



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Naval

ADAPTACIÓN DE TABLA DE SUP BOARD PARA PERSONAS EN SITUACIÓN DE SILLA DE RUEDAS

Proyecto para optar al título de:

Ingeniero Naval

Mención: Arquitectura Naval
& Máquinas Marinas

Profesor Patrocinante:

Sr. Cristian Cifuentes Salazar

Lic. Ing. Naval, Ph. D.

EDGARDO ROQUE ALEJANDRO FUENTES JIMÉNEZ

VALDIVIA-CHILE

2018

Este Proyecto ha sido sometido para su aprobación a la comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

El Proyecto aprobado, junto con la nota del examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de **Ingeniero Naval**, menciones: **Arquitectura Naval & Máquinas Marinas**.

EXAMEN DE TÍTULO

Nota de Presentación	(Ponderada) (1)	: _____
Nota de Examen	(Ponderada) (2)	: _____
Nota Final de Titulación	(1+2)	: _____

COMISIÓN EXAMINADORA

..... Decano Firma
..... Examinador Firma
..... Examinador Firma
..... Examinador Firma
..... Secretario Académico (A) Firma

Valdivia,.....

$$\text{Nota Presentación} = \text{NC/NA} * 0,6 + \text{Nota de Tesis} * 0,2$$

$$\text{Nota Final} = \text{Nota de Presentación} + \text{Nota Examen} * 0,2$$

NC = Sumatoria de Notas de Currículo, sin Tesis.

NA = Número de Asignaturas Cursadas y Aprobadas, incluida Práctica Profesional

Agradecimientos

Todos mis agradecimientos son a mis padres y hermana, sin ellos, y su constante motivación y apoyo incondicional no estaría en estas instancias.

Especial dedicatorio para mi padre que, desde su descanso eterno, sé que me siempre me acompaña y uno de sus deseos sería verme acabar esta etapa de mi vida.

Mención especial a todos los amigos y grandes personas que encontré en este camino, a también a los de toda la vida.

Además, destacar la labor de las personas que colaboraron con su grano de arena en la construcción del prototipo y a CONAV SpA, especialmente don Hugo Díaz, por facilitarme un taller, en cuyo espacio pude trabajar y desarrollar el prototipo.

1 Índice

1	Índice	4
2	Resumen	6
3	Abstract	6
4	Introducción	7
5	SUP	8
5.1	Orígenes del SUP.....	8
5.2	Características principales del SUP.....	9
6	Base estadística de discapacitados en Chile	9
6.1	Grados de discapacidad.....	11
6.2	Distribución de las deficiencias por tipo.....	12
6.3	Discapacidad y condición de salud general.....	12
6.4	Dificultades para el desempeño de actividades.....	13
6.5	Uso de silla de ruedas.....	13
6.6	Discapacidad y uso del tiempo libre.....	14
7	Proyectos existentes	14
7.1	Onit Ability Board.....	15
7.2	La silla adaptada de Albin Bayona.....	16
8	Modelos propuestos	17
8.1	Modelo I: quillas de balance.....	17
8.2	Modelo II: flotadores laterales.....	18
8.3	Modelo III: Quilla de bulbo.....	19
8.3.1	<i>Definición de las dimensiones del modelo III</i>	20
9	Estudio de estabilidad y equilibrio	22
9.1	Revisión teórica.....	22
9.1.1	<i>Condición de equilibrio normal</i>	23
9.2	Centros de gravedad.....	28
9.3	Condiciones de carga.....	30
9.4	Resumen de resultados de los casos.....	32
9.4.1	<i>Caso 1</i>	32
9.4.2	<i>Caso 2</i>	34
9.4.3	<i>Caso 3</i>	36
9.4.4	<i>Caso 4</i>	38
9.4.5	<i>Caso 5</i>	40

9.4.6	Caso 6.....	42
9.4.7	Caso 7.....	44
9.4.8	Caso 8.....	46
9.4.9	Caso 9.....	48
9.4.10	Caso 10.....	50
9.4.11	Caso 11.....	52
9.4.12	Caso 12.....	54
9.4.13	Caso 13.....	56
9.4.14	Caso 14.....	58
9.4.15	Caso 15.....	60
10	Modelo seleccionado.....	62
11	Construcción del modelo.....	62
11.1	Característica general del prototipo.....	63
11.2	Dimensiones principales y construcción.....	63
11.2.1	Estabilizadores.....	63
11.2.2	Marcos.....	67
11.2.3	Sujetador tabla – silla de ruedas.....	70
11.3	Cálculo estructural.....	72
11.3.1	Condición de carga de flotador.....	72
11.3.2	Cálculo estructural del marco.....	76
11.4	Análisis de estabilidad.....	82
11.4.1	Redefinición de Centros de gravedad de la estructura.....	82
11.4.2	Comportamiento en el río.....	88
12	Conclusión.....	89
13	Bibliografía.....	90
1	Anexos.....	91
1.1	Anexo 1.....	91
1.2	Anexo 2.....	92
1.3	Anexo 3.....	93

2 Resumen

Se presentan tres modelos con características distintas entre sí, para adaptar una tabla de Stand Up Paddle Board (SUP board), para una persona en situación de silla de ruedas. A partir de estos tres modelos se deberá estudiar la estabilidad y equilibrio presentado por cada uno de los modelos. Según las características entregadas por cada uno de éstos se seleccionará el modelo más seguro y factible de ser construido para llevar a cabo su construcción.

Dentro de los objetivos principales se encuentran, definir parámetros de funcionamiento en cuanto a capacidad de flotación, estabilidad y equilibrio. Además de dejar un producto tangible y que pueda ser utilizado o incluso replicado por personas en condición de silla de ruedas que puedan llegar al astillero de la Universidad Austral de Chile, creando una universidad más inclusiva dónde todos puedan participar.

3 Abstract

Three models with different characteristics are presented to adapt a Stand Up Paddle Board (SUP board) for a person in a wheelchair. From these three models, the stability and balance presented by each of the models should be studied. According to the characteristics delivered by each of the models, the safest and most feasible model to be built to carry out its construction will be selected.

Among the main objectives are to define performance parameters in terms of flotation capacity, stability and balance. In addition to materialize a product that can be used or even replicated by people in wheelchair condition who can reach the shipyard of the Universidad Austral de Chile, creating a more inclusive university where everyone can participate.

4 Introducción

En la actualidad las personas en situación de discapacidad se ven enfrentados a una serie de obstáculos e impedimentos que les dificultan llevar una vida normal sin complejidades extras a las que ya se ven condicionados por su propia discapacidad. Calles, edificios, accesos en general, no fueron diseñados para personas en condición de silla de ruedas. Dada esta problemática, por medio de este proyecto se busca acercar a las personas en condición de silla de ruedas a un ambiente que por naturaleza es una zona de exclusión para personas en situación de discapacidad, como es el medio acuático.

El objetivo de este proyecto es presentar una alternativa válida, adaptando o modificando una tabla de SUP board, para que una persona en condición de silla de ruedas pueda utilizarla, sin correr riesgos de volcamiento y con autonomía en su uso.

El SUP board es un deporte que en los últimos años ha tomado fuerza mundial, organizándose campeonatos mundiales y regionales. Lo más cercano a esto es la competencia realizada en la comuna de Valdivia, sobre el río Calle - Calle cada verano, evento de convocatoria internacional. Es por esta razón que las personas en situación de discapacidad no pueden seguir manteniéndose al margen de tendencias deportivas mundiales como esta.

5 SUP

El Stand Up Paddle, más conocido como por su sigla SUP es un deporte variante del surfing, el cual se categoriza como deporte de deslizamiento; es decir, consiste en deslizarse sobre una superficie, con o sin ayuda de elementos adicionales. En el caso del SUP el deslizamiento se logra erguido sobre una tabla y mediante la ayuda de un único remo. Se diferencia del surfing en que para practicar el SUP no se necesitan olas, ya que la propulsión es generada a partir del desplazamiento de una masa de agua mediante el uso del remo. De esta forma el SUP presenta mayor versatilidad a la hora de ser usado, gracias a que puede ser usado en mar abierto, bahías, lagos o ríos. Además, por el hecho de ir de pie sobre la tabla, ofrece un mayor ángulo de visión y perspectiva del entorno, permitiendo principalmente dos cosas: disfrutar de un viaje y su ambiente mientras practicas deporte.

