque se puede calcular mediante las ecuaciones definidas en el apartado anterior. Sin embargo, para el cálculo de la quilla protectora, el codillo reforzado y la roda protectora hay que tener en cuenta otras ecuaciones. El área de aplicación de estos refuerzos sería el siguiente:

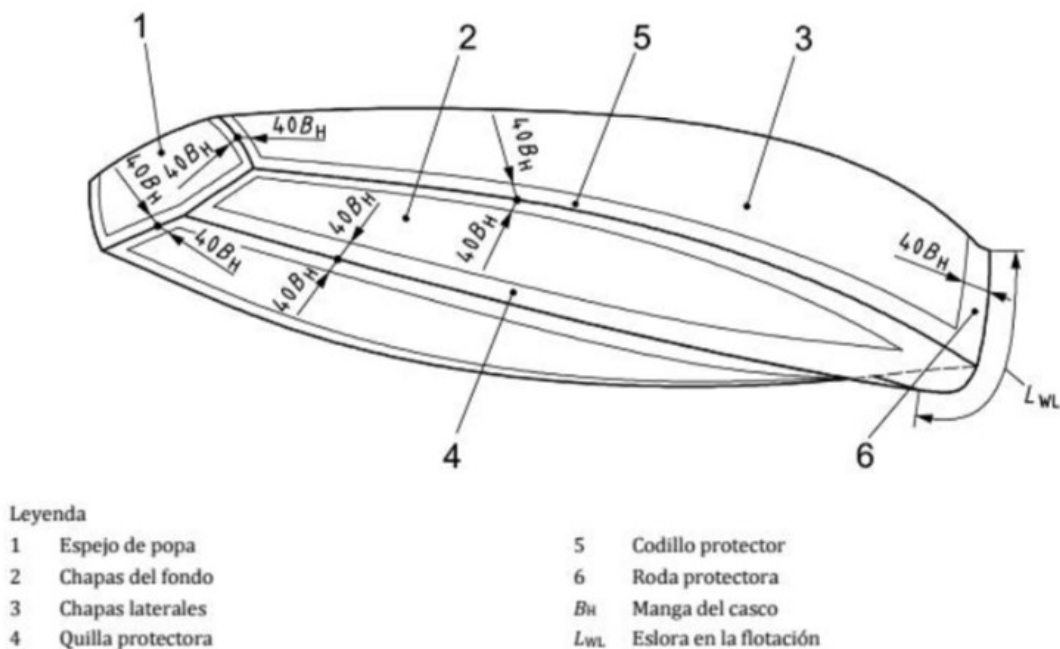


Imagen 90: Zonas reforzadas del laminado

#### 8.4.9.1. Quilla protectora

A la hora de seleccionar una quilla, además de aplicar las ecuaciones (52), (52) y (54), también hay que tener en consideración el módulo de la sección de la quilla alrededor del eje horizontal:

$$SM_{QUILLA} = 1,4 \times 10^{-3} \times f_1 \times m_{LDC} \times L \text{ cm}^3 \quad (56)$$

siendo  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{130}{\sigma_{uf}}. \quad (57)$$

Además, la quilla debe tener al menos la siguiente cantidad de fibra de vidrio:

$$w_{QUILLA \text{ MÍN}} = 2,2 \times w_{MÍN} \text{ kg/m}^2 \quad (58)$$

$w_{MÍN}$  se calcula tal como se muestra en el apartado 8.4.5.1. y es referente al laminado de fondo.

#### 8.4.9.2. Codillo reforzado

Los codillos de ángulo máximo de  $130^\circ$  se refuerzan dentro de  $(40 \times B_H)$  mm de tal manera que el laminado posea como mínimo la siguiente cantidad de fibra de vidrio:

$$w_{CODILLO \text{ MÍN}} = 1,7 \times w_{MÍN} \text{ kg/m}^2. \quad (59)$$

#### 8.4.9.3. Roda protectora

La roda protectora se refuerza dentro de  $(40 \times B_H)$  mm desde la línea de crujía de tal manera que el laminado posea como mínimo la siguiente cantidad de fibra de vidrio:

$$w_{RODA \text{ MÍN}} = 2,0 \times w_{MÍN} \text{ kg/m}^2. \quad (60)$$

#### 8.4.10. Cálculo de paneles de fondo

En primer lugar, se importan las superficies de la embarcación generadas en Maxsurf a Rhinoceros 3D. Entonces, la superficie de fondo se divide formando los paneles definidos en el apartado 8.3. y se calcula la superficie de cada uno de ellos para poder crear paneles equivalentes que sean rectangulares con dimensiones  $l$  y  $b$ . Además, calculando el centroide de área de los mismo, podemos calcular la dimensión  $x$  definida en el 8.4.2.3. Se obtiene:

Panel	Superficie (m <sup>2</sup> )	l (mm)	b (mm)	x (m)
1	0,452	750	603	0,375
2	0,449	750	599	1,124
3	0,402	750	536	1,859
4	0,189	750	252	2,500

Tabla 54: Parámetros iniciales de los paneles de fondo

A partir de aquí se calcula la presión de diseño de los paneles. Se obtienen los siguientes valores:

Panel	P <sub>BMD</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BM MIN</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
1	3,79	4,85	3,63
2	4,55	5,81	3,63
3	5,34	6,73	3,63
4	7,51	8,89	3,63

Tabla 55: Presiones de los paneles de fondo

Como se puede apreciar, se escogerán las presiones de diseño correspondientes a la condición de planeo. De esta manera se pueden estimar los espesores mínimos de cada panel:

Panel	P (kN/m <sup>2</sup> )	t <sub>mín</sub> (mm)
1	4,85	3,10
2	5,81	3,38
3	6,73	3,40
4	8,89	1,97

Tabla 56: Espesores mínimos de los paneles de fondo

Esto hace indicar que, para que todos los paneles tengan el mismo espesor, el laminado tiene que contar con un espesor mínimo de 3,40 mm. Para calcular el espesor del laminado, se calcula la relación entre el espesor del laminado y la cantidad de masa de fibra seca mediante la siguiente tabla:

$\psi$	0,25	0,30	0,36	0,38	0,41	0,50	0,55	0,58	0,60	0,66
t/w <sup>a</sup>	2,89	2,34	1,87	1,75	1,59	1,22	1,07	0,99	0,95	0,82
a Relación entre el espesor, en milímetros, y la masa de fibra seca, en kilogramos por metro cuadrado.										

Imagen 91: Relación entre espesor y masa de fibra seca

Como se ha calculado en el apartado 8.4.4.3., el valor de  $\psi$  es de 0,388, lo que significa que habrá que interpolar para conseguir la relación t/w deseada:

$$t/w = 1,75 + \frac{1,59 - 1,75}{0,41 - 0,38} \times (0,388 - 0,38) = 1,71$$

Con estos datos, se llega a una solución con el siguiente laminado:

Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>1,71</b>	<b>3,42</b>

Tabla 57: Laminado de los paneles de fondo

Finalmente, se calcula el  $w$  mínimo y se comprueba que este es menor al del laminado:

$w_{\text{MÍN}} \text{ (kg/m}^2\text{)}$
1,15

Tabla 58: Contenido mínimo en fibra para los paneles de fondo

#### 8.4.11. Cálculo de paneles de costado

De la misma manera que para los paneles de fondo, se calculan unos paneles de costado equivalentes. Además, esta vez necesitamos los parámetros  $h$  y  $Z$ :

Panel	Superficie ( $\text{m}^2$ )	$l$ (mm)	$b$ (mm)	$x$ (m)	$h$ (mm)	$Z$ (mm)
5	0,271	850	319	0,424	146	292
6	0,266	850	313	1,273	146	292
7	0,262	850	308	2,129	155	292
8	0,225	850	265	2,868	190	292

Tabla 59: Parámetros iniciales de los paneles de costado

Como las presiones de diseño de los paneles fondo al final correspondían a la condición de planeo, para los paneles de costado se escogerá entre las presiones mínimas y las correspondientes a la condición de planeo:

Panel	$P_{\text{SMP}} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$P_{\text{SM MIN}} \text{ (kN/m}^2\text{)}$
5	1,08	1,00
6	1,34	1,00
7	1,51	1,00
8	1,82	1,00

Tabla 60: Presiones de los paneles de costado

De nuevo se pueden estimar los espesores mínimos:

Panel	$P \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$t_{\text{mín}} \text{ (mm)}$
5	1,08	0,87
6	1,34	0,95
7	1,51	0,99
8	1,82	0,94

Tabla 61: Espesores mínimos de los paneles de costado

Luego para crear todos los paneles del mismo espesor, el laminado tiene que contar con un espesor mínimo de 0,99 mm. Una solución sería:

Capa	$w \text{ (kg/m}^2\text{)}$	$t/w$	$t \text{ (mm)}$
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	1	1,71	<b>1,71</b>

Tabla 62: Laminado de los paneles de costado

Finalmente, se calcula el  $w_{\text{mín}}$ :

<b>w<sub>MÍN</sub> (kg/m<sup>2</sup>)</b>
0,92

Tabla 63: Contenido mínimo en fibra para los paneles de costado

#### 8.4.12. Cálculo de paneles de cubierta

Igual que en los dos apartados anteriores, se calculan las superficies de los paneles y se crean los correspondientes paneles rectangulares equivalentes:

Panel	Superficie (m <sup>2</sup> )	l (mm)	b (mm)	x (m)
9	0,423	750	564	2,109
10	0,246	750	328	2,800

Tabla 64: Parámetros iniciales de los paneles de cubierta

A continuación, se calculan las presiones de diseño:

Panel	P <sub>DM</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>DM MIN</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
9	1,80	5
10	2,12	5

Tabla 65: Presiones de los paneles de cubierta

Y los espesores mínimos de cada panel:

Panel	P (kN/m <sup>2</sup> )	t <sub>mín</sub> (mm)
9	5	3,02
10	5	1,92

Tabla 66: Espesores mínimos de los paneles de cubierta

Se observa que para que todos los paneles cuenten con el mismo espesor de laminado, el espesor mínimo será de 3,02 mm. De esta forma, se aporta la siguiente solución:

Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	2	1,71	<b>3,42</b>

Tabla 67: Laminado de los paneles de cubierta

Para la cubierta, se calcula el espesor mínimo necesario y se comprueba que cumple:

<b>t<sub>MÍN CUB</sub> (mm)</b>
1,66

Tabla 68: Espesor mínimo para los paneles de cubierta



#### 8.4.13. Cálculo del mamparo estanco

Mediante distintos comandos se puede definir el mamparo estanco a calcular en Rhinoceros 3D. De la misma manera que en apartados anteriores, se define su superficie y se crea un panel equivalente de dimensiones  $l$  y  $b$ , obteniendo además  $h_B$ :

Superficie (m <sup>2</sup> )	l (mm)	b (mm)	h (m)	h <sub>B</sub> (mm)
0,417	990	421	421	281

Tabla 69: Parámetros iniciales del mamparo estanco

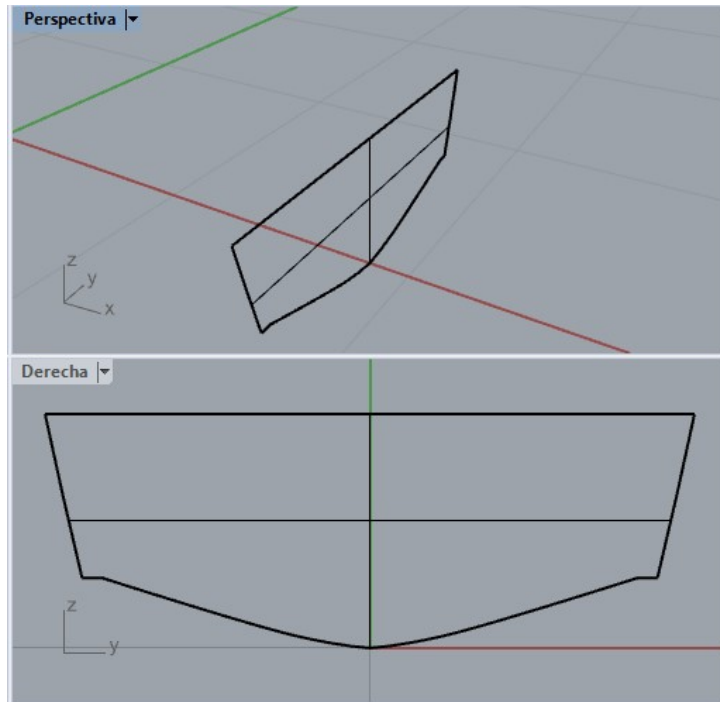


Imagen 92: Mamparo estanco

Se calcula el espesor mínimo de la misma manera que para los paneles de los apartados anteriores previo cálculo de la presión de diseño. El valor de la tensión mínima de diseño también se mantiene ya que el laminado propuesto para el mamparo sigue consistiendo en disponer sucesivamente una capa de mat y otra de roving con el mismo gramaje de apartados anteriores. Se obtiene para el mamparo estanco:

P (kN/m <sup>2</sup> )	t <sub>mín</sub> (mm)
1,96	1,54

Tabla 70: Espesor mínimo del mamparo

Se obtiene una solución con la siguiente secuencia de laminado:

Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	1	1,71	<b>1,71</b>

Tabla 71: Laminado del mamparo estanco

#### 8.4.14. Cálculo del espejo de popa

Para el cálculo del espejo de popa en una embarcación compuesta de FRP en la que se cuenta con un motor fueraborda se tiene que recurrir a la ISO 12215-6. Esto se debe a que el espejo de popa en este caso no se puede dimensionar como un mamparo estanco o estructural cualquiera: el diseño del espejo de popa debe asegurar que los momentos flectores y el empuje desde el motor se transmitan a la estructura del casco sin crear excesivas tensiones. Para ello se tiene que calcular el espesor mínimo del alma del espejo de popa, el espesor mínimo de la capa interior del soporte del motor y el espesor mínimo de la capa exterior del soporte del motor.