5.1 Orígenes del SUP

El origen del Stand Up Paddle se remonta unos 3000 años a.C. a esta embarcación se le conocía como Caballito de Totora, Figura 1, y era construida con tallos y hojas de totora. Su principal uso era en faenas de pesca marina en el Perú. Esta embarcación es el primer registro que se tiene de una persona remando de pie sobre una embarcación.



Figura 1 - Navegante en un caballito de totora

Otros registros indican que, en paralelo a los caballitos de totora, en Egipto y Venecia también remaban a pie, sin embargo, al igual que como lo hacían los Incaicos, las embarcaciones distaban bastante de una tabla de surf. Esto se debe principalmente al hecho de que eran utilizados con fines prácticos como la pesca, por sobre fines recreativos o deportivos.

En la actualidad, y hasta el antes del siglo XX, no hay registro que evidencien la práctica del SUP en Hawái, fuente del origen surf, ni en ningún otro lugar.

El primer registro del SUP moderno surge a comienzos del siglo XX, Duke Kahanamoku, padre del Surf moderno, decide innovar sumando a la condición de surf un remo, con el cual comienza a tomar olas remando de pie sobre una tabla tipo surf. Posterior a esto y a comienzo de los 60 John Zapotocky surfeaba de pie con un remo. John siempre aseguró que su inspiración para incluir un remo en el surf fue Duke Kahanamoku. Finalmente, el último gran innovador fue Pop Ahoj en la década de los 60 y 70 quien optó por remar de pie debido al dolor de rodillas que lo aquejaba. Finalmente, ya en el año 2002, una foto de Laird Hamilton, Figura 2, surfeando olas con SUP da la vuelta al mundo. Esta foto representa el paso definitivo del SUP como experiencias propias de unos pocos, a ser usado por millones de personas en todo el mundo unos años después [1].



Figura 2 - Laird Hamilton practicando SUP board

5.2 Características principales del SUP

Dentro de las principales características como deporte, el SUP pertenece a la Federación Española de Surf, dentro de esta entidad hay un departamento exclusivo para esta modalidad deportiva. Además, existen competencias internacionales de la categoría.

6 Base estadística de discapacitados en Chile

Según el Censo 2002, se identificó que un 2,2% de la población presenta una o más discapacidades totales y severas, este porcentaje corresponde a 334.377 personas con discapacidad. Dicho censo consideró como “discapacitados” a las personas que presentaron ceguera total, sordera total, mudéz, lisiado/parálisis y deficiencia mental.

Por otra parte, según la encuesta CASEN 2003 del Ministerio de Planificación, se identificó que un 3,6% de la población en Chile presenta a lo menos una discapacidad, esto corresponde a 565.913 personas. Esta cifra se obtiene al consultar a las personas si declaran tener alguna deficiencia como puede ser: deficiencias para oír, para ver, para hablar, deficiencia de carácter mental, física o psiquiátrica.

Otro método para determinar el porcentaje de personas discapacitadas en Chile es la Encuesta de Calidad de Vida y Salud del Ministerio de Salud, desarrollada el año 2000 en conjunto con el Instituto Nacional de Estadísticas. Esta encuesta arroja un dato rotundamente superior a los datos del CENSO Y CASEN, señalando que un 21,7% de la población presenta alguna discapacidad, esto corresponde a 3.292.296 de personas que declaran tener al menos un tipo de discapacidad. Sin embargo, el concepto utilizado en este método fue identificar discapacidades sensoriales y del habla, discapacidades para la realización de actividades de la vida cotidiana y discapacidades que requieran utilización de órtesis.

Finalmente, según el Segundo Estudio Nacional de la Discapacidad 2015, el 12,9% de los chilenos y chilenas viven con discapacidad, lo que indica que 2.068.072 personas se encuentran en esta condición. Esto nos indica que 1 de cada 8 personas presenta esta condición, Gráfico 1.



Gráfico 1 - Prevalencia nacional de la discapacidad de Chile

6.1 Grados de discapacidad

El Gráfico 3 indica que, del total de las personas discapacitadas, un 7,2% presenta un grado leve de discapacidad; un 3,2% moderado y un 2,5% severo.

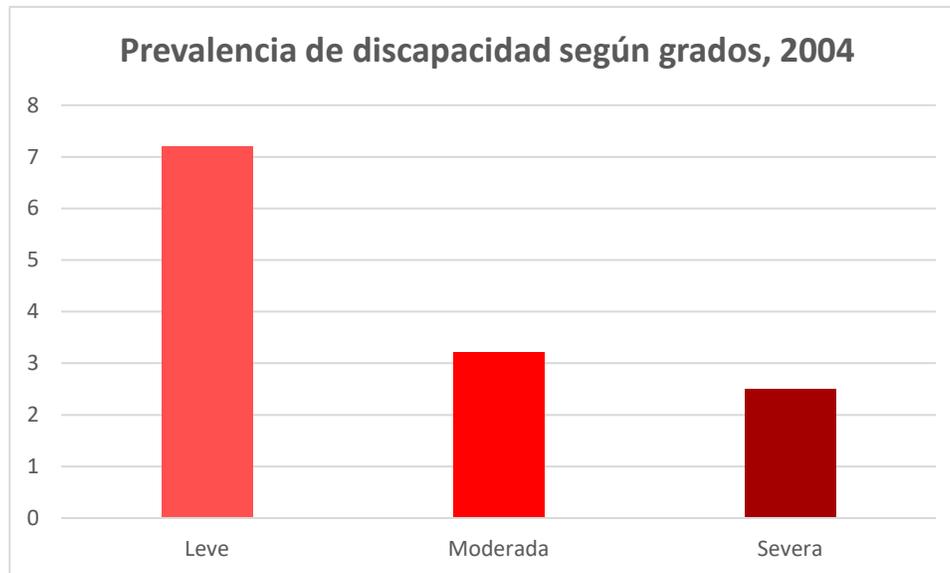


Gráfico 3 – Prevalencia de discapacidad según grados en Chile, 2004

Esto quiere decir:

- 1.150.133 personas presentan alguna dificultad para llevar a cabo actividades de la vida diaria, sin embargo, la persona es independiente y no requiere apoyo de terceros y puede superar obstáculos del entorno (discapacidad leve).
- 513.997 personas una disminución o imposibilidad importante de su capacidad para realizar la mayoría de las actividades de la vida diaria, llegando incluso a requerir apoyo en labores básicas de auto cuidado y superar con dificultades sólo algunas barreras del entorno (discapacidad moderada).
- 403.942 personas por su discapacidad severa ven gravemente dificultada o imposibilitada la realización de sus actividades cotidianas, requiriendo del apoyo o cuidados de una tercera persona y no logra superar las barreras del entorno; o lo hacen con gran dificultad.

6.2 Distribución de las deficiencias por tipo

El Gráfico 4 muestra la distribución de los tipos de deficiencias en las personas que presentan discapacidad. De este modo, la deficiencia más predominante es la de carácter físico (movilidad, parálisis, amputaciones, etc.), ésta representa un 31,3% de las deficiencias en las personas con discapacidad.

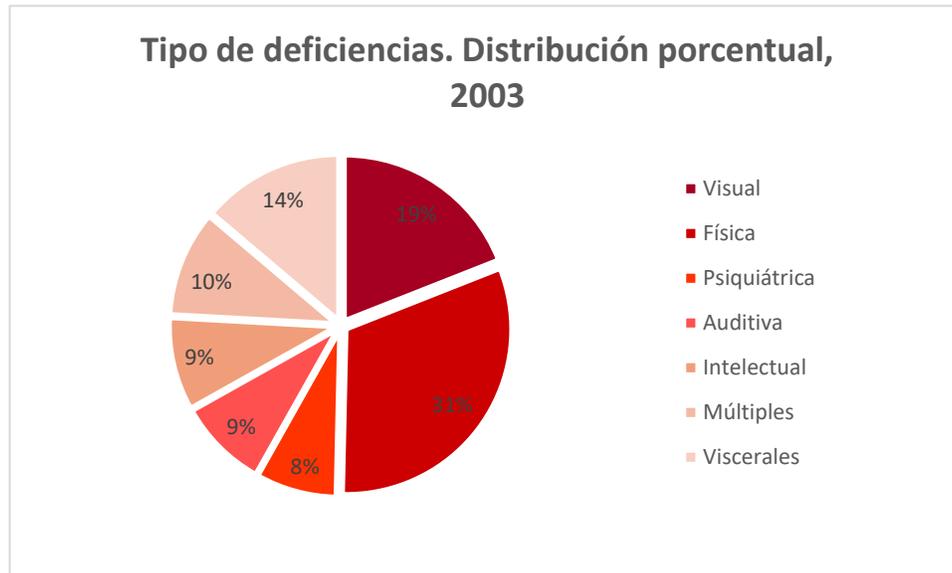


Gráfico 4 - Tipo de deficiencias. Distribución porcentual. Chile 2003

Las deficiencias del tipo Visceral corresponden a daños graves del sistema respiratorio, cardíaca, digestivo, genitourinario, hematopoyético y endocrino. Además, cabe destacar que en el grupo de deficiencias Múltiples incluye a aquellas personas que presentan 3 o más deficiencias.

6.3 Discapacidad y condición de salud general

Tabla 1 - Discapacidad en Chile, según estado de salud percibido. Tasa por 100 habitantes, 2004

Estado de salud	PcD ¹	Tasa x 100 (PcD)	Población Total
Mala salud	1.649.234	42,8	3.848.525
Buena salud	418.838	3,4	12.150.348
Total	2.068.072	129	15.998.873

Las personas con discapacidad que expresan un estado de salud positivo son de sólo un 3,4%, mientras que las personas que expresan tener un estado de salud negativo alcanzan un 42,8%, Tabla 1. Esto nos indica que sólo 1 de cada 5 personas presenta una condición de salud buena. Esta gran diferencia de percepciones es un indicador de lo necesario que es tomar acciones con programas para

¹ PcD: Personas con discapacidad

mejorar o palear este tipo de índices. Una de las formas que se proponen por medio de este trabajo es promocionar un estilo de vida saludable por medio del deporte inclusivo.

6.4 Dificultades para el desempeño de actividades

El mayor impacto de las dificultades físicas es en la limitación de actividades recreativas con un 9,81%, seguido de la limitación social con un 8,08%; luego de la limitación en actividades domésticas con un 5,8%; posteriormente en la limitación de actividades de auto cuidado con un 5,27%, después de la limitación para trabajar con un 3,32% y finalmente el estudio con un 0,67%.

Tabla 2 - Limitación de actividades según dificultades. Porcentajes en población total. Chile 2004

Dificultades	Recreación	Participación	Auto cuidado	Actividad doméstica	Estudio	Trabajo remunerado
					5 años y más	15 años y más
		Población total				
Físicas	9,81%	8,08%	5,27%	5,85%	0,67	3,32%
Visión	9,57%	6,01%	2,81%	3,76%	1,45%	3,18%
Audición	3,38%	3,58%	1,29%	1,09%	0,30%	1,00%
Intelectuales	2,53%	2,77%	1,54%	1,10%	0,70%	0,48%
Psíquicas	1,83%	1,73%	1,04%	0,72%	0,23%	0,38%
Comunicación	1,02%	1,11%	0,68%	0,24%	0,18%	0,13%

Analizando la Tabla 2 se observa que las actividades recreativas se encuentran limitadas en primer lugar por las siguientes dificultades: físicas, en un 9,81%; visión, 9,57%; audición, en un 3,38%; intelectuales, en un 2,5%; psíquicas, en un 1,83% y de comunicación, en un 1,02%. Esto refuerza la idea de que las deficiencias físicas en personas en condición de discapacidad son notoriamente superiores que las demás deficiencias.

6.5 Uso de silla de ruedas

Según la Tabla 3, se aprecia que un 2,74% de las personas con discapacidad utiliza silla de ruedas siendo sólo superado por la ayuda técnica de los bastones.

Tabla 3 - Personas con discapacidad según tipo de ayuda técnica que utiliza. Distribución porcentual. Chile 2004

	N	%Pd
Bastones	163.672	7,91%
Silla de ruedas	56.650	2,74%
Muletas	22.996	1,11%
Andador	14.185	0,69%
Bastón guiador	13.703	0,66%
Software computacional adaptado	0	0,00%
Tablero Braille	667	0,03%
Otro tipo de ayuda técnica	40.203	1,94%
Total		15,09%

6.6 Discapacidad y uso del tiempo libre

Las principales actividades realizadas por las personas en condición de discapacidad en su tiempo libre son: ver televisión, escuchar radio, escuchar música, conversar con amigos y salir de paseo. Sólo un 10,58% de hacen deporte. Por lo cual es necesario motivar la implementación de equipos adaptados para personas en este tipo de condición, entregándoles así la oportunidad de entretenerse y sociabilizar.

Tabla 4 - Personas con discapacidad y el uso del tiempo libre. Chile 2004

	N	
Ve TV	1.7171.397	83,04%
Escucha radio	1.511.044	73,07%
Escucha música	1.315.864	63,63%
Conversa con amigos	1.273.927	61,60%
Sale de paseo	1.014.125	49,04%
Hace manualidades	706.928	34,18%
Lee	701.738	33,93%
En fiestas, bailes	312.809	15,13%
Practica deportes	218.824	10,58%
Usa computador	175.842	8,50%
Bebe	172.317	8,33%
Navega por internet	94.554	4,57%
Con nada	90.382	4,37%

Dadas todas las condiciones anteriores, se evidencia que aproximadamente tres millones de personas en Chile presentan alguna discapacidad, de los cuales un 31,3% corresponde a discapacidad física, y dónde sólo 1 de cada 5 personas en esta condición presenta una condición de salud *buena*. Se presenta como la mayor de sus dificultades las actividades físicas recreativas y sociales.

Un 2,74% de las personas en situación de discapacidad utiliza silla de ruedas. Y sólo un 10,58% realiza algún deporte. Por lo tanto, dados todos estos antecedentes se demuestra la necesidad de este grupo minoritario de tener acceso a recrearse, hacer deporte, disfrutar y competir, y por qué no, en un medio tradicionalmente más distante que cualquier otro para una persona en situación de discapacidad como es el medio ambiente acuático [2]

7 Proyectos existentes

En la actualidad es posible encontrar alrededor del mundo un par de ideas, ya realizadas y funcionando, que permiten en la inclusión de personas en condición de silla de ruedas en el Paddle Surf.

7.1 Onit Ability Board

La primera de estas soluciones nace en California, Estados Unidos, *Onit Ability Board* es el nombre del proyecto creado por Kawika Watt. *Onit Ability Board* presenta dos variaciones que nacen a partir de una misma tabla de SUP [3], la cual está diseñada para recibir una silla de ruedas sobre ella.

La característica principal de esta tabla es que presenta una ranura en su superficie la cual permite ubicar la silla de ruedas sobre ella, Figura 3. Además, mediante el acople dispuesto en popa y proa de la tabla permite instalar un estabilizador en cada banda, Figura 4, lo cual se traduce en un aumento de estabilidad, brindando mayor seguridad que la tabla de la Figura 3.



Figura 3 - Onit Ability Board, tabla adaptada

De acuerdo con la Figura 3, en rojo se muestran las adaptaciones que presenta esta tabla. En 1 se encuentra el acople dispuesto en popa y proa para permitir la instalación de los estabilizadores. En 2 se muestra la ranura especial para recibir una silla de ruedas sobre su superficie.



Figura 4 - Onit Ability Board con estabilizadores

El valor de mercado de una tabla del tipo Onit Ability Board, es de U\$5.300 dólares.

7.2 La silla adaptada de Albin Bayona

Albin Bayona es actualmente un deportista de élite con paraplejía, uno de los surfistas de la categoría adaptada, más importantes del mundo. Antes de caer en su condición de paraplejía, Albin era un adicto a los deportes extremos, es por eso que tras su accidente y perder la movilidad de sus piernas fue una motivación extra para crear una silla, Figura 5 y Figura 6, que es capaz de instalarse en cualquier tabla de SUP board, entre las características principales de esta silla son su facilidad de transportarse, y su fácil instalación. Sólo necesita un par de eslingas para amarrarla a la tabla, Figura 6. Entre sus desventajas se encuentran la poca estabilidad que entrega y la necesidad de práctica en un sector custodiado por acompañantes en caso de volcamiento [4].



Figura 5 - Silla adaptada amarrada a la tabla SUP



Figura 6 - Silla adaptada

8 Modelos propuestos

A continuación, se presentan tres modelos distintos, de los cuales se realizará un estudio de equilibrio y estabilidad para 15 condiciones de carga distintas, véase

Estudio de estabilidad y equilibrio. A partir de las conclusiones de los estudios se obtendrá el modelo a construir.