El espesor mínimo del alma del se define como:

$$t_{alma.} = 35 + 0,15Pw \text{ mm} \quad (47)$$

donde Pw es la potencia del motor instalado en kW. El valor obtenido se debe redondear al múltiplo más cercano a 5 mm.

Por otro lado, el espesor mínimo de la capa interior se define como:

$$t_{int.} = L^{0,55} \text{ mm.} \quad (48)$$

Y finalmente, el espesor mínimo de la capa exterior es:

$$t_{ext.} = L^{0,55} + 0,085P^{0,5} \text{ mm.} \quad (49)$$

De esta manera se obtienen los siguientes valores:

t <sub>alma.</sub> (mm)	t <sub>int.</sub> (mm)	t <sub>ext.</sub> (mm)
35	1,91	2,05

Tabla 72: Espesores del espejo de popa

El laminado propuesto tanto para t<sub>int.</sub> como para t<sub>ext.</sub> Es el mismo:

Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	1,5	1,71	<b>2,57</b>

Tabla 73: Laminado del espejo de popa

Mientras que para el alma se puede seleccionar un PVC de estructura entrecruzada y densidad 75 kg/m<sup>3</sup> como el que aparece en el apartado 8.2.4.

Se comprueba que se cumple la cantidad mínima de masa:

w <sub>MÍN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )
0,92

Tabla 74: Contenido mínimo en fibra para el espejo de popa

#### 8.4.15. Cálculo de la quilla

Se definen los siguientes parámetros para la quilla:

$l_u$ (mm)	$s$ (mm)	$P$ (kN/m <sup>2</sup> )
2740	47	7,34

Tabla 75: Parámetros iniciales de la quilla

Como presión de diseño se escoge la mayor de los paneles de fondo. A partir de estos datos, se calculan los distintos parámetros:

$SM$ (cm <sup>3</sup> )	$SM_{QUILLA}$ (cm <sup>3</sup> )	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$I$ (cm <sup>4</sup> )
2,10	0,87	0,046	3,99

Tabla 76: Propiedades mínimas de la quilla

Con estos resultados, se puede seleccionar una quilla de una disposición específica recurriendo al anexo G de la norma ISO 12215-5. En este caso se opta por un perfil sombrero de copa alto.

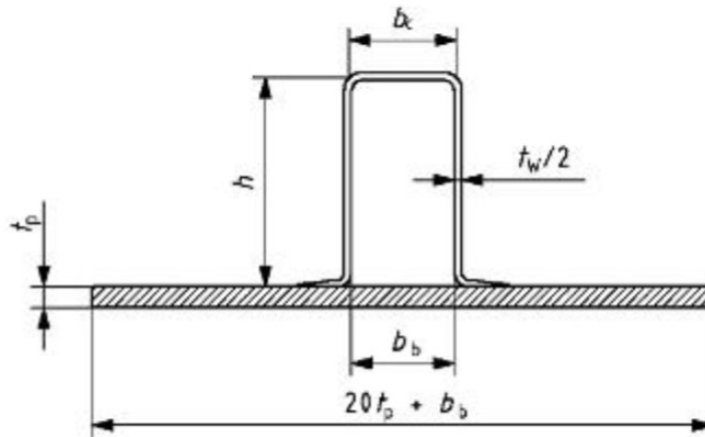


Imagen 93: Disposición en sombrero de copa alto

Con esta disposición se puede elegir un perfil de la siguiente tabla:

1	2		3	4	5	6	7			8	9
	Dimensiones de las formas						Espesor del costado	Chapa asociada	Peso del vidrio de refuerzo		
$h$ mm	$b_b$ mm	$b_c$ mm	$t_p$ mm	$20 t_p + b_b$ mm	$w_f$ kg/m <sup>2</sup>	$SM_{min}$ cm <sup>3</sup>	$A_w$ cm <sup>2</sup>	$I_{NA}$ cm <sup>4</sup>			
100	50	50	5	150	1,800	41,3	8,4	289			
			10	250	1,800	48,4	8,4	434			
			15	350	1,800	52,7	8,4	529			
125	50	50	5	150	2,100	64,7	12,3	532			
			10	250	2,100	77,1	12,3	816			
			15	350	2,100	84,1	12,3	1 006			
150	50	50	5	150	2,700	103,6	18,9	960			
			10	250	2,700	126,2	18,9	1 496			
			15	350	2,700	139,1	18,9	1 893			
150	75	75	5	175	2,700	125,5	18,9	1 140			
			10	275	2,700	149,5	18,9	1 751			
			15	375	2,700	163,2	18,9	2 199			
175	75	65	5	175	3,000	160,5	24,5	1 675			
			10	275	3,000	193,5	24,5	2 557			
			15	375	3,000	213,0	24,5	3 243			
200	75	75	5	175	3,600	239,4	33,6	2 713			
			10	275	3,600	289,9	33,6	4 102			
			15	375	3,600	322,1	33,6	5 296			
200	100	100	5	200	3,600	276,9	33,6	3 081			
			10	300	3,600	330,5	33,6	4 626			
			15	400	3,600	364,0	33,6	5 934			
250	100	100	5	200	4,200	432,8	49,0	5 836			
			10	300	4,200	517,5	49,0	8 506			
			15	400	4,200	576,2	49,0	11 005			
300	100	100	5	200	5,100	667,6	71,5	10 571			
			10	300	5,100	792,2	71,5	14 779			
			15	400	5,100	890,3	71,5	19 131			

Imagen 94: Posibles perfiles de sombreros de copa altos

De todos ellos, se selecciona el perfil con las siguientes propiedades

SM (cm <sup>3</sup> )	A <sub>w</sub> (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )
41,3	8,4	289	1,8

Tabla 77: Propiedades de la primera quilla seleccionada

Se comprueba que cumple con la cantidad mínima de masa de vidrio, que en el presente caso es:

W <sub>QUILLA MÍN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )
2,53

Tabla 78: Contenido mínimo en fibra de la quilla

El perfil seleccionado posee 1,8 kg/m<sup>2</sup>, luego habrá que buscar un perfil de mayor peso. De esta manera se selecciona el que posee los siguientes datos:

SM (cm <sup>3</sup> )	A <sub>w</sub> (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )
103,6	18,9	960	2,7

Tabla 79: Propiedades finales de la quilla

#### 8.4.16. Cálculo del refuerzo en el codillo

Para el cálculo del laminado a realizar en el refuerzo del codillo hay que tener en cuenta la cantidad mínima de fibra que hay que disponer. Esta cantidad es:

W <sub>CODILLO MÍN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )
1,96

Tabla 80: Contenido mínimo en fibra del refuerzo del codillo

Siendo el laminado propuesto el siguiente:

Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>1,71</b>	<b>3,42</b>

Tabla 81: Laminado del refuerzo del codillo

#### 8.4.17. Cálculo del refuerzo en la roda

Este refuerzo se calcula de igual manera que el del codillo. La cantidad mínima de fibra que debe tener es:

W <sub>RODA MÍN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )
2,30

Tabla 82: Cantidad mínima en fibra de la roda

Siendo una posible solución el siguiente laminado:

Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	2,5	1,71	<b>4,28</b>

Tabla 83: Laminado del refuerzo de la roda

## 9. EVALUACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PESOS

### 9.1. Introducción

En este apartado se procederá a obtener el peso final de la embarcación. Este se realizará a partir de los resultados que se han ido obteniendo a lo largo del trabajo. En paralelo a este proceso, también se calculará el centro de gravedad de la embarcación y finalmente se situarán los foils a lo largo de la eslora.

### 9.2. Peso total de la embarcación y estimación del centro de gravedad

Además de calcular el peso total de la embarcación con sus diferentes partidas, hay que hallar las componentes del centro de gravedad de la embarcación. Esto es sencillo de realizar mediante el cálculo de momentos. El momento longitudinal, transversal y vertical que produce cada elemento de la embarcación viene definido por las siguientes expresiones:

$$M_{Li} = L_{CGi} \times m_i \quad (50)$$

$$M_{Vi} = V_{CGi} \times m_i \quad (51)$$

$$M_{Ti} = T_{CGi} \times m_i \quad (52)$$

donde  $m_i$  es la masa de cada elemento y  $L_{CGi}$ ,  $V_{CGi}$  y  $T_{CGi}$  las componentes longitudinal, vertical y transversal del centro de gravedad de cada elemento.

Las componentes finales del centro de gravedad de la embarcación se calcularían del siguiente modo:

$$L_{CGfinal} = \frac{\sum_i^n M_{Li}}{\sum_i^n m_i} \quad (53)$$

$$V_{CGfinal} = \frac{\sum_i^n M_{Vi}}{\sum_i^n m_i} \quad (54)$$

$$T_{CGfinal} = \frac{\sum_i^n M_{Ti}}{\sum_i^n m_i} \quad (55)$$

Se tomará como origen de coordenadas el punto más a popa de la parte más baja de la crujía.

#### 9.2.1. Paneles de fondo, cubierta y costado

El peso y centro de gravedad de los paneles de fondo, costado y cubierta se calcula con Rhinoceros 3D de la misma manera que en el escantillonado, con la diferencia de que ahora, en vez de coger panel por panel podemos coger directamente las estructuras de fondo, costado y cubierta. El área de cada apartado se multiplicará por los  $\text{kg/m}^2$  que se obtienen una vez se realiza el laminado. Se obtiene:

Paneles	w (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	m <sub>i</sub> (kg)	L <sub>CGi</sub> (m)	V <sub>CGi</sub> (m)	T <sub>CGi</sub> (m)	M <sub>Li</sub> (kgxm)	M <sub>Vl</sub> (kgxm)	M <sub>Ti</sub> (kgxm)
Fondo	2	2,982	6,0	1,27	0,061	0	7,574	0,364	0
Costado	1	2,05	2,1	1,618	0,281	0	3,317	0,576	0
Cubierta	2	1,339	2,7	2,363	0,421	0	6,328	1,127	0
<b>Total</b>	-	-	<b>10,7</b>	-	-	-	<b>17,219</b>	<b>2,067</b>	<b>0</b>

Tabla 84: Pesos y momentos de los paneles

Con las siguientes coordenadas:

LCGpaneles (m)	VCGpaneles (m)	TCGpaneles (m)
1,610	0,193	0

Tabla 85: Coordenadas del centro de gravedad de los paneles

### 9.2.2. Refuerzos

Tanto el espejo de popa como el mamparo estanco se calculan siguiendo la misma filosofía que los paneles que el apartado anterior. Sin embargo, para el resto de refuerzos se vuelve algo más complicado. Debido a la dificultad, se estima que la posición del centro de gravedad de la quilla está a la mitad de la longitud definida en el 8.4.15. y a una profundidad con respecto al plano base de 0,075 m, ya que la quilla seleccionada en este mismo apartado tenía una h según la Imagen 85 de 150 mm.

Por otro lado, aunque el peso del refuerzo de codillo y roda se calculan directamente con el peso en fibra resultante y el área hallada de calcular sus respectivas longitudes en Rhinoceros 3D y calcular la manga del espesor según la norma ISO 12215-6, para el cálculo de las componentes del centro de gravedad el proceso se vuelve más laborioso definiendo esas superficies sobre el modelo de Rhinoceros 3D lo mejor posible. Se obtienen los siguientes resultados:

Refuerzo	w (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	m <sub>i</sub> (kg)	L <sub>CGi</sub> (m)	V <sub>CGi</sub> (m)	T <sub>CGi</sub> (m)	M <sub>Li</sub> (kgxm)	M <sub>Vl</sub> (kgxm)	M <sub>Ti</sub> (kgxm)
Mamparo Est.	1	0,417	0,4	1,747	0,241	0	0,728	0,100	0
Espejo Popa	5,6	0,455	2,5	0	0,235	0	0,000	0,599	0
Quilla	2,7	0,411	1,1	1,37	-0,075	0	1,520	-0,083	0
Roda	2,5	0,037	0,1	3,126	0,348	0	0,289	0,032	0
Codillo	2	0,285	0,6	1,295	0,124	0	0,738	0,071	0
<b>Total</b>	-	-	<b>4,7</b>	-	-	-	<b>3,276</b>	<b>0,719</b>	<b>0</b>

Tabla 86: Pesos y momentos de los refuerzos

Con las siguientes coordenadas:

LCGpaneles (m)	VCGpaneles (m)	TCGpaneles (m)
0,692	0,152	0

Tabla 87: Coordenadas del centro de gravedad de los refuerzos

### 9.2.3. Equipos

Los equipos necesarios para la embarcación son los siguientes:



Elemento	m <sub>i</sub> (kg)	L <sub>CGi</sub> (m)	V <sub>CGi</sub> (m)	T <sub>CGi</sub> (m)	M <sub>Li</sub> (kgxm)	M <sub>Vi</sub> (kgxm)	M <sub>Ti</sub> (kgxm)
Motor	33,0	-0,215	0	0	-7,095	0,000	0
Baterías	55,4	2,107	0,11	0	116,728	6,094	0
Instalación eléctrica	3,0	1,054	0,1	0	3,162	0,300	0
Dispositivos navegación	2,0	0,858	0,3	0	1,716	0,600	0
<b>Total</b>	<b>93,4</b>	-	-	-	<b>114,511</b>	<b>6,694</b>	<b>0</b>

Tabla 88: Pesos y momentos de los equipos

Con las siguientes coordenadas:

LCGequipos (m)	VCGequipos (m)	TCGiequipos (m)
1,226	0,072	0

Tabla 89: Coordenadas del centro de gravedad de los equipos

#### 9.2.4. Tripulación

Al considerarse despreciable, dentro del peso de la tripulación se incluyen la bancada y un asiento de polietileno. De esta manera resulta:

Elemento	m <sub>i</sub> (kg)	L <sub>CGi</sub> (m)	V <sub>CGi</sub> (m)	T <sub>CGi</sub> (m)	M <sub>Li</sub> (kgxm)	M <sub>Vi</sub> (kgxm)	M <sub>Ti</sub> (kgxm)
Tripulación	80,0	0,658	0,7	0	52,640	56,000	0
<b>Total</b>	<b>80,0</b>	-	-	-	<b>52,640</b>	<b>56,000</b>	<b>0</b>

Tabla 90: Pesos y momentos de la tripulación

Con las siguientes coordenadas:

LCGtripulación (m)	VCGtripulación (m)	TCGitripulación (m)
0,658	0,700	0

Tabla 91: Coordenadas del centro de gravedad de la tripulación

#### 9.2.5. Peso de mástiles y foils

El peso estos elementos se calcula con las dimensiones calculadas en apartados anteriores, así como con el material seleccionado para construirlos:

Elemento	longitud (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	m <sub>i</sub> (kg)
Mástil Proa	0,8	1,68E-03	2,1
Mástil Popa 1	0,8	1,68E-03	2,1
Mástil Popa 2	0,8	1,68E-03	2,1
Foil popa	1,311	6,39E-03	13,0
Foil proa	0,657	1,61E-03	1,6
<b>Total</b>	-	-	<b>20,9</b>

Tabla 92: Pesos de mástiles y foils

La disposición de estos foils y mástiles se calculará en posteriores apartados.