8.1 Modelo I: quillas de balance

El primero de los modelos, Anexo 1 en la página 91 y Figura 7, se ideó pensando en la estabilidad que podrían proporcionar un par de quillas de balance ubicadas en una sección a lo largo de la tabla. Si bien el objetivo de este tipo de quillas en una embarcación es disminuir el movimiento de roll, se busca observar que influencia puede tener sobre la estabilidad, en comparación a una tabla sin modificaciones y con una persona en silla de ruedas sobre ella. Un factor importante a favor de este modelo es el bajo costo que tendría implementar este mecanismo, pues sólo se trata de un perfil del tipo T, que se fijaría a la tabla.

En la Tabla 5 se presenta el peso a partir de las áreas obtenidas en Rhinoceros®, multiplicadas por el espesor, además para efectos prácticos se considera como densidad del acero 8.000 kg/m³. De este modo el Peso aportado por las dos quillas será de 30,6 kg.

En la Tabla 6 se presentan el centro de gravedad de las quillas determinado con Rhinoceros®.

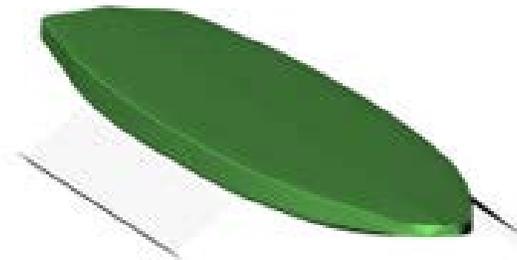


Figura 7 - Modelo I

Tabla 5 - Peso de una quilla de balance

Ítem	Área [mm ²]	espesor [mm]	Volumen [m ³]	Peso [kg]
Alma	366.100	4	1,5E-03	11.715
Ala	112.796	4	4,5E-04	3.609
			Σ	15,3

Tabla 6 – Posición centro de gravedad de las quillas de balance

Ítem	LCG	VCG
	[cm]	[cm]
Quillas balance	180	-5,3

8.2 Modelo II: flotadores laterales

El segundo de los modelos, Anexo 2 en la página 92 y Figura 8, consta de un par de flotadores laterales que entregarán mayor estabilidad a la tabla. Este modelo en parte se basa en el proyecto ya existente Onit Ability Board, Figura 4, sin embargo, la variación que tendrá es que será un mecanismo que se ajustará a la tabla, evitando tener que crear una tabla especial para silla de ruedas. Otra diferencia con respecto al modelo de la Figura 4, es que los flotadores se podrán rotar en un cierto ángulo rotando con respecto a su eje de fijación, esto será pensado en que un usuario a medida que toma más experiencia en la práctica deportiva podrá rotar los flotadores hasta en 90° con respecto a la horizontal disminuyendo la estabilidad y entregándole mayor autonomía al usuario.

Considerando que los flotadores serían de fibra de vidrio o algún plástico vacío en su interior o con refuerzos de peso ligero como cartón rígido, su peso no será mayor a 2 kg, sin embargo, por concepto de estructura sobre la que se montaría la silla y los flotadores, Figura 8, además de pernos, se le designará un peso de 9,8 kg, considerando una estructura de acero con densidad 8.000 kg/m³. En la Tabla 8 se presenta el centro de gravedad del mecanismo determinado con Rhinoceros ®.

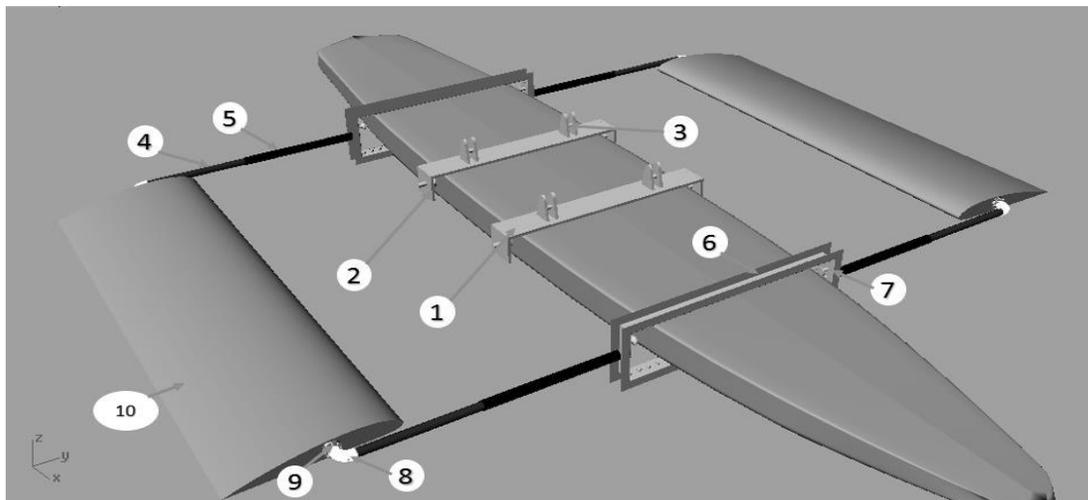


Figura 8 –Modelo II y partes de la posible estructura de soporte y montaje

Tabla 7 - Detalle cálculo peso estructura y flotadores

Ítem	Área [mm ²]	Cantidad	Área [m ²]	Espesor [m]	Volumen [m ³]	Peso [kg]
1	161343	2	0,161	0,003	0,00048	3,9
2	2400	4	0,002	0,003	0,00001	0,1
3	9316	8	0,009	0,003	0,00003	0,2
4	38597	4	0,039	0,001	0,00004	0,3
5	39522	4	0,040	0,001	0,00004	0,3
6	79936,17	4	0,080	0,003	0,00024	1,9
7	19830	4	0,020	0,003	0,00006	0,5
8	6325	4	0,006	0,001	0,00001	0,1
9	3043	4	0,003	0,003	0,00001	0,1
10		2				1,5
Pernos y Tuercas		10				1,0
Total						9,8

Tabla 8 – Posición centro de gravedad flotadores

Ítem	LCG [cm]	VCG [cm]
Quillas balance	171,5	8,7

8.3 Modelo III: Quilla de bulbo

El tercer modelo, Anexo 3 en la página 93 y Figura 9, para asegurar la estabilidad del sistema se equipará con un quillote, o quilla de bulbo, cuyo peso y dimensión serán definidos mediante un estudio de estabilidad preliminar, esto para definir el peso necesario a llevar en el bulbo de la quilla para el caso más desfavorable de los casos presentados en la sección



Figura 9 - Modelo III

8.3.1 Definición de las dimensiones del modelo III

Para determinar las dimensiones y peso de la quilla de bulbo se utiliza la siguiente consideración: se define una longitud máxima de quillote sumergido, Figura 10, donde se define esta zona de seguridad aquella donde un acompañante puede ayudar a equilibrar al usuario de la tabla hasta que pueda desplegar el quillote para navegar con seguridad, ésta distancia se considera hasta el pecho de la persona acompañante, considerando una altura máxima del quillote de 1,3 m.

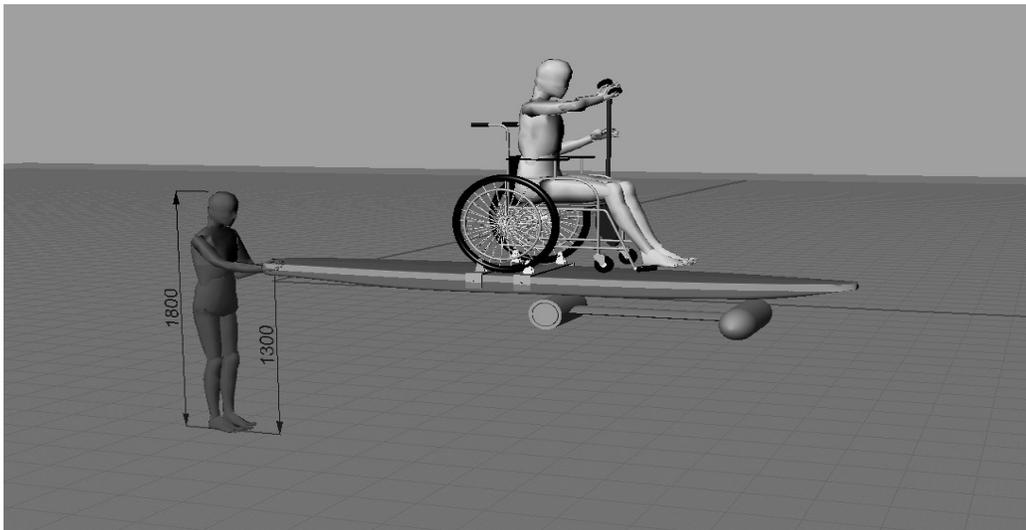


Figura 10 - Calado máximo de quillote para navegación segura

Como se verá en Resumen de los casos, página 32, la condición de estudios del modelo quilla de bulbo, requiere analizar dos condiciones, la primera de ellas es la quilla de bulbo en condición vertical, Figura 12, la cual corresponde a la condición de navegación. La siguiente condición es la quilla de bulbo en condición horizontal, Figura 11, esta condición será utilizada para que la persona pueda hacer ingreso al agua una vez montada la silla de ruedas sobre la tabla. Este caso representa a la quilla plegada y en disposición horizontal, para poder lograr esto, el mecanismo incluiría un sistema de polea compuesta con el cual se reducirá el peso de levante de la quilla de bulbo.

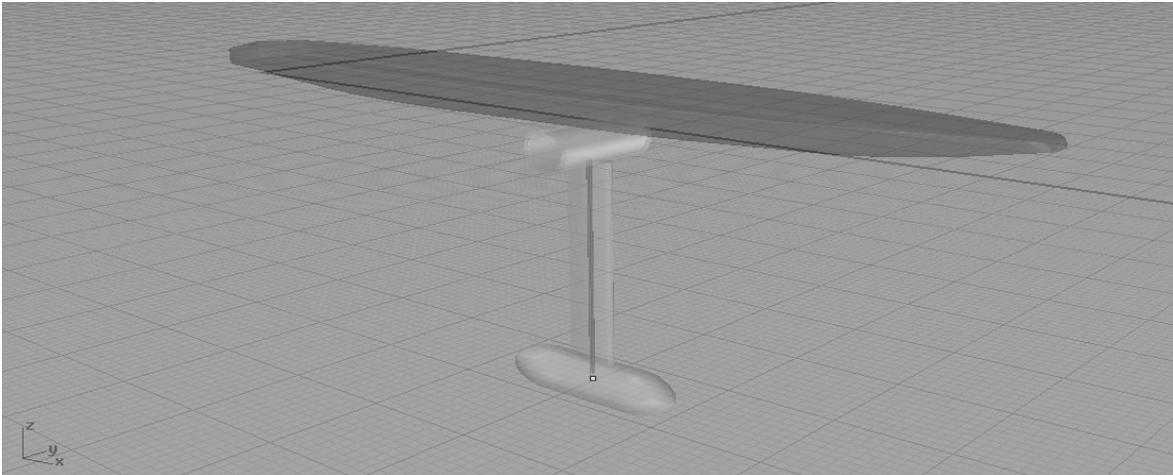


Figura 12 - Quilla de bulbo posición vertical

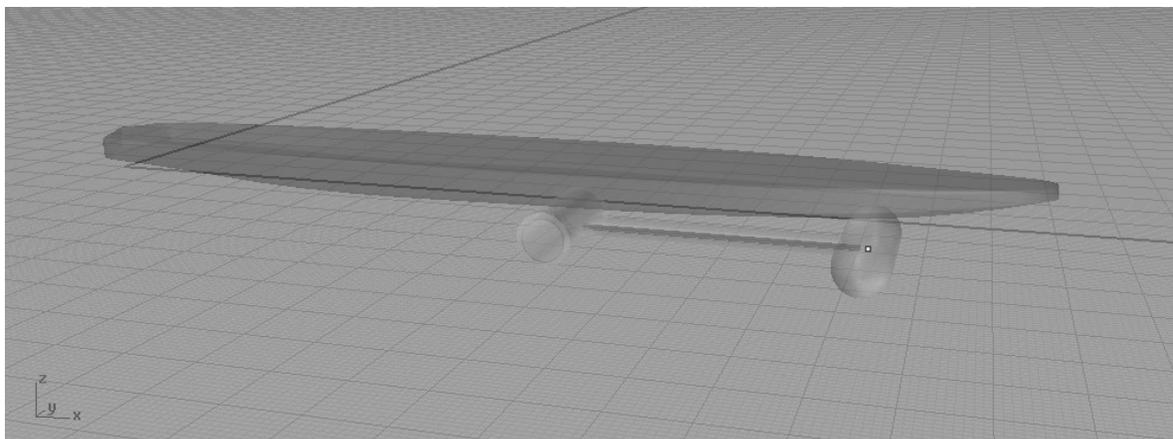


Figura 11 - Quilla de bulbo posición horizontal

El peso de la quilla de bulbo se estima en 60 kg dada la longitud máxima del quillote definida anteriormente. Sin embargo, se debe considerar el peso que una persona puede levantar, para plegar el quillote, el cual irá acompañado de un juego de poleas compuestas, Figura 13, que en teoría disminuye en una sexta parte el peso a levantar del quillote, por lo tanto, para mantener un cierto nivel de confort, el peso a levantar será de 10 kg en teoría, y el peso total del quillote será de 60 kg. El peso a levantar será levemente mayor, pudiendo llegar a 15 kg debido a la fricción presente en el sistema.

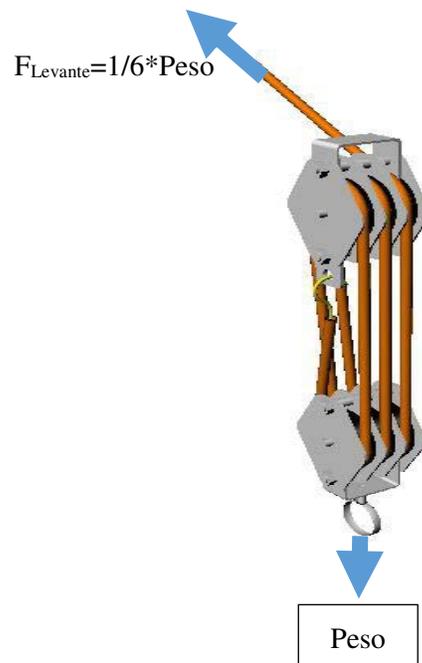


Figura 13 - Sistema de poleas usado

Tabla 9 - Pesos y posición de centros de gravedad quilla de bulbo

Ítem	Peso	LCG	VCG
	[kg]	[cm]	[cm]
Quillote Vertical	60	190	-130
Poleas y cabos	2	300	-20
Quillote Horizontal	60	300	-38

9 Estudio de estabilidad y equilibrio

Mediante el software Hydromax ®, a partir de los modelos diseñados en la sección Modelos propuestos, se realizará es estudio de equilibrio y estabilidad para pequeños y grandes ángulos de escora, con el objetivo de determinar parámetros como GM y GZ con los cuales se compararán los modelos diseñados.

9.1 Revisión teórica

A continuación, se presenta parte de la teoría básica detrás de la estabilidad de un cuerpo flotante.

9.1.1 Condición de equilibrio normal

Según lo estipulado por Principio de Arquímedes, al sumergir un cuerpo en un medio líquido, este experimenta una fuerza de empuje ascendente. Si el valor de esta fuerza es inferior al peso del cuerpo, este se hundirá. Si es igual, éste quedará sumergido, pero no se irá al fondo. Si es superior, entonces flotará, es decir, una parte del cuerpo queda por encima de la superficie del medio líquido en el cual esté sumergido.

El peso se aplica en el Centro de Gravedad, mientras que el empuje se aplica en el Centro de Carena o de Boyantes. El equilibrio es producido cuando ambos centros se encuentran en la misma vertical. Si giramos el cuerpo para separar el Centro de Gravedad de la vertical se produce un par de fuerzas que retornan el cuerpo a la posición inicial, dada esta situación, se le denomina equilibrio estable.

Si el cuerpo flota, pero el Centro de Gravedad está por sobre el Centro de Boyantes, la estabilidad va a depender de las formas del cuerpo, fundamentalmente del área de flotación. Al inclinarse un cuerpo flotante en un cierto ángulo, se forma una cuña emergida y una sumergida. El centro de carena del volumen sumergido a la banda sumergida es más grande y en la banda emergida es más pequeño. El centro de boyantes del volumen sumergido a la banda sumergida es mayor que el de la banda emergida.