#### 9.2.6. Peso total de la embarcación

Después de desglosar todos los pesos se obtiene el peso total de la embarcación a plena carga y durante la navegación:

<b>M<sub>final</sub> (kg)</b>
209,7

Tabla 93: Peso total de la embarcación

Como la intención era no sobrepasar en ningún momento los 210 kg, se da por bueno este resultado y no habrá que volver a apartados anteriores volver a iniciar otro ciclo de cálculo. Por otro lado, el peso de la embarcación sin la estructura de mástiles y foils es la siguiente:

<b>M<sub>embarcación</sub> (kg)</b>
188,8

Tabla 94: Peso de la embarcación sin la estructura de mástiles y foils

De esta manera, se calculan las posiciones del centro de gravedad de la embarcación aplicando las ecuaciones (53), (54) y (55):

Conjunto	m <sub>i</sub> (kg)	M <sub>Li</sub> (kgxm)	M <sub>Vi</sub> (kgxm)	M <sub>Ti</sub> (kgxm)
Paneles	10,7	17,219	2,067	0
Refuerzos	4,7	3,276	0,719	0
Equipos	93,4	114,511	6,694	0
Tripulación	80,0	52,640	56,000	0
<b>Total</b>	<b>188,8</b>	<b>187,646</b>	<b>65,480</b>	<b>0,000</b>

Tabla 95: Pesos y momentos de la embarcación sin mástiles ni foils

LCG <sub>embarcación</sub> (m)	VCG <sub>embarcación</sub> (m)	TCG <sub>embarcación</sub> (m)
0,994	0,347	0

Tabla 96: Coordenadas del centro de gravedad de la embarcación sin mástiles ni foils

Posteriormente, se puede calcular la componente vertical de la embarcación incluyendo mástiles y foils de la siguiente manera:

$$V_{CG} = \frac{188,8 \times 0,347 - 3 \times 2,1 \times 0,4 - 13 \times 0,8 - 1,6 \times 0,8}{209,7} = 0,245 \text{ m}$$

Finalmente, se puede volver al archivo de Maxsurf Modeler en el que se definía la embarcación y recalculan las hidrostáticas en base a la posición vertical del centro de gravedad:

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	0,2091	t
2	Volume (displaced)	0,204	m³
3	Draft Amidships	0,129	m
4	Immersed depth	0,129	m
5	WL Length	2,783	m
6	Beam max extents on WL	1,190	m
7	Wetted Area	2,831	m²
8	Max sect. area	0,096	m²
9	Waterpl. Area	2,671	m²
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,760	
11	Block coeff. (Cb)	0,478	
12	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,628	
13	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,807	
14	LCB length	1,100	from zero pt. (+ve fwd)
15	LCF length	1,155	from zero pt. (+ve fwd)
16	LCB %	39,520	from zero pt. (+ve fwd)
17	LCF %	41,491	from zero pt. (+ve fwd)
18	KB	0,082	m
19	KG fluid	0,245	m
20	BMT	1,318	m
21	BML	6,358	m
22	GMT corrected	1,154	m
23	GML	6,195	m
24	KMt	1,399	m
25	KML	6,440	m
26	Immersion (TPc)	0,027	tonne/cm
27	MTc	0,005	tonne.m
28	RM at 1deg = GMT.Disp.sin(1)	0,004	tonne.m
29	Length:Beam ratio	2,339	
30	Beam:Draft ratio	9,223	
31	Length:Vol*0.333 ratio	4,727	
32	Precision	Medium	60 stations

Imagen 95: Hidrostáticas una vez conocido el centro de gravedad de la embarcación

### 9.3. Posición de mástiles y foils

Esta operación se va a realizar con el apoyo de la siguiente igualdad:

$$(L_{Proa} - P_{PProa} - P_{FProa}) \times x_1 = (L_{Popa} - P_{PPopa} - P_{FPopa}) \times x_2 \quad (56)$$

Donde  $L_{Proa}$  y  $L_{Popa}$  corresponden a la fuerza de sustentación de los foils de proa y popa en la condición de crucero,  $P_{PProa}$  y  $P_{PPopa}$  corresponden al peso en Newtons de los mástiles de proa y popa,  $P_{FProa}$  y  $P_{FPopa}$  corresponden al peso en Newtons de los foils de proa y popa, y finalmente  $x_1$  y  $x_2$  corresponden a la distancia entre el centro de gravedad de la embarcación y los foils de proa y de popa.

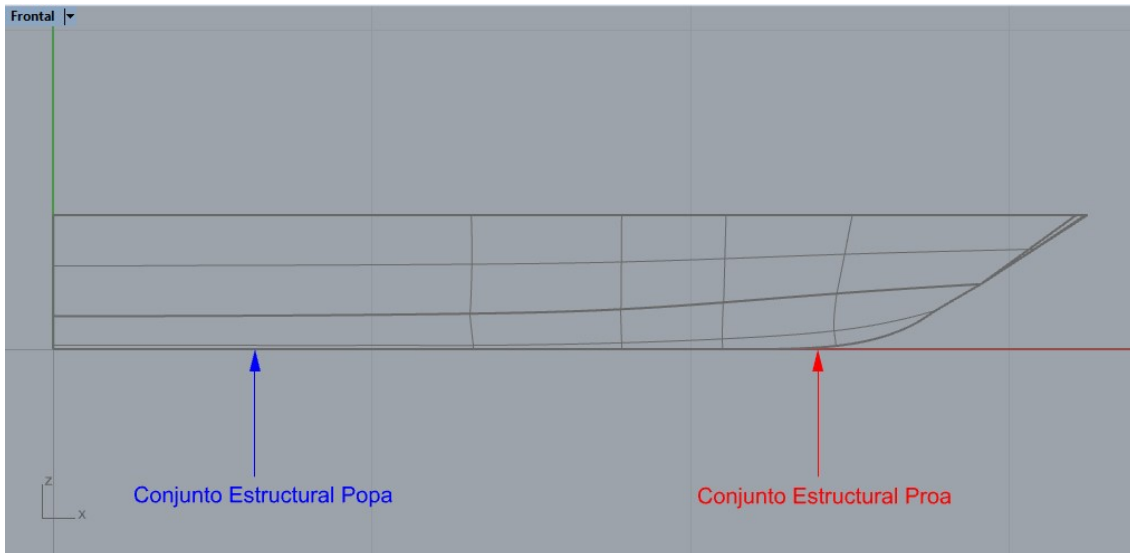
Despejando con los resultados que se han ido obteniendo desde el inicio del trabajo se obtiene:

$$(406,3 - 2,1 \times 9,81 - 1,6 \times 9,81) \times x_1 = (1616,6 - 4,2 \times 9,81 - 13 \times 9,81) \times x_2;$$

$$370x_1 = 1447,9x_2;$$

$$x_1 = 3,9x_2$$

Como se decide que el foil de proa se encuentre a 2,4 m a proa del espejo de popa, esto se traduce, partiendo de la expresión (56), en que el foil de popa se sitúe a 0,633 m a proa del espejo de popa:



*Imagen 96: Posiciones finales de los foils de proa y popa en la embarcación*

El punto inicial escogido para el conjunto de proa se debe a que es el que permite una mayor separación entre los conjuntos de proa y de popa sin tener que colocar el mástil en la curvatura que precede a la roda ni en la roda. De esta forma se navegará en la condición de crucero de manera estable. En el apartado d) del ANEXO V se puede ver mejor la distribución de estos apéndices a lo largo de la eslora.

## 10. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha pretendido proyectar el diseño de una pequeña embarcación con foils para el uso recreativo. Para ello, además de proceder a realizar un diseño como el que podría ser el de cualquier otra embarcación de recreo, ha sido necesario estudiar el principio físico de cómo se sustenta una aeronave.

En un primer paso se ha realizado una primera aproximación al diseño. Para ello, se ha estimado un primer peso de la embarcación haciendo un estudio de todos los posibles componentes a añadir. Además, se ha seleccionado la tipología de hydrofoil más adecuada para dotar a la embarcación de las funcionalidades requeridas, así como comprobado que el diseño elegido cumple con los correspondientes requerimientos hidrodinámicos y estructurales.

Posteriormente, se ha procedido al diseño de unos foils que permitiesen sustentar la embarcación fuera del agua. Esto se ha conseguido recurriendo al software gratuito JavaFoil. En él se han conseguido comparar con éxito los distintos perfiles de foil propuestos en un principio, consiguiendo de esta manera un perfil óptimo con las dimensiones necesarias.

Una vez logrado esto, se han elegido como mástiles unos perfiles NACA-16 debido a su amplio uso en este tipo de aplicaciones. Después de esto, y tras haber seleccionado un material lo suficientemente fiable para la estructura mástil-foil, se procede a comprobar su viabilidad con el software propio de la Universidad Politécnica de Cartagena MEFL. Esto se consigue tras el laborioso proceso de simular en este programa los diversos escenarios de funcionamiento que se consideran más probables.

En el momento de definir la embarcación propiamente dicha, se parte de una base de datos de embarcaciones que se pueden considerar similares y se realiza un razonamiento sobre qué formas serían las más indicadas. Utilizando esta base de datos y este razonamiento como apoyo, se predetermina una embarcación utilizando Maxsurf.

A partir de este momento, se puede estimar una planta propulsora mediante el método de Savitsky, ya que este método es el más indicado para estimar la potencia de este tipo de embarcaciones, y mediante todos los apéndices calculados anteriormente. Después se ha realizado el apartado más laborioso y largo del presente trabajo: el escantillonado. Para ello se ha recurrido a las normas ISO 12215-5 y 12215-6. Se ha finalizado el trabajo mediante la recopilación de todos los pesos calculados a lo largo del proyecto y, de esta manera, se ha concluido que se trata de una embarcación viable en la que todos los elementos han encajado correctamente.

## 11. REFERENCIAS

Airfoil Tools (2020), disponible en: [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com), consultado el 8 de septiembre de 2020.

Alexander, A.J., Grogono, J.L. and Nigg, D.J. (1972), *Hydrofoil Sailing*, Juanita Kalerghi, Londres.

Arias Padilla, J. (2019), *Apuntes de la asignatura Selección de Materiales y Corrosión*, ETS de Ingeniería Naval y Oceánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Badis, A. (2017), “Subsonic Aircraft Wing Conceptual Design Synthesis and Analysis”, *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, Vol. 35, No. 3, pp. 64-108.

Besch, P.K. (1974), *Hydroelastic Design of Subcavitating and Cavitating Hydrofoil Strut Systems*, Naval Ship Research and Development Center Bethesda, Maryland.

Besnard, E., Schmitz, A., Tzong, G., Kaups, K., Hefazi, H., Hess, J., Chen, H., and Cebeci, T. (1998), “Hydrofoil Design and Optimization for Fast Ships”, California State University, Long Beach.

Bjelke Morch, H.J. (1992), *Aspects of Hydrofoil Design; with Emphasis on Hydrofoil Interaction in Calm Water*, Norwegian Institute of Technology, Trondheim.

Carvill, J. (1994), *Mechanical Engineer’s Data Handbook*, Butterworth-Heinemann, Oxford.

Corbett, J.J. and Koehler, H.W. (2003), “Updated Emissions from Ocean Shipping”, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 103, No. D20.

Desconocido (1910), *Forlanini Idroplano* [online], disponible en: [www.aeri-italiani.net](http://www.aeri-italiani.net), consultado el 8 de septiembre de 2020.

Díaz Lorenzo, J.C. (2016), ‘La historia poco conocida del Jet-Foil en Canarias’[online], disponible en : [www.puentedemandando.com](http://www.puentedemandando.com), consultado el 9 de septiembre de 2020.