Dependiendo de la nueva posición del centro de boyantes, puede que el par entre el empuje y el peso hagan retornar a su posición inicial al cuerpo, es decir se producirá un equilibrio estable, o puede también darse el caso, en que el par de fuerza provoque un aumento de inclinación y entonces el flotador no esté en equilibrio estable.

El estudio de las características hidrostáticas de las formas de la Carena de una nave, determinan cuando se produce la estabilidad o inestabilidad de un cuerpo flotante, esto, según la posición del centro de boyantes según las diversas flotaciones.

En función del ángulo de inclinación, se definen el tipo de estudio a realizar. Se estudiarán dos casos que son principales:

- 1.- Estabilidad transversal inicial
- 2.- Estabilidad transversal para grandes ángulos

9.1.1.1 Estabilidad transversal inicial

Supongamos un buque cualquiera (aplica para una tabla de las características a estudiar), Figura 14, con un cierto volumen de carena V . Su centro de carena B se encontrará en la posición indicada en Figura 14. Si ahora escoraremos al buque un ángulo θ , pero manteniendo el mismo volumen de carena V , el centro de carena cambiará y pasará a ser B_1 , Figura 15. El empuje igual en casos al desplazamiento Δ , que pasaba por B cuando el buque estaba adrizado, pasará ahora por B_1 . Si prolongamos la recta de acción de este último hasta cortar la recta de acción del empuje B , se determina un punto M . Este punto variará, si se hace variar la escora θ . Sin embargo, para ángulos

pequeños de escora (en la práctica de 8° a 12°, según el tipo de nave) el punto M es invariable, tomando entonces el nombre de *metacentro transversal inicial*.

En la práctica se fija la posición de M con respecto a la quilla (K), es decir, se refiere al segmento KM, Figura 15.

Se tiene entonces:

$$KM = KB + BM$$

Donde BM está definido en Figura 15, y KB se define como la posición vertical del centro de carena.

Características principales de la estabilidad transversal inicial:

- Si G se encuentra bajo M, existirá un índice de estabilidad positiva, y la tabla tenderá a mantenerse adrizada.
- Si G se encuentra sobre M, existirá un índice de estabilidad negativa y la tabla no será capaz de mantenerse adrizada.
- Si G coincide con M existirá un índice de estabilidad neutra o nula, si la tabla se inclinara a un ángulo pequeño tenderá a mantenerse en esa posición.

9.1.1.2 Momento adrizante aplicado a pequeños ángulos de escora

Se ha definido que el metacentro transversal del buque, en la práctica, es un punto invariable, para ángulos de escora de hasta 8 a 12°. Entonces dentro de este campo podrá estudiarse la estabilidad con la ayuda de este punto.

Considerando la tabla escorada un ángulo pequeño, Figura 15. El empuje pasará por el metacentro M. El peso y el empuje formarán un par de fuerzas Δ y brazo GZ.

Se tiene, de la Figura 15, que el brazo llamado adrizante, será:

$$GZ = GM \cdot \text{sen } \theta$$

El par de fuerzas, llamado asimismo momento adrizante C, será:

$$C = \Delta \cdot GZ = \Delta \cdot GM \cdot \text{sen } \theta$$

Si el ángulo θ es pequeño, puede reemplazarse sin erro sensible su seno por el arco en radianes, resultando:

$$GZ = GM \cdot \theta$$

$$C = \Delta \cdot GZ = \Delta \cdot GM \cdot \theta$$

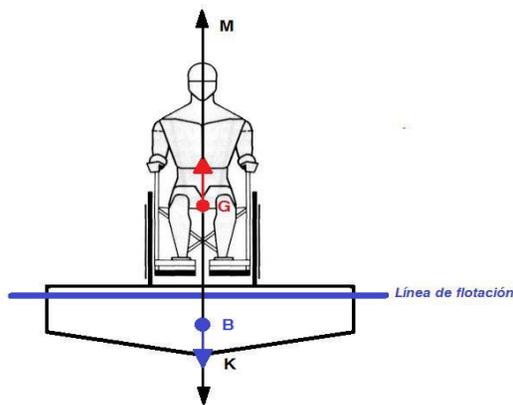


Figura 14 - Equilibrio normal

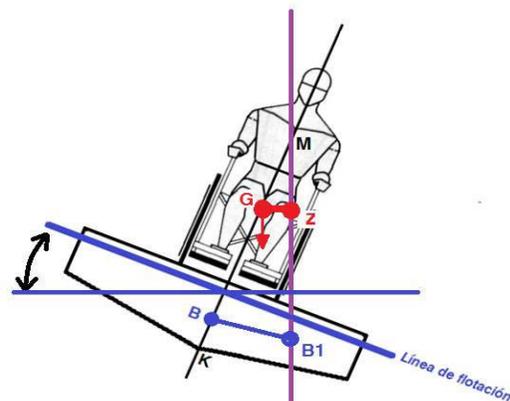


Figura 15 - Condición de escora

9.1.1.3 Estabilidad transversal para grandes ángulos

Se ha visto que para pequeños ángulos de escora (8 a 12°) es posible estudiar la estabilidad transversal con el auxilio de la altura metacéntrica GM . Sin embargo, para ángulos mayores, el punto M deja de ser fijo y el segmento GM pierde toda validez. Dado lo anterior, se debe estudiar la estabilidad de otro modo, ya que las fórmulas dadas en 9.1.1.2, que nos dan el brazo adrizante y el par de fuerzas adrizantes no son aplicables.

Como se aprecia en Figura 16, conforme se va escorando el barco el centro de carena va siguiendo una trayectoria B, B_1, B_2, B_3 y también el metacentro va siguiendo la trayectoria M, M_1, M_2, M_3 , que ya no se encuentra en el plano longitudinal del barco.

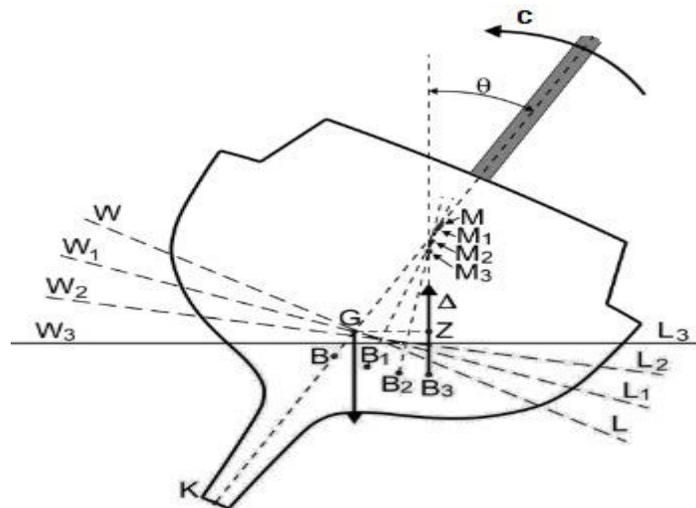


Figura 16 - Escora típica de una embarcación

Por lo tanto, con el barco escorado un ángulo θ por encima del límite de la estabilidad inicial, ya no se puede utilizar la fórmula anterior para calcular el brazo adrizante transversal, GZ , en función de la altura metacéntrica, GM .

El brazo GZ para cada escora θ depende de la posición del centro de carena, B , para esa escora que a su vez depende de las formas de la carena sumergida.

El momento adrizante transversal para un ángulo de escora θ vendrá determinado por el par que tiende a oponerse a la escora del barco, como se ve en la figura:

$$C = \Delta \cdot GZ$$

Donde GZ es el brazo adrizante para el ángulo de escora θ .

El cálculo de los brazos adrizantes en función de la escora es sencillo pero muy laborioso y se efectúa normalmente mediante la ayuda de un software computacional (en este proyecto los cálculos posteriores fueron realizados con el software Hydromax Stabiliy). Los valores de los brazos adrizantes, GZ , para cada uno de los ángulos de escora, θ , se resumen en la llamada curva de estabilidad estática, que se ha representado en la siguiente Figura 17, donde se pueden distinguir los siguientes aspectos:

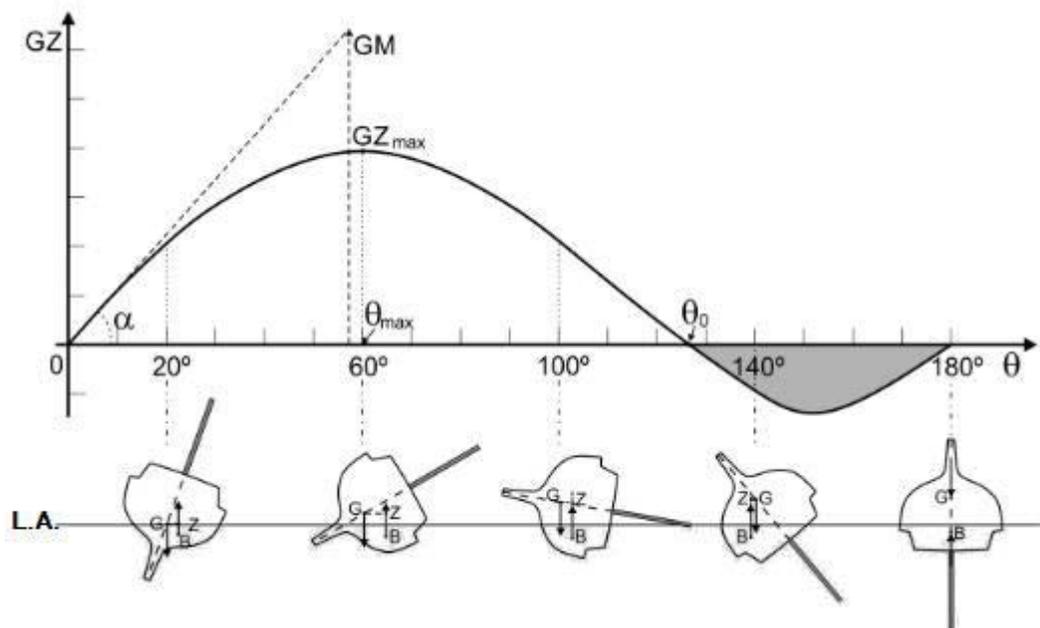


Figura 17 - Curva de estabilidad típica

Con ángulos de escora, θ , muy pequeños el brazo adrizante es: $GZ \approx GM \times \theta$, (con θ en radianes), así que la tangente a la curva de estabilidad en el origen está dada por:

$$\tan \theta = \frac{dGZ}{d\theta} = GM$$

Es decir, el valor de la tangente a la curva de estabilidad estática en el origen es la altura metacéntrica. Así que trazando la tangente a esta curva en el origen y midiendo la ordenada de esta recta para:

$$\theta = 1 r = 57,3^\circ$$

Se obtiene el valor de la altura metacéntrica, GM.

Después de la zona de estabilidad inicial el brazo adrizante, GZ, va aumentando, pero no linealmente con la escora como antes, hasta que se alcanza su valor máximo GZ_{\max} . Este valor y el ángulo, θ_{\max} , para el que el brazo es máximo definen otro de los puntos característicos de esta curva.

A partir del punto de brazo máximo, éste va disminuyendo con la escora hasta que se anula en el ángulo límite de estabilidad, θ_0 , que es otro de los puntos característicos de la curva de estabilidad estática.

El rango de ángulos comprendidos entre el origen y este ángulo, θ_0 , en los que el brazo adrizante tiene valores positivos, es lo que se llama rango de estabilidad positiva.

A partir del ángulo límite de estabilidad, θ_0 , el brazo adrizante se hace negativo y ayuda a escorarse más al barco, hasta completar el vuelco en los 180° . Esta zona donde el brazo adrizante es negativo es la zona de estabilidad negativa.

En la sección Resumen de resultados de los casos, página 32, se presentarán gráficas comparativas entre los diferentes modelos y sus características de estabilidad y equilibrio, con el objetivo de definir cuál es el modelo idóneo para ser construido. Los parámetros por comparar son: desplazamiento, estabilidad transversal representada mediante el GMt, el trimado estático y las curvas de estabilidad (curvas GZ). En las subsecciones siguientes se definen los parámetros usados para el estudio [5].

9.2 Centros de gravedad

Para determinar los centros de gravedad descritos en Tabla 11, se modeló, en el software Rhinoceros 5®, la tabla de surf disponible en el astillero de la Universidad Austral de Chile sobre la cual se trabajará para construir el modelo seleccionado, Figura 18, cuyas dimensiones principales se presentan en Tabla 10.

Tabla 10 - Dimensiones principales de tabla base

Eslora total	LOA	3600 mm
Puntal	D	165 mm
Manga	B	640 mm
Peso tabla	W	18 kg
Desplazamiento máximo	Δ	228.7 kg

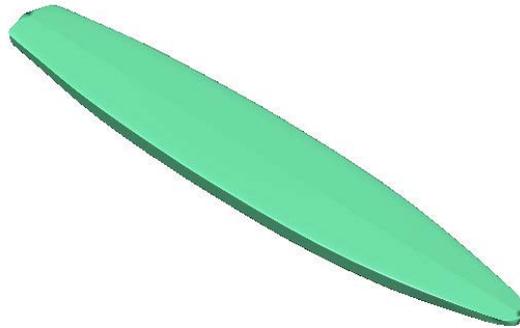


Figura 18 - Tabla modelada en Rhinoceros 5

Una vez modelada la tabla, silla de ruedas y usuarios es posible determinar sus ²centros de gravedad, véase Figura 19 y Figura 20.

² Nota: el eje de referencia (0, 0, 0) se encuentra a popa de la tabla y en la parte más baja de la quilla de la tabla, desde ese punto a proa y hacia arriba en la vertical se considera positivo.

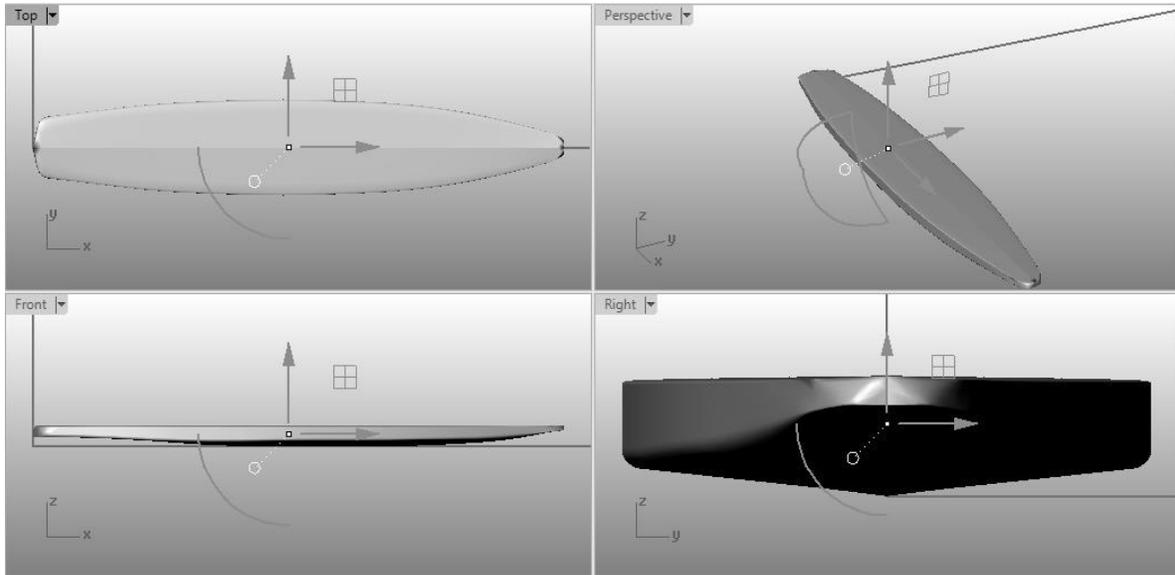


Figura 19 - Centro gravedad Tabla

El centro de gravedad de la tabla modelada, determinado según Rhinoceros ® corresponde al punto:

(1733, 0, 86) [mm]