En visita de cortesía (2019), ‘El sueño de la alta velocidad en la mar’[online], disponible en: <https://envisitadecortesia.com/>, consultado el 8 de septiembre de 2020.

Faltinsen, O.M. (2005), *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*, Cambridge University Press, Nueva York.

Giallanza, A., Marannano, G., Morace, F. and Ruggiero, V.(2019), “Numerical & Experimental Analysis of a Hih Innovative Hydrofoil”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, No. 14, pp. 43-57.

Karlsson, S. and Urde, J. (2018), “Hydrofoiling Europe-Dinghy”, Lund University, Lund.

Lei, S (2015), ‘A look at the USS Aries’, disponible en: [www.columbiamissourian.com](http://www.columbiamissourian.com), consultado el 8 de septiembre de 2020

Rosado, T. (1998), “Hydrofoils”[online], disponible en: <https://web.mit.edu/>, consultado el 8 de septiembre de 2020

Savitsky, D. & Brown, P.W. (1976), "Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water", *Marine Technology*, Vol.14, No. 4, pp. 381-400.

Suastika, T. (2018), "Effects of Stern-Foil Submerged Elevation on the Lift and Drag of a Hydrofoil Craft", *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 135(1):012003.

White, F.M. (2008), *Mecánica de Fluidos*, sexta edición, McGraw-Hill Interamericana.

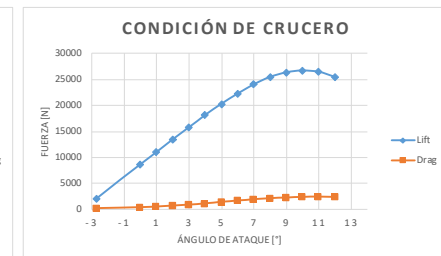
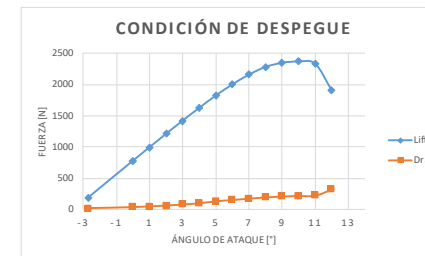
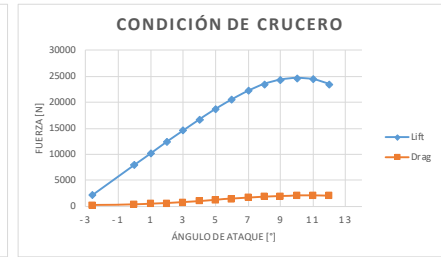
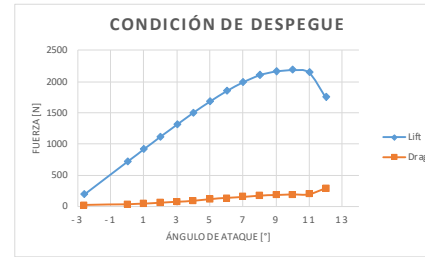
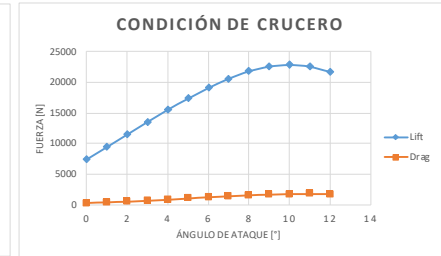
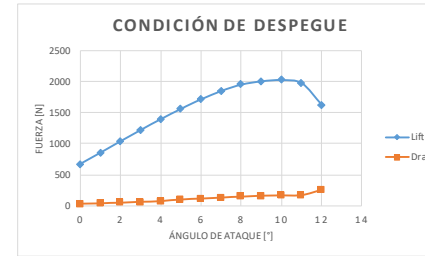
## ANEXOS

### ANEXO I. RESULTADOS DE LOS FOILS ENSAYADOS



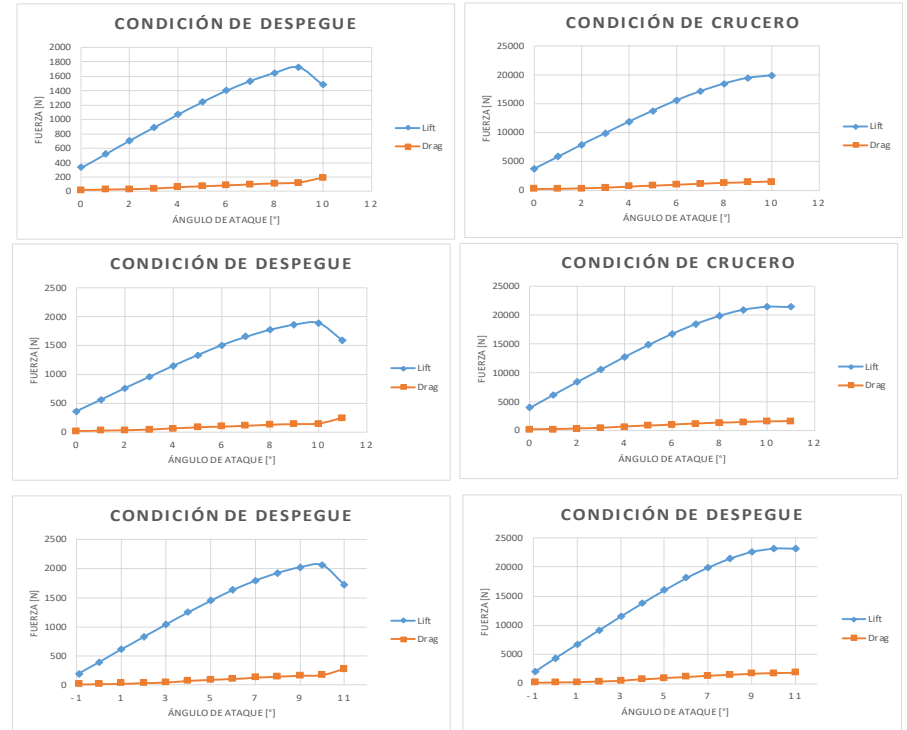
a) Resultados NACA 63-412 (foil de área total)

		CONDICIÓN DE DESPEGUE						CONDICIÓN DE CRUCERO					
		$\alpha$ [°]	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D	$\alpha$ [°]	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D
RA	5	0	0,303	0,01264	665,8	27,8	24,0	0,303	0,01171	7397,7	285,9	25,9	
A (m2)	0,45	1	0,387	0,01657	850,4	36,4	23,4	0,387	0,01565	9448,5	382,1	24,7	
c (m)	0,3	2	0,471	0,0215	1034,9	47,2	21,9	0,471	0,02052	11499,4	501,0	23,0	
Re.de.sp	8,79E+05	3	0,554	0,02688	1217,3	59,1	20,6	0,554	0,02635	13525,8	643,3	21,0	
Re.cruc	2,93E+06	4	0,635	0,0334	1395,3	73,4	19,0	0,635	0,033	15503,4	805,7	19,2	
		5	0,711	0,04518	1562,3	99,3	15,7	0,711	0,04279	17358,9	1044,7	16,6	
		6	0,781	0,05249	1716,1	115,3	14,9	0,781	0,0504	19067,9	1230,5	15,5	
		7	0,842	0,05961	1850,2	131,0	14,1	0,843	0,05729	20581,7	1398,7	14,7	
		8	0,889	0,06696	1953,4	147,1	13,3	0,893	0,06402	21802,4	1563,0	13,9	
		9	0,914	0,07176	2008,4	157,7	12,7	0,924	0,06915	22559,3	1688,3	13,4	
		10	0,922	0,07501	2025,9	164,8	12,3	0,935	0,07206	22827,8	1759,3	13,0	
		11	0,898	0,07706	1973,2	169,3	11,7	0,925	0,07301	22583,7	1782,5	12,7	
		12	0,738	0,11762	1621,6	258,4	6,3	0,89	0,07194	21729,1	1756,4	12,4	
		$\alpha$ [°]	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D	$\alpha$ [°]	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D
RA	4,5	-2,6	0,078	0,0068	190,4	16,6	11,5	0,078	0,006	2115,9	162,8	13,0	
A (m2)	0,5	0	0,293	0,01274	715,4	31,1	23,0	0,293	0,01193	7948,4	323,6	24,6	
c (m)	0,33333333	1	0,375	0,01688	915,6	41,2	22,2	0,375	0,01599	10172,8	433,8	23,5	
Re.de.sp	9,76E+05	2	0,457	0,0221	1115,8	54,0	20,7	0,457	0,02106	12397,3	571,3	21,7	
Re.cruc	3,25E+06	3	0,537	0,02803	1311,1	68,4	19,2	0,537	0,02713	14567,5	736,0	19,8	
		4	0,615	0,03437	1501,5	83,9	17,9	0,615	0,03409	16683,4	924,8	18,0	
		5	0,689	0,04637	1682,2	113,2	14,9	0,689	0,04405	18690,9	1195,0	15,6	
		6	0,757	0,05392	1848,2	131,6	14,0	0,757	0,05193	20535,5	1408,7	14,6	
		7	0,816	0,06132	1992,2	149,7	13,3	0,817	0,05966	22163,2	1618,4	13,7	
		8	0,862	0,06891	2104,6	168,2	12,5	0,866	0,06602	23492,4	1791,0	13,1	
		9	0,887	0,07384	2165,6	180,3	12,0	0,896	0,07018	24306,3	1903,8	12,8	
		10	0,895	0,07708	2185,1	188,2	11,6	0,907	0,07429	24604,7	2015,3	12,2	
		11	0,879	0,07873	2146,1	192,2	11,2	0,898	0,07515	24360,5	2038,6	11,9	
		12	0,717	0,11814	1750,5	288,4	6,1	0,864	0,07378	23438,2	2001,5	11,7	
		$\alpha$ [°]	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D	$\alpha$ [°]	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D
RA	4	-2,7	0,068	0,00661	186,8	18,2	10,3	0,068	0,00587	2075,3	179,1	11,6	
A (m2)	0,5625	0	0,283	0,01298	777,3	35,7	21,8	0,283	0,0121	8636,7	369,3	23,4	
c (m)	0,375	1	0,361	0,01715	991,5	47,1	21,0	0,361	0,01638	11017,2	499,9	22,0	
Re.de.sp	1,10E+06	2	0,44	0,02259	1208,5	62,0	19,5	0,44	0,02167	13428,1	661,3	20,3	
Re.cruc	3,66E+06	3	0,517	0,02878	1420,0	79,0	18,0	0,517	0,02797	15778,0	853,6	18,5	
		4	0,592	0,03538	1626,0	97,2	16,7	0,593	0,03538	18097,5	1079,7	16,8	
		5	0,664	0,04754	1823,8	130,6	14,0	0,664	0,04541	20264,3	1385,8	14,6	
		6	0,729	0,05539	2002,3	152,1	13,2	0,729	0,05346	22248,0	1631,5	13,6	
		7	0,786	0,06305	2158,9	173,2	12,5	0,787	0,06146	24018,0	1875,7	12,8	
		8	0,831	0,07091	2282,5	194,8	11,7	0,834	0,06804	25452,4	2076,5	12,3	
		9	0,855	0,07596	2348,4	208,6	11,3	0,863	0,07287	26337,4	2223,9	11,8	
		10	0,863	0,07921	2370,4	217,6	10,9	0,874	0,07659	26673,1	2337,4	11,4	
		11	0,85	0,08068	2334,7	221,6	10,5	0,866	0,07734	26429,0	2360,3	11,2	
		12	0,695	0,11726	1908,9	322,1	5,9	0,834	0,07569	25452,4	2309,9	11,0	



b) Resultados NACA 64-212 (foil de área total)

		CONDICIÓN DE DESPEGUE					CONDICIÓN DE CRUCERO					
		$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
RA	5	0	0,152	0,00804	334,0	17,7	18,9	0,152	0,00694	3711,0	169,4	21,9
A (m2)	0,45	1	0,237	0,01024	520,8	22,5	23,1	0,237	0,00915	5786,3	223,4	25,9
c (m)	0,3	2	0,322	0,01341	707,5	29,5	24,0	0,322	0,01222	7861,6	298,3	26,4
Re.desp	8,79E+05	3	0,405	0,0175	889,9	38,5	23,1	0,405	0,01623	9888,0	396,3	25,0
Re.cruc	2,93E+06	4	0,486	0,02601	1067,9	57,2	18,7	0,486	0,02449	11865,6	597,9	19,8
		5	0,564	0,03204	1239,3	70,4	17,6	0,564	0,0304	13769,9	742,2	18,6
		6	0,637	0,03826	1399,7	84,1	16,6	0,637	0,03624	15552,2	884,8	17,6
		7	0,699	0,04404	1535,9	96,8	15,9	0,701	0,04269	17114,8	1042,3	16,4
		8	0,75	0,05074	1648,0	111,5	14,8	0,755	0,04834	18433,2	1180,2	15,6
		9	0,786	0,05592	1727,1	122,9	14,1	0,795	0,05344	19409,7	1304,7	14,9
		10	0,674	0,08769	1481,0	192,7	7,7	0,814	0,05691	19873,6	1389,4	14,3
		$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
RA	4,5	0	0,147	0,00795	358,9	19,4	18,5	0,147	0,00692	3987,7	187,7	21,2
A (m2)	0,5	1	0,23	0,01027	561,5	25,1	22,4	0,23	0,00921	6239,3	249,8	25,0
c (m)	0,33333333	2	0,312	0,01356	761,7	33,1	23,0	0,312	0,01246	8463,8	338,0	25,0
Re.desp	9,76E+05	3	0,392	0,01778	957,1	43,4	22,0	0,392	0,01663	10634,0	451,1	23,6
Re.cruc	3,25E+06	4	0,471	0,02646	1149,9	64,6	17,8	0,471	0,02498	12777,1	677,6	18,9
		5	0,547	0,03276	1335,5	80,0	16,7	0,547	0,03115	14838,8	845,0	17,6
		6	0,617	0,03913	1506,4	95,5	15,8	0,617	0,03722	16737,7	1009,7	16,6
		7	0,678	0,04516	1655,3	110,3	15,0	0,68	0,04382	18446,7	1188,7	15,5
		8	0,727	0,05208	1775,0	127,2	14,0	0,732	0,0497	19857,3	1348,2	14,7
		9	0,763	0,05741	1862,8	140,2	13,3	0,771	0,05501	20915,3	1492,3	14,0
		10	0,775	0,06116	1892,1	149,3	12,7	0,79	0,05855	21430,7	1588,3	13,5
		11	0,649	0,10196	1584,5	248,9	6,4	0,789	0,06047	21403,619	1640,4	13,0
		$\alpha$ [°]	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
RA	4	-0,9	0,07	0,00658	192,3	18,1	10,6	0,07	0,00564	2136,3	172,1	12,4
A (m2)	0,5625	0	0,142	0,00792	390,0	21,8	17,9	0,142	0,00694	4333,6	211,8	20,5
c (m)	0,375	1	0,222	0,01031	609,8	28,3	21,5	0,222	0,00932	6775,1	284,4	23,8
Re.desp	1,10E+06	2	0,3	0,01372	824,0	37,7	21,9	0,3	0,01266	9155,5	386,4	23,7
Re.cruc	3,66E+06	3	0,378	0,01811	1038,2	49,7	20,9	0,378	0,01701	11536,0	519,1	22,2
		4	0,454	0,02696	1247,0	74,1	16,8	0,454	0,02552	13855,4	778,8	17,8
		5	0,526	0,0334	1444,7	91,7	15,7	0,527	0,03188	16083,2	972,9	16,5
		6	0,594	0,04004	1631,5	110,0	14,8	0,595	0,03818	18158,5	1165,2	15,6
		7	0,653	0,04669	1793,6	128,2	14,0	0,655	0,045	19989,6	1373,3	14,6
		8	0,701	0,05344	1925,4	146,8	13,1	0,705	0,0511	21515,5	1559,5	13,8
		9	0,736	0,05893	2021,5	161,9	12,5	0,743	0,05664	22675,2	1728,6	13,1
		10	0,75	0,06277	2060,0	172,4	11,9	0,761	0,06025	23224,6	1838,7	12,6
		11	0,626	0,10217	1719,4	280,6	6,1	0,761	0,06209	23224,6	1894,9	12,3



c) Resultados NACA 0012 (foil de área total)

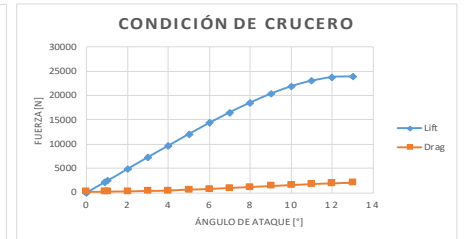
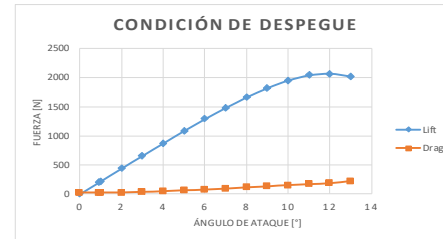
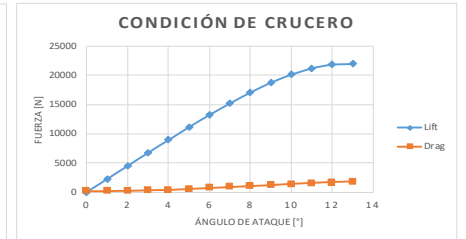
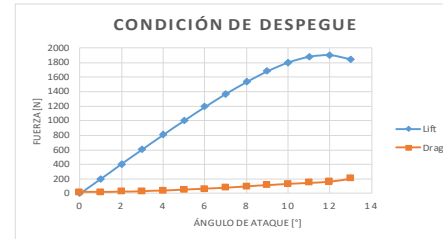
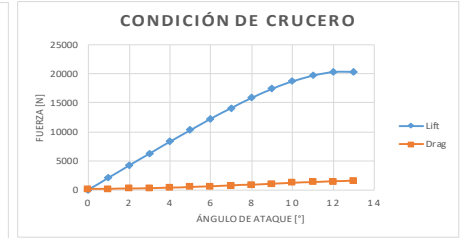
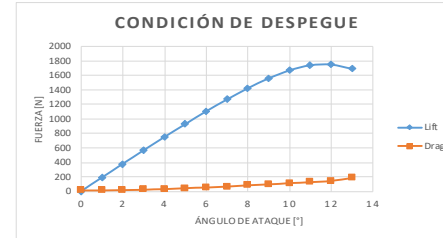
		CONDICIÓN DE DESPEGUE						CONDICIÓN DE CRUCERO								
$\alpha$ [°]		$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
RA	5	0	0	0,00791	0,0	17,4	0,0	0	0,00753	0,0	183,8	0,0	0	0,00753	0,0	183,8
A (m2)	0,45	1	0,086	0,00846	189,0	18,6	10,2	0,086	0,00808	2099,7	197,3	10,6	0,086	0,00808	2099,7	197,3
c (m)	0,3	2	0,172	0,00956	377,9	21,0	18,0	0,172	0,00967	4199,3	236,1	17,8	0,172	0,00967	4199,3	236,1
Re.desp	8,79E+05	3	0,257	0,01237	564,7	27,2	20,8	0,257	0,01247	6274,6	304,5	20,6	0,257	0,01247	6274,6	304,5
Re.cruc	2,93E+06	4	0,341	0,01653	749,3	36,3	20,6	0,341	0,01553	8325,4	379,2	22,0	0,341	0,01553	8325,4	379,2
		5	0,423	0,02159	929,5	47,4	19,6	0,423	0,02041	10327,4	498,3	20,7	0,423	0,02041	10327,4	498,3
		6	0,503	0,02675	1105,3	58,8	18,8	0,503	0,02534	12280,6	618,7	19,9	0,503	0,02534	12280,6	618,7
		7	0,578	0,0321	1270,1	70,5	18,0	0,579	0,03134	14136,2	765,2	18,5	0,579	0,03134	14136,2	765,2
		8	0,648	0,03969	1423,9	87,2	16,3	0,65	0,03701	15869,6	903,6	17,6	0,65	0,03701	15869,6	903,6
		9	0,71	0,04646	1560,1	102,1	15,3	0,714	0,0422	17432,1	1030,3	16,9	0,714	0,0422	17432,1	1030,3
		10	0,76	0,05289	1670,0	116,2	14,4	0,767	0,04995	18726,1	1219,5	15,4	0,767	0,04995	18726,1	1219,5
		11	0,793	0,05895	1742,5	129,5	13,5	0,807	0,055	19702,7	1342,8	14,7	0,807	0,055	19702,7	1342,8
		12	0,797	0,06692	1751,3	147,0	11,9	0,831	0,06035	20288,7	1473,4	13,8	0,831	0,06035	20288,7	1473,4
		13	0,771	0,08541	1694,1	187,7	9,0	0,833	0,06551	20337,5	1599,4	12,7	0,833	0,06551	20337,5	1599,4

		CONDICIÓN DE DESPEGUE						CONDICIÓN DE CRUCERO								
$\alpha$ [°]		$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
RA	4,5	0	0	0,00783	0,0	19,1	0,0	0	0,00752	0,0	204,0	0,0	0	0,00752	0,0	204,0
A (m2)	0,5	1	0,083	0,00841	202,6	20,5	9,9	0,083	0,00808	2251,6	219,2	10,3	0,083	0,00808	2251,6	219,2
c (m)	0,33333333	2	0,166	0,0096	405,3	23,4	17,3	0,166	0,00978	4503,2	265,3	17,0	0,166	0,00978	4503,2	265,3
Re.desp	9,76E+05	3	0,249	0,01246	607,9	30,4	20,0	0,249	0,01259	6754,8	341,5	19,8	0,249	0,01259	6754,8	341,5
Re.cruc	3,25E+06	4	0,33	0,01667	805,7	40,7	19,8	0,33	0,01586	8952,1	430,2	20,8	0,33	0,01586	8952,1	430,2
		5	0,41	0,02183	1001,0	53,3	18,8	0,41	0,02083	11122,3	565,1	19,7	0,41	0,02083	11122,3	565,1
		6	0,488	0,02723	1191,4	66,5	17,9	0,488	0,02666	13238,2	723,2	18,3	0,488	0,02666	13238,2	723,2
		7	0,561	0,03295	1369,7	80,4	17,0	0,562	0,03214	15245,7	871,9	17,5	0,562	0,03214	15245,7	871,9
		8	0,628	0,04059	1533,2	99,1	15,5	0,63	0,038	17090,3	1030,8	16,6	0,63	0,038	17090,3	1030,8
		9	0,689	0,04757	1682,2	116,1	14,5	0,692	0,04344	18772,2	1178,4	15,9	0,692	0,04344	18772,2	1178,4
		10	0,738	0,05419	1801,8	132,3	13,6	0,743	0,05138	20155,8	1393,8	14,5	0,743	0,05138	20155,8	1393,8
		11	0,77	0,0603	1879,9	147,2	12,8	0,783	0,05709	21240,9	1548,7	13,7	0,783	0,05709	21240,9	1548,7
		12	0,778	0,06762	1899,5	165,1	11,5	0,807	0,06199	21891,9	1681,6	13,0	0,807	0,06199	21891,9	1681,6
		13	0,756	0,08343	1845,8	203,7	9,1	0,811	0,06686	22000,4	1813,7	12,1	0,811	0,06686	22000,4	1813,7

		CONDICIÓN DE DESPEGUE						CONDICIÓN DE CRUCERO								
$\alpha$ [°]		$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D	$C_L$	$C_D$	L (N)	D (N)	L/D
RA	4	0	0	0,00776	0,0	21,3	0,0	0	0,00751	0,0	229,2	0,0	0	0,00751	0,0	229,2
A (m2)	0,5625	0,9	0,072	0,00824	197,8	22,6	8,7	0,072	0,00799	2197,3	243,8	9,0	0,072	0,00799	2197,3	243,8
c (m)	0,375	1	0,08	0,00835	219,7	22,9	9,6	0,08	0,00809	2441,5	246,9	9,9	0,08	0,00809	2441,5	246,9
Re.desp	1,10E+06	2	0,16	0,00957	439,5	26,3	16,7	0,16	0,00986	4883,0	300,9	16,2	0,16	0,00986	4883,0	300,9
Re.cruc	3,66E+06	3	0,24	0,01252	659,2	34,4	19,2	0,24	0,01281	7324,4	390,9	18,7	0,24	0,01281	7324,4	390,9
		4	0,318	0,01678	873,4	46,1	19,0	0,318	0,01617	9704,9	493,5	19,7	0,318	0,01617	9704,9	493,5
		5	0,395	0,02215	1084,9	60,8	17,8	0,395	0,02125	12054,8	648,5	18,6	0,395	0,02125	12054,8	648,5
		6	0,47	0,02771	1290,9	76,1	17,0	0,47	0,02723	14343,7	831,0	17,3	0,47	0,02723	14343,7	831,0
		7	0,54	0,03365	1483,2	92,4	16,0	0,541	0,03292	16510,5	1004,7	16,4	0,541	0,03292	16510,5	1004,7
		8	0,605	0,04164	1661,7	114,4	14,5	0,607	0,03905	18524,7	1191,7	15,5	0,607	0,03905	18524,7	1191,7
		9	0,664	0,04872	1823,8	133,8	13,6	0,666	0,04533	20325,3	1383,4	14,7	0,666	0,04533	20325,3	1383,4
		10	0,711	0,05551	1952,9	152,5	12,8	0,716	0,05284	21851,2	1612,6	13,6	0,716	0,05284	21851,2	1612,6
		11	0,743	0,0617	2040,8	169,5	12,0	0,754	0,05871	23010,9	1791,7	12,8	0,754	0,05871	23010,9	1791,7
		12	0,753	0,06845	2068,2	188,0	11,0	0,778	0,06368	23743,4	1943,4	12,2	0,778	0,06368	23743,4	1943,4
		13	0,736	0,08189	2021,5	224,9	9,0	0,784	0,0683	23926,5	2084,4	11,5	0,784	0,0683	23926,5	2084,4

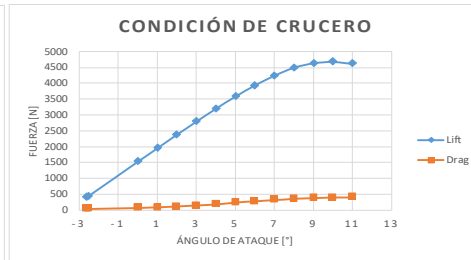
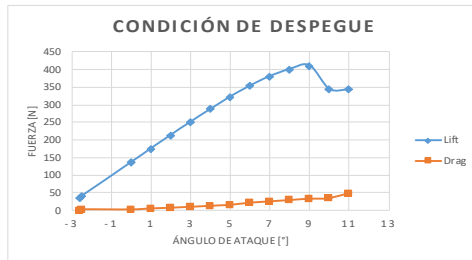


d) Resultados foils finales

FOIL PROA	
NACA	63-412
RA	4,5
b (m)	0,657
c (m)	0,146
A (m2)	0,096
Re.despegue	4,28E+05
Re.crucero	1,43E+06

	Condición Despegue	Condición Crucero
$\alpha$ (°)	9	-2,6
Cl	0,878	0,078
L (N)	411,6	406,3
Co	0,07585	0,00647
D (N)	35,6	33,7
L/D	11,6	12,1

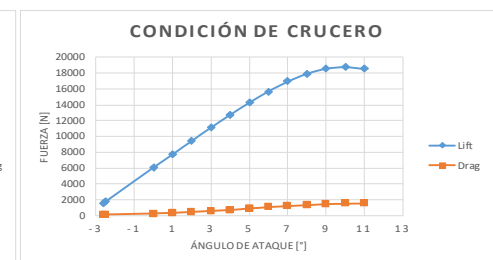
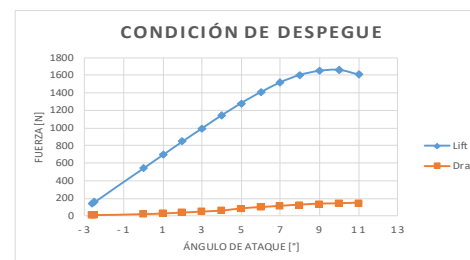
$\alpha$ [°]	CONDICIÓN DE DESPEGUE						CONDICIÓN DE CRUCERO					
	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D		Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D	
-2,6	0,078	0,00813	36,6	3,8	9,6	0,078	0,00647	406,3	33,7	12,1		
-2,5	0,087	0,00822	40,8	3,9	10,6	0,087	0,00657	453,1	34,2	13,2		
0	0,293	0,0142	137,3	6,7	20,6	0,293	0,01248	1526,1	65,0	23,5		
1	0,375	0,01835	175,8	8,6	20,4	0,375	0,01647	1953,2	85,8	22,8		
2	0,457	0,02312	214,2	10,8	19,8	0,457	0,02168	2380,3	112,9	21,1		
3	0,537	0,02914	251,7	13,7	18,4	0,537	0,02773	2797,0	144,4	19,4		
4	0,615	0,03598	288,3	16,9	17,1	0,615	0,03396	3203,2	176,9	18,1		
5	0,689	0,04797	323,0	22,5	14,4	0,689	0,04553	3588,6	237,1	15,1		
6	0,756	0,05573	354,4	26,1	13,6	0,757	0,05307	3942,8	276,4	14,3		
7	0,813	0,06424	381,1	30,1	12,7	0,816	0,06088	4250,1	317,1	13,4		
8	0,856	0,07099	401,3	33,3	12,1	0,864	0,06806	4500,1	354,5	12,7		
9	0,878	0,07585	411,6	35,6	11,6	0,891	0,07299	4640,8	380,2	12,2		
10	0,735	0,10588	344,5	49,6	6,9	0,899	0,07609	4682,4	396,3	11,8		
11	0,733	0,11601	343,6	54,4	6,3	0,887	0,07745	4619,9	403,4	11,5		



FOIL POPA	
NACA	63-412
RA	4,5
b (m)	1,311
c (m)	0,291
A (m2)	0,382
Re.despegue	8,53E+05
Re.crucero	2,84E+06

	Condición Despegue	Condición Crucero
$\alpha$ (°)	9	-2,6
Cl	0,886	0,078
L (N)	1652,6	1616,6
Co	0,07416	0,00602
D (N)	138,3	124,8
L/D	11,9	13,0

$\alpha$ [°]	CONDICIÓN DE DESPEGUE						CONDICIÓN DE CRUCERO					
	Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D		Cl	Co	L (N)	D (N)	L/D	
-2,6	0,078	0,00697	145,5	13,0	11,2	0,078	0,00602	1616,6	124,8	13,0		
-2,5	0,087	0,00706	162,3	13,2	12,3	0,087	0,00612	1803,1	126,8	14,2		
0	0,293	0,01292	546,5	24,1	22,7	0,293	0,01197	6072,6	248,1	24,5		
1	0,375	0,01702	699,5	31,7	22,0	0,375	0,01607	7772,0	333,1	23,3		
2	0,457	0,02214	852,4	41,3	20,6	0,457	0,02116	9471,5	438,6	21,6		
3	0,537	0,0278	1001,7	51,9	19,3	0,537	0,02722	11129,6	564,1	19,7		
4	0,615	0,03456	1147,2	64,5	17,8	0,615	0,03412	12746,1	707,2	18,0		
5	0,689	0,04667	1285,2	87,1	14,8	0,689	0,04428	14279,8	917,7	15,6		
6	0,757	0,05425	1412,0	101,2	14,0	0,757	0,05215	15682,2	1080,8	14,5		
7	0,816	0,06168	1522,1	115,1	13,2	0,817	0,05933	16932,7	1229,6	13,8		
8	0,861	0,06922	1606,0	129,1	12,4	0,865	0,06632	17927,5	1374,5	13,0		
9	0,886	0,07416	1652,6	138,3	11,9	0,896	0,07161	18570,0	1484,1	12,5		
10	0,893	0,07747	1665,7	144,5	11,5	0,906	0,07455	18777,2	1545,1	12,2		
11	0,863	0,0798	1609,7	148,9	10,8	0,896	0,07548	18570,0	1564,4	11,9		



## ANEXO II. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONJUNTO MÁSTIL-FOIL

a) Análisis del conjunto estructural de proa (despegue)

Profundidad (m) 0,34

DESPLAZAMIENTOS CONJUNTO PROA (DESPEGUE)									
Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,24E-06	0,00E+00	-4,13E-03	-8,48E-04	0,00E+00	-4,13E-03	-8,46E-04	0,00E+00
3	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,13E-03	-8,48E-04	0,00E+00	-4,13E-03	-8,39E-04	0,00E+00
4	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,13E-03	-8,48E-04	0,00E+00	-4,13E-03	-8,39E-04	0,00E+00

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,24E-06	0,00E+00	-4,16E-03	-8,54E-04	0,00E+00	-4,16E-03	-8,52E-04	0,00E+00
3	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,16E-03	-8,54E-04	0,00E+00	-4,16E-03	-8,45E-04	0,00E+00
4	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,16E-03	-8,54E-04	0,00E+00	-4,16E-03	-8,45E-04	0,00E+00

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,24E-06	0,00E+00	-4,19E-03	-8,59E-04	0,00E+00	-4,19E-03	-8,57E-04	0,00E+00
3	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,19E-03	-8,59E-04	0,00E+00	-4,19E-03	-8,50E-04	0,00E+00
4	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,19E-03	-8,59E-04	0,00E+00	-4,19E-03	-8,50E-04	0,00E+00

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,24E-06	0,00E+00	-4,21E-03	-8,63E-04	0,00E+00	-4,21E-03	-8,61E-04	0,00E+00
3	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,21E-03	-8,63E-04	0,00E+00	-4,21E-03	-8,54E-04	0,00E+00
4	0,00E+00	9,00E-06	0,00E+00	-4,21E-03	-8,63E-04	0,00E+00	-4,21E-03	-8,54E-04	0,00E+00

Profundidad (m) 0,49

Profundidad (m) 0,64

Profundidad (m) 0,78

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,63E+05
Modelo Lateral	7,49E+06
<b>Total</b>	<b>8,25E+06</b>

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,63E+05
Modelo Lateral	7,56E+06
<b>Total</b>	<b>8,32E+06</b>

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,63E+05
Modelo Lateral	7,62E+06
<b>Total</b>	<b>8,38E+06</b>

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,63E+05
Modelo Lateral	7,68E+06
<b>Total</b>	<b>8,44E+06</b>

b) Análisis del conjunto estructural de proa (crucero)

Profundidad (m) 0,15

DESPLAZAMIENTOS CONJUNTO PROA (CRUCERO)											
Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)				
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z		
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
2	0,00E+00	2,27E-06	0,00E+00	-4,11E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,11E-03	2,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	
3	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,11E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,11E-03	8,56E-06	0,00E+00	0,00E+00	
4	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,11E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,11E-03	8,56E-06	0,00E+00	0,00E+00	

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,27E-06	0,00E+00	-4,27E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,27E-03	2,02E-06	0,00E+00
3	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,27E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,27E-03	8,56E-06	0,00E+00
4	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,27E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,27E-03	8,56E-06	0,00E+00

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,27E-06	0,00E+00	-4,48E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,48E-03	2,02E-06	0,00E+00
3	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,48E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,48E-03	8,56E-06	0,00E+00
4	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,48E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,48E-03	8,56E-06	0,00E+00

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	2,27E-06	0,00E+00	-4,67E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,67E-03	2,02E-06	0,00E+00
3	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,67E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,67E-03	8,56E-06	0,00E+00
4	0,00E+00	8,81E-06	0,00E+00	-4,67E-03	-2,53E-07	0,00E+00	-4,67E-03	8,56E-06	0,00E+00

Profundidad (m) 0,3

Profundidad (m) 0,45

Profundidad (m) 0,6

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,46E+05
Modelo Lateral	7,30E+06
<b>Total</b>	<b>8,05E+06</b>

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,46E+05
Modelo Lateral	7,64E+06
<b>Total</b>	<b>8,39E+06</b>

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,46E+05
Modelo Lateral	8,11E+06
<b>Total</b>	<b>8,85E+06</b>

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,46E+05
Modelo Lateral	8,61E+06
<b>Total</b>	<b>9,36E+06</b>

c) Análisis del conjunto estructural de popa (despegue)

9

Profundidad (m) 0,34

DESPLAZAMIENTOS CONJUNTO POPA (DESPEGUE)									
Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,97E-06	1,04E-08	-7,99E-03	-1,64E-03	0,00E+00	-7,99E-03	-1,63E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,97E-06	-1,04E-08	-7,99E-03	-1,64E-03	0,00E+00	-7,99E-03	-1,63E-03	-1,04E-08
5	0,00E+00	7,45E-06	1,04E-08	-7,99E-03	-1,64E-03	0,00E+00	-7,99E-03	-1,63E-03	1,04E-08
6	0,00E+00	7,45E-06	-1,04E-08	-7,99E-03	-1,64E-03	0,00E+00	-7,99E-03	-1,63E-03	-1,04E-08

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,89E+05
Modelo Lateral	1,45E+07
<b>Total</b>	<b>2,97E+07</b>

Profundidad (m) 0,49

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,97E-06	1,04E-08	-8,02E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,02E-03	-1,64E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,97E-06	-1,04E-08	-8,02E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,02E-03	-1,64E-03	-1,04E-08
5	0,00E+00	7,45E-06	1,04E-08	-8,02E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,02E-03	-1,64E-03	1,04E-08
6	0,00E+00	7,45E-06	-1,04E-08	-8,02E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,02E-03	-1,64E-03	-1,04E-08

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,89E+05
Modelo Lateral	1,45E+07
<b>Total</b>	<b>2,98E+07</b>

Profundidad (m) 0,64

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,97E-06	1,04E-08	-8,04E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,04E-03	-1,64E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,97E-06	-1,04E-08	-8,04E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,04E-03	-1,64E-03	-1,04E-08
5	0,00E+00	7,45E-06	1,04E-08	-8,04E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,04E-03	-1,64E-03	1,04E-08
6	0,00E+00	7,45E-06	-1,04E-08	-8,04E-03	-1,65E-03	0,00E+00	-8,04E-03	-1,64E-03	-1,04E-08

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,89E+05
Modelo Lateral	1,46E+07
<b>Total</b>	<b>3,00E+07</b>

Profundidad (m) 0,78

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,97E-06	1,04E-08	-8,06E-03	-1,66E-03	0,00E+00	-8,06E-03	-1,65E-03	1,04E-08
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,97E-06	-1,04E-08	-8,06E-03	-1,66E-03	0,00E+00	-8,06E-03	-1,65E-03	-1,04E-08
5	0,00E+00	7,45E-06	1,04E-08	-8,06E-03	-1,66E-03	0,00E+00	-8,06E-03	-1,65E-03	1,04E-08
6	0,00E+00	7,45E-06	-1,04E-08	-8,06E-03	-1,66E-03	0,00E+00	-8,06E-03	-1,65E-03	-1,04E-08

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,89E+05
Modelo Lateral	1,47E+07
<b>Total</b>	<b>3,01E+07</b>



d) Análisis del conjunto estructural de popa (crucero)

Profundidad (m) 0,15

DESPLAZAMIENTOS CONJUNTO POPA (CRUCERO)									
Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,99E-06	9,54E-09	-7,54E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,54E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,99E-06	-9,54E-09	-7,54E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,54E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	0,00E+00	7,53E-06	9,54E-09	-7,54E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,54E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	0,00E+00	7,53E-06	-9,54E-09	-7,54E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,54E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,67E+05
Modelo Lateral	1,34E+07
<b>Total</b>	<b>2,75E+07</b>

Profundidad (m) 0,3

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,99E-06	9,54E-09	-7,71E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,71E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,99E-06	-9,54E-09	-7,71E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,71E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	0,00E+00	7,53E-06	9,54E-09	-7,71E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,71E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	0,00E+00	7,53E-06	-9,54E-09	-7,71E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,71E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,67E+05
Modelo Lateral	1,37E+07
<b>Total</b>	<b>2,82E+07</b>

Profundidad (m) 0,45

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,99E-06	9,54E-09	-7,91E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,91E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,99E-06	-9,54E-09	-7,91E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,91E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	0,00E+00	7,53E-06	9,54E-09	-7,91E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,91E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	0,00E+00	7,53E-06	-9,54E-09	-7,91E-03	0,00E+00	0,00E+00	-7,91E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,67E+05
Modelo Lateral	1,42E+07
<b>Total</b>	<b>2,91E+07</b>

Profundidad (m) 0,6

Puntos	Desplazamientos Modelo Frontal (m)			Desplazamientos Modelo Lateral (m)			Desplazamientos Totales (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z	Eje x	Eje y	Eje z
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	8,99E-06	9,54E-09	-8,11E-03	0,00E+00	0,00E+00	-8,11E-03	8,99E-06	9,54E-09
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	8,99E-06	-9,54E-09	-8,11E-03	0,00E+00	0,00E+00	-8,11E-03	8,99E-06	-9,54E-09
5	0,00E+00	7,53E-06	9,54E-09	-8,11E-03	0,00E+00	0,00E+00	-8,11E-03	7,53E-06	9,54E-09
6	0,00E+00	7,53E-06	-9,54E-09	-8,11E-03	0,00E+00	0,00E+00	-8,11E-03	7,53E-06	-9,54E-09

Tensión Von Mises (Pa)	
Modelo Frontal	7,67E+05
Modelo Lateral	1,47E+07
<b>Total</b>	<b>3,01E+07</b>

## ANEXO III. CÁLCULO DE LA POTENCIA MEDIANTE EL MÉTODO DE SAVITSKY

V (nudos)	6
$\nabla$ (m3)	0,204
Smojada	2,919
Lwl	2,783
Bpx	1,19
ie	31,4
AT	0,096
AX	0,096
$\beta$	12,7
LCB	1,1
CI0/ $\tau$ 1.1	0,06
$\lambda$	2,2

Cv	0,90341321
p/b	0,92436975

$\tau$	4,27558548
Fn $\nabla$	1,3
$\lambda\kappa$	2,6
Lwl/Bpx	2,3

Coeficientes (Fn $\nabla$ =1,3)	
A1	0,03475
A2	0
A4	-0,00978
A5	-0,05097
A6	-0,2188
A7	0,10434
A8	0,4351
A9	-0,00198
A10	0,04113
A15	0
A18	-0,92663
A19	1,06392
A24	0,02209
A27	-0,00105

Rn <sub>base</sub>	106269736,9
Rn	8152342,273

X	0,211525883
Z	0,121056826
U	7,924645102
W	1
(RT / $\Delta$ ) <sub>base</sub>	0,089562364
C <sub>F</sub> <sub>base</sub>	0,002065114
CA	0
C' <sub>F</sub>	0,003109363
(RT / $\Delta$ ) <sub>corr</sub>	0,096818377
RT (N)	198,6007288
P (W)	613,0208697

Resistencia total (N)	Potencia (W)
198,60	<b>613,02</b>

## ANEXO IV. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL ESCANTILLONADO DE LA EMBARCACIÓN

a) Resultados del escantollinado de paneles

Parámetros iniciales					
m <sub>loc</sub> (kg)	L (m)	L <sub>wl</sub> (m)	B <sub>c</sub> (m)	β <sub>c</sub> (°)	V (nudos)
210	3,247	2,783	1,166	10,6	20

Presiones fondo																		
Panel	l (mm)	b (mm)	k <sub>dc</sub>	n <sub>cg</sub>	P <sub>BMD</sub> BASE (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMP</sub> BASE (kN/m <sup>2</sup> )	Ad	Ad <sub>máx</sub>	K <sub>R</sub> desp	K <sub>R</sub> plan	K <sub>AR</sub> desp	K <sub>AR</sub> plan	x (m)	x/L <sub>wl</sub>	K <sub>L</sub>	P <sub>BMD</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMD</sub> MIN (kN/m <sup>2</sup> )
1	750	603	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,45225	0,9090225	1,3191	1	0,37324762	0,28295627	0,375	0,134746676	0,746345775	3,790069691	4,849409086	3,62939305
2	750	599	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,44925	0,8970025	1,3203	1	0,37433384	0,28352181	1,124	0,403880704	0,893076556	4,54839167	5,814395622	3,62939305
3	750	536	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,402	0,71824	1,3392	1	0,39256404	0,29313325	1,859	0,66798419	1	5,3409756	6,731231077	3,62939305
4	750	252	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,189	0,15876	1,4244	1	0,55175024	0,38735625	2,5	0,898311175	1	7,506761312	8,894877852	3,62939305

Espesores fondo					
Panel	P (kN/m <sup>2</sup> )	K <sub>s</sub>	K <sub>c</sub>	σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	t <sub>min</sub> (mm)
1	4,84940909	0,39744898	1	73,03	3,09778854
2	5,81439562	0,3998117	1	73,03	3,37952927
3	6,73123108	0,43536709	1	73,03	3,39538625
4	8,89487785	0,5	1	73,03	1,96654952

Laminado fondo			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Total	2	1,71	3,42

Masa mínima fondo					
A	k <sub>s</sub>	k <sub>c</sub>	k <sub>r</sub>	w <sub>MIN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
	1,5	0,9	0,03	0,15	1,151649183

Presiones costado																						
Panel	l (mm)	b (mm)	k <sub>dc</sub>	n <sub>cg</sub>	P <sub>BMD</sub> BASE (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMP</sub> BASE (kN/m <sup>2</sup> )	Ad	Ad <sub>máx</sub>	K <sub>R</sub> desp	K <sub>R</sub> plan	K <sub>AR</sub> desp	K <sub>AR</sub> plan	x (m)	x/L <sub>wl</sub>	K <sub>L</sub>	P <sub>BMD</sub> BASE (kN/m <sup>2</sup> )	h (mm)	k <sub>c</sub>	P <sub>BMD</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMD</sub> MIN (kN/m <sup>2</sup> )	
5	850	319	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,27115	0,2544025	1,4043	1	0,4722113	0,33626099	0,424	0,15235358	0,755944985	15,57405	292	146	0,5	3,54020462	1,083622825	1,00188
6	850	313	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,26605	0,2449225	1,4061	1	0,47823405	0,34011383	1,273	0,45742005	0,92226599	15,57405	292	146	0,5	4,3741985	1,337186411	1,00188
7	850	308	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,2618	0,23716	1,4076	1	0,48339229	0,34341595	2,129	0,7650018	1	15,57405	292	155	0,469178082	4,68414675	1,505602297	1,00188
8	850	265	0,4	4,02923613	34,0134029	22,9630421	0,22525	0,1755625	1,4205	1	0,53388117	0,37584032	2,868	1,03054258	1	15,57405	292	190	0,349315068	4,70139899	1,824950366	1,00188

Espesores costado					
Panel	P (kN/m <sup>2</sup> )	K <sub>s</sub>	K <sub>c</sub>	σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	t <sub>min</sub> (mm)
5	1,08362282	0,5	1	73,03	0,86888862
6	1,33718641	0,5	1	73,03	0,94705383
7	1,50560229	0,5	1	73,03	0,98887228
8	1,82495037	0,5	1	73,03	0,93671129

Laminado costado			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Total	1	1,71	1,71

Masa mínima costado					
A	k <sub>s</sub>	k <sub>c</sub>	k <sub>r</sub>	w <sub>MIN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
	1,5	0,9	0	0,15	0,919449183

Presiones cubierta																	
Panel	l (mm)	b (mm)	k <sub>dc</sub>	n <sub>cg</sub>	P <sub>BMD</sub> BASE (kN/m <sup>2</sup> )	Ad	Ad <sub>máx</sub>	K <sub>R</sub> desp	K <sub>R</sub> plan	K <sub>AR</sub> desp	K <sub>AR</sub> plan	x (m)	x/L <sub>wl</sub>	K <sub>L</sub>	P <sub>BMD</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	P <sub>BMD</sub> MIN (kN/m <sup>2</sup> )	S
9	750	564	0,4	4,02923613	15,57405	0,423	0,79524	1,3308	1	0,38418781	0,28868936	2,109	0,757815307	1	1,798425037		5
10	750	328	0,4	4,02923613	15,57405	0,246	0,26896	1,4016	1	0,47607618	0,33966622	2,8	1,006108516	1	2,115991496		5

Espesores cubierta					
Panel	P (kN/m <sup>2</sup> )	K <sub>s</sub>	K <sub>c</sub>	σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	t <sub>min</sub> (mm)
9	0,42000682	0,5	1	73,03	3,0244167
10	0,246	0,5	1	73,03	1,91908052

Laminado cubierta			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Total	2	1,71	3,42

espesor mínimo cubierta		
k <sub>s</sub>	l <sub>MIN</sub>	
0,9	1,655658	

b) Resultados del escantillonado de refuerzos

Mamparo Estanco										
l (mm)	b (mm)	h (m)	hB (m)	P (kN/m <sup>2</sup> )	Kz	Kc	σ <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	t <sub>min</sub> (mm)		
990	421	0,421	0,281	1,964666667		0,5	1	73,03	1,54404832	

Laminado Mamparo Estanco			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>1,71</b>	<b>1,71</b>

Espejo Popa			
t <sub>espejo</sub> (mm)	t <sub>st</sub> (mm)	t <sub>st</sub> (mm)	t <sub>st</sub> (mm)
35	1,91	2,05	

Masa minima espejo de popa					
A	k <sub>s</sub>	k <sub>r</sub>	k <sub>a</sub>	w <sub>MIN</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
1,5	0,9	0	0,15	0,91944918	

Laminado Tint/Text			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	<b>1,5</b>	<b>1,71</b>	<b>2,565</b>

Quilla															
l <sub>u</sub> (mm)	s (mm)	P (kN/m <sup>2</sup> )	k <sub>SA</sub>	k <sub>CS</sub>	σ <sub>uf</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ε <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	k <sub>1S</sub>	Etc	f <sub>1</sub>	SM (cm <sup>3</sup> )	SMQUILLA (cm <sup>3</sup> )	A <sub>w</sub> (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	
2740	47	7,34	5		1	142,08	102,6	54,4	0,05	9250	0,91497748	2,10353172	0,87345397	0,04606458	3,98939664

wQUILLA MIN (kg/m <sup>2</sup> )
2,533628202

wCODILLO MIN (kg/m <sup>2</sup> )
1,957803611

Laminado codillo			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>1,71</b>	<b>3,42</b>

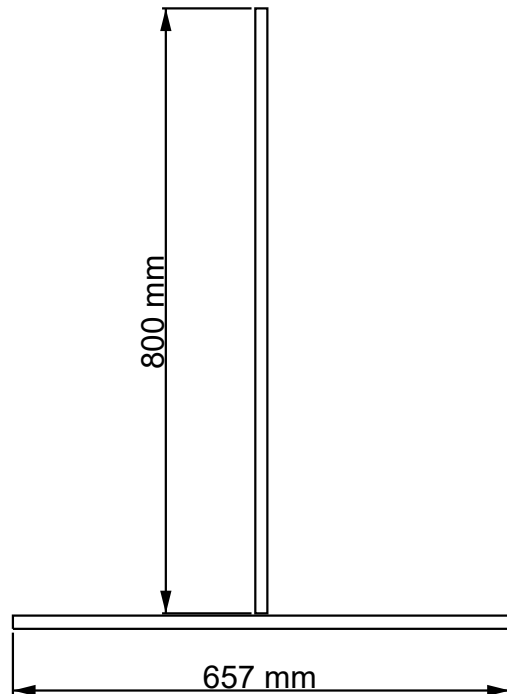
wRODA MIN (kg/m <sup>2</sup> )
2,303298366

Laminado roda			
Capa	w (kg/m <sup>2</sup> )	t/w	t (mm)
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
Mat	0,2	-	-
Roving	0,3	-	-
<b>Total</b>	<b>2,5</b>	<b>1,71</b>	<b>4,275</b>

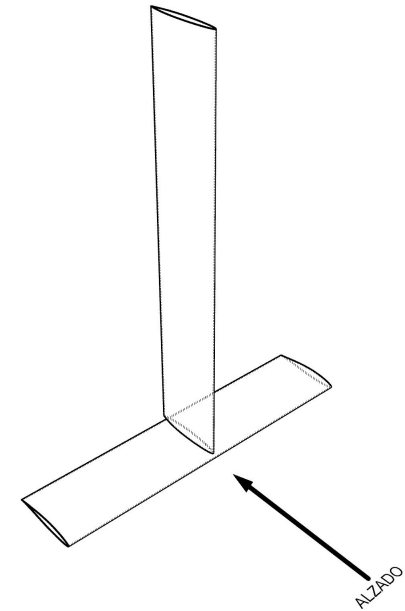
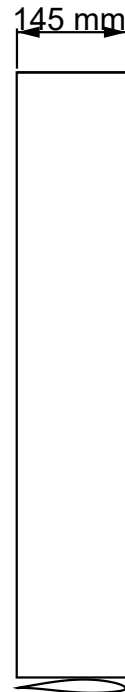
## ANEXO V. PLANOS Y ESQUEMAS

- a) Conjuntos estructurales de proa y de popa

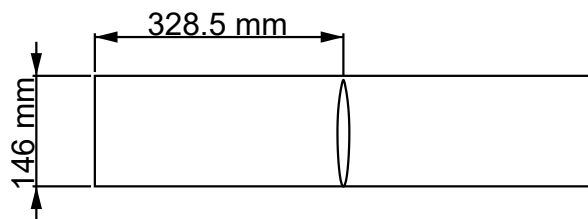
## ALZADO



## PERFIL



## PLANTA



GINÉS GARCÍA IMBERNÓN

ESCALA 1:10

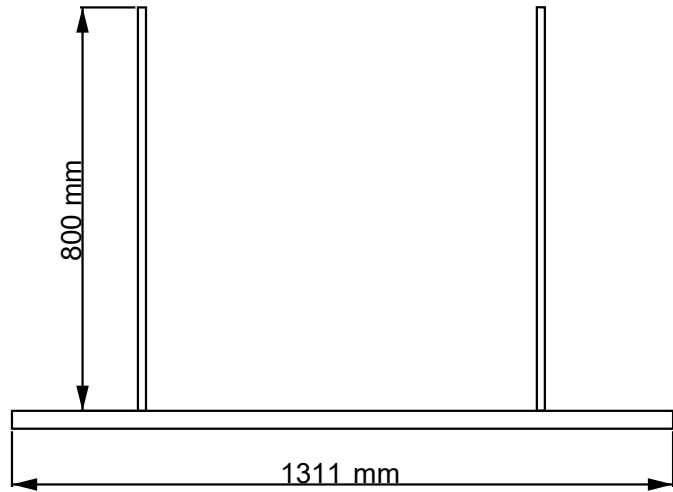
FECHA:  
23/10/2020

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
CARTAGENA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA

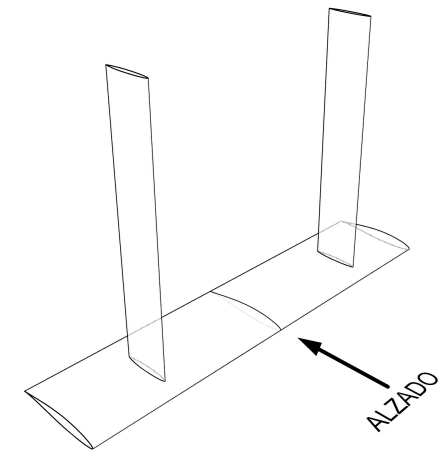
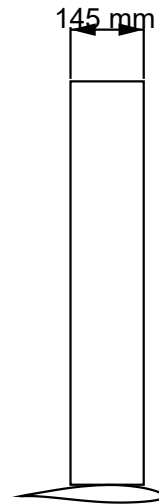
**CONJUNTO  
ESTRUCTURAL DE PROA**



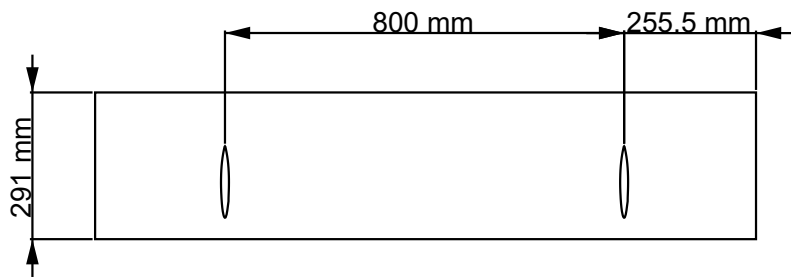
ALZADO



PERFIL

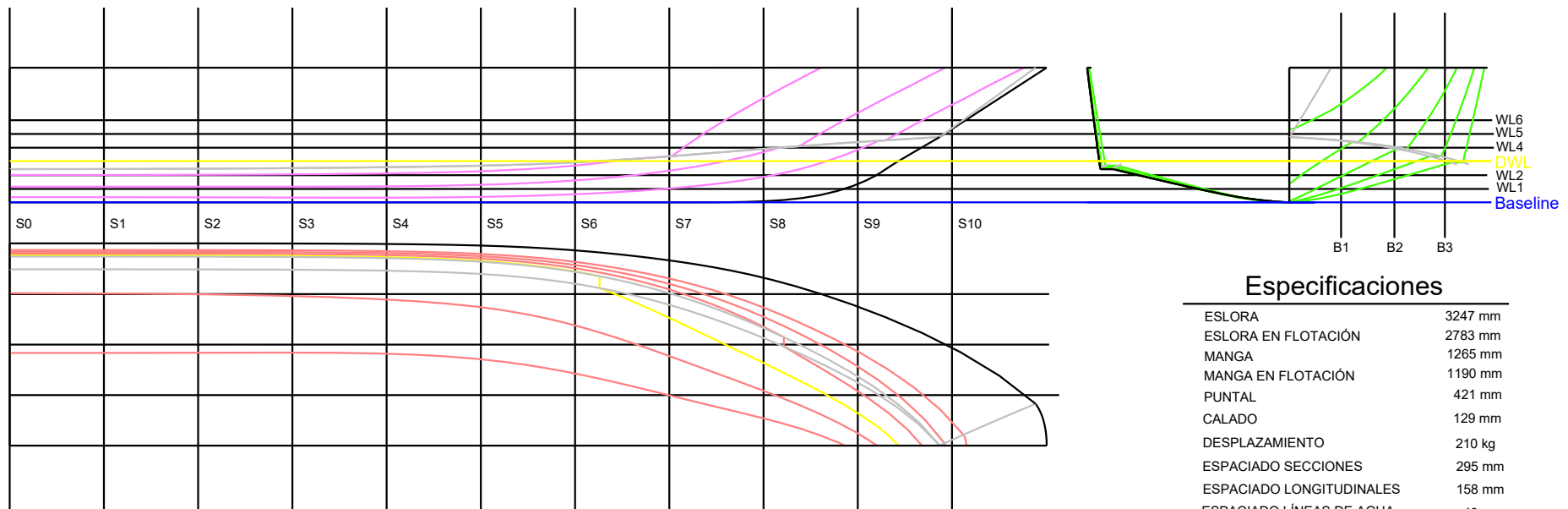


PLANTA



GINÉS GARCÍA IMBERNÓN		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
ESCALA 1:15	FECHA: 23/10/2020	<b>CONJUNTO ESTRUCTURAL DE POPA</b>

b) Plano de formas



### Especificaciones

ESLORA	3247 mm
ESLORA EN FLOTACIÓN	2783 mm
MANGA	1265 mm
MANGA EN FLOTACIÓN	1190 mm
PUNTAL	421 mm
CALADO	129 mm
DESPLAZAMIENTO	210 kg
ESPACIADO SECCIONES	295 mm
ESPACIADO LONGITUDINALES	158 mm
ESPACIADO LÍNEAS DE AGUA	43 mm

GINÉS GARCÍA IMBERNÓN

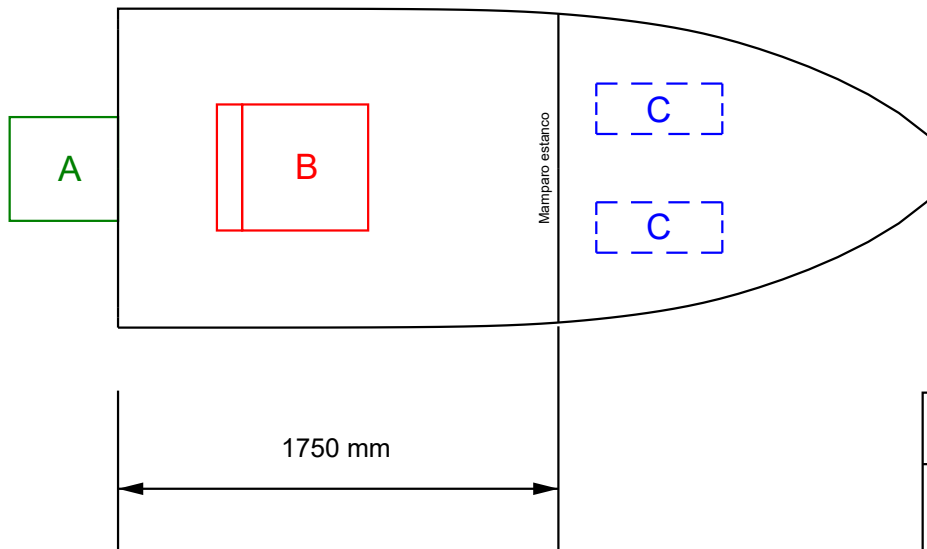
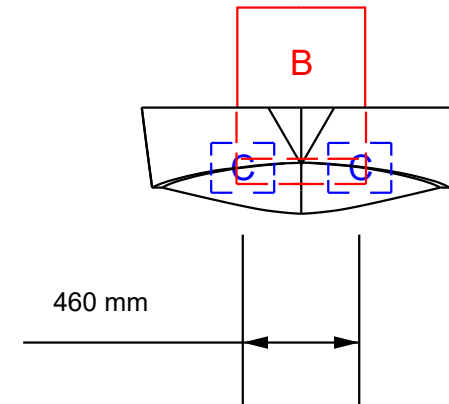
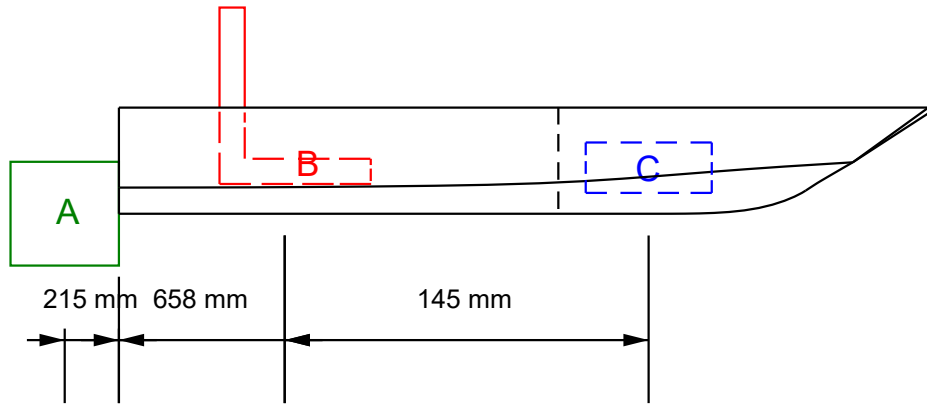
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
CARTAGENA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA

ESCALA 1:20

FECHA:  
23/10/2020

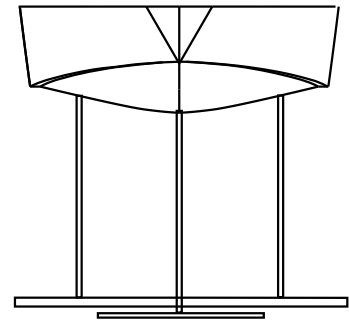
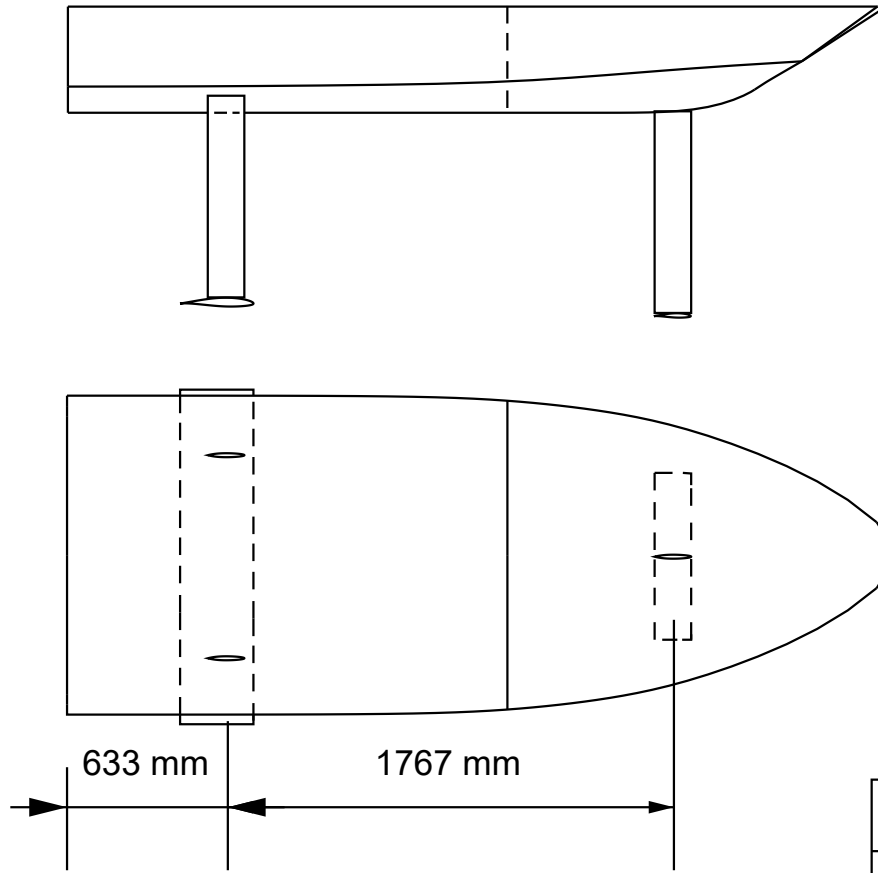
**PLANO DE FORMAS**

c) Primera disposición general orientativa



<b>GINÉS GARCÍA IMBERNÓN</b>		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
<b>ESCALA 1:30</b>	FECHA: 23/10/2020	<b>PRIMERA DISPOSICIÓN GENERAL ORIENTATIVA</b>

d) Disposición de los apéndices a lo largo de la eslora de la embarcación



<b>GINÉS GARCÍA IMBERNÓN</b>		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
<b>ESCALA 1:30</b>	FECHA: 23/10/2020	<b>DISPOSICIÓN DE APÉNDICES A LO LARGO DE LA ESLORA</b>