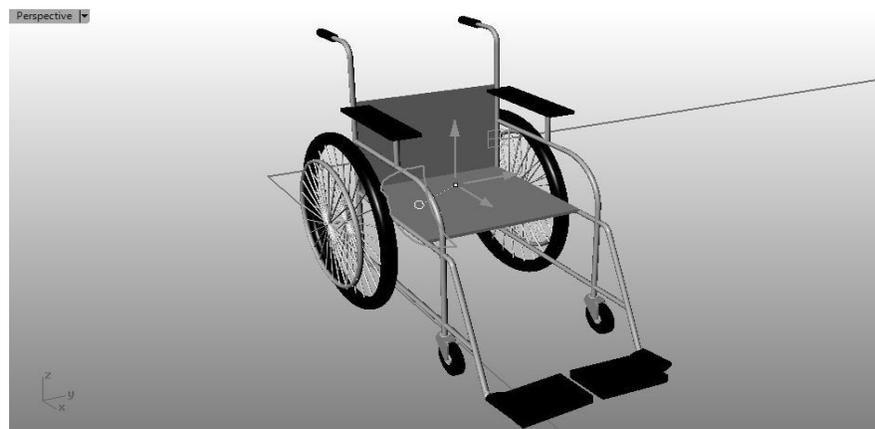


Figura 20 - Centro de gravedad silla de ruedas

El centro de gravedad para la silla de ruedas modelada, cuya silla corresponde a una de las sillas más grandes del mercado, corresponde al punto:

(1566, 0 ,412.5) [mm]

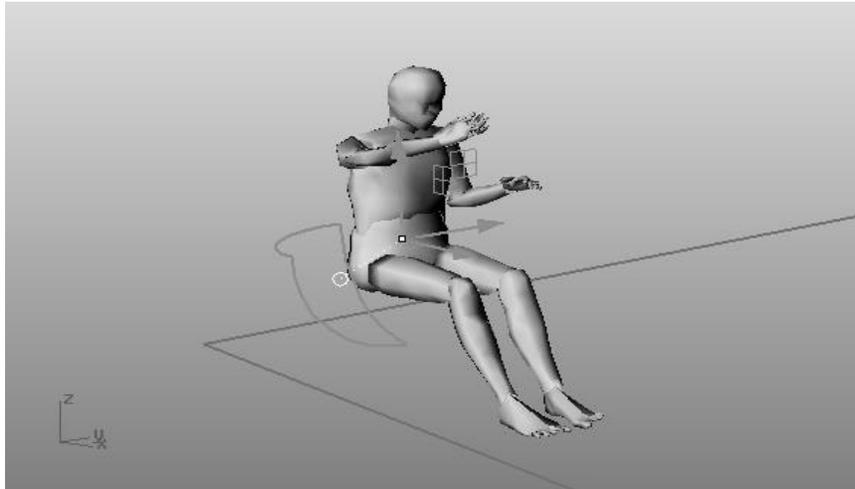


Figura 21 - Centro de gravedad usuario sentado

El centro de gravedad del usuario de unos 80 kg sentado sobre una silla de ruedas corresponde al punto:

$$(1520, 0, 680) \text{ [mm]}$$

Debido a que el tamaño de la silla de ruedas depende del peso del usuario, y a su vez, la posición del centro de gravedad del usuario depende del tamaño de la silla, el centro de gravedad de la persona se define para cada tamaño de silla de ruedas según Tabla 11.

El centro de gravedad del usuario y de la silla de ruedas en el sentido longitudinal se considerará constante. En Tabla 11 se muestran los diferentes casos de carga para analizar el equilibrio de los distintos modelos y tener un primer parámetro para definir el modelo a construir.

9.3 Condiciones de carga

Para poder realizar los estudios, se establece un rango de posibles usuarios el cual se define mediante su peso. Es decir, los estudios realizados consideran un posible usuario cuyo peso se encuentra desde los 30 a los 100 kilogramos. Esta gama de posibles usuarios significa también una variación en sus centros de gravedad, así como también una variación del tamaño y peso de la silla de ruedas, dado que una persona de 100 kg necesitará una silla de mayores dimensiones que una de 30 kg. En la Tabla 11, se observa la definición del rango usuario, estableciendo el peso de cada posible usuario y su silla de ruedas, además de sus respectivos centros de gravedad definidos en Centros de gravedad, página 28.

Tabla 11 - Rango de posibles usuarios

Casos	Peso Usuario kg	³VCG Usuario sentado cm	⁴LCG Usuario cm	Peso silla kg	Atura asiento cm	VCG silla cm	LCG silla cm
1	30	50	152	8	35	26	157
2	35	50	152	8	35	26	157
3	40	52	152	9	37	27,75	157
4	45	54	152	9	39	29,25	157
5	50	56	152	10	41	30,75	157
6	55	58	152	10	43	32,25	157
7	60	60	152	11	45	33,75	157
8	65	62	152	11	47	35,25	157
9	70	64	152	12	49	36,75	157
10	75	66	152	13	51	38,25	157
11	80	68	152	14	53	39,75	157
12	85	70	152	15	55	41,25	157
13	90	70	152	16,5	55	41,25	157
14	95	70	152	17	55	41,25	157
15	100	70	152	17	55	41,25	157

³ VCG: coordenada vertical del centro de gravedad

⁴ LCG: coordenada longitudinal del centro de gravedad

9.4 Resumen de resultados de los casos

Dada lo extenso que resultaron los estudios de equilibrio y estabilidad de todos los modelos más el de la tabla sin modificaciones, es que en esta sección se presenta un ⁵resumen del estudio de cada uno de los 15 casos de carga para cada modelo, y también para la tabla sin ningún tipo de modificación, con los parámetros más relevantes a tener en consideración para velar principalmente por la seguridad en cuanto a la estabilidad que pueda otorgar el sistema, ya que lo principal es que las posibilidades de volcarse del usuario sean las mínimas posibles, además de ese criterio fundamental, se considerarán los costos asociados a la construcción.

Los casos se presentarán en formato de gráficos, comparándose entre modelos el desplazamiento, estabilidad transversal representada mediante el GMt, el trimado estático y las curvas GZ.

9.4.1 Caso 1

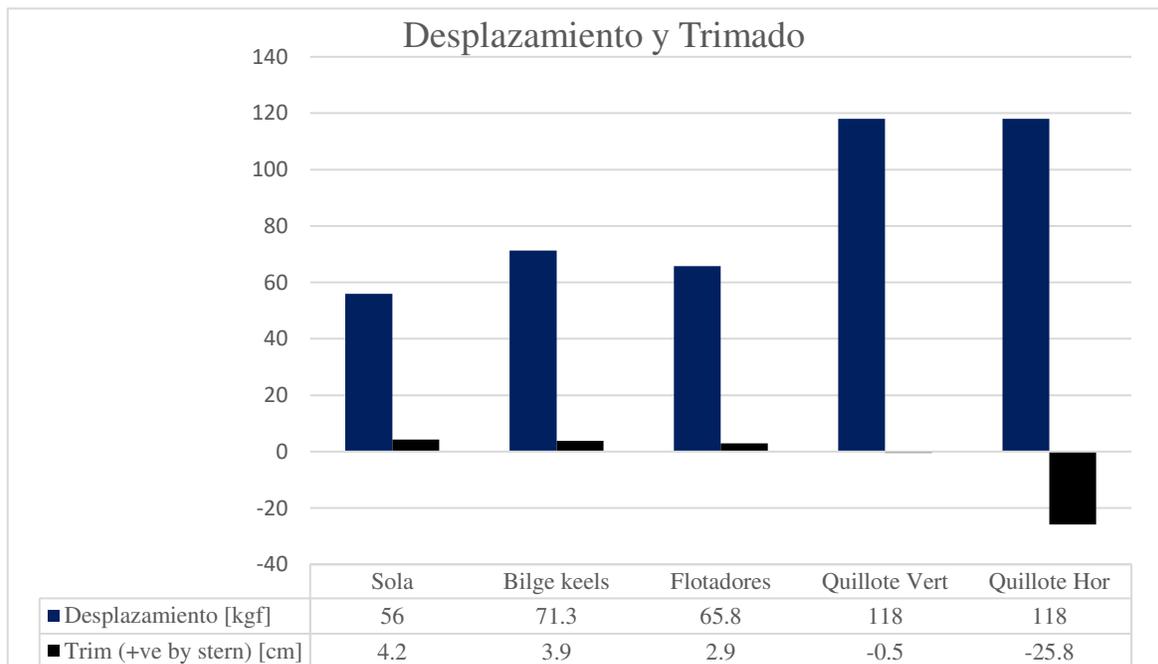


Gráfico 5 - Desplazamiento y trimado caso 1

⁵ Se opta por un resumen considerando que son tres modelos para estudiar, más el estudio de la tabla sin modificar; cada una con 15 casos a analizar da un total de 60 análisis, por lo que en este informe el informe se extendería en demasía perdiendo de vista el objetivo principal que es encontrar el modelo más idóneo para ser construido.



Gráfico 6 - Estabilidad transversal caso 1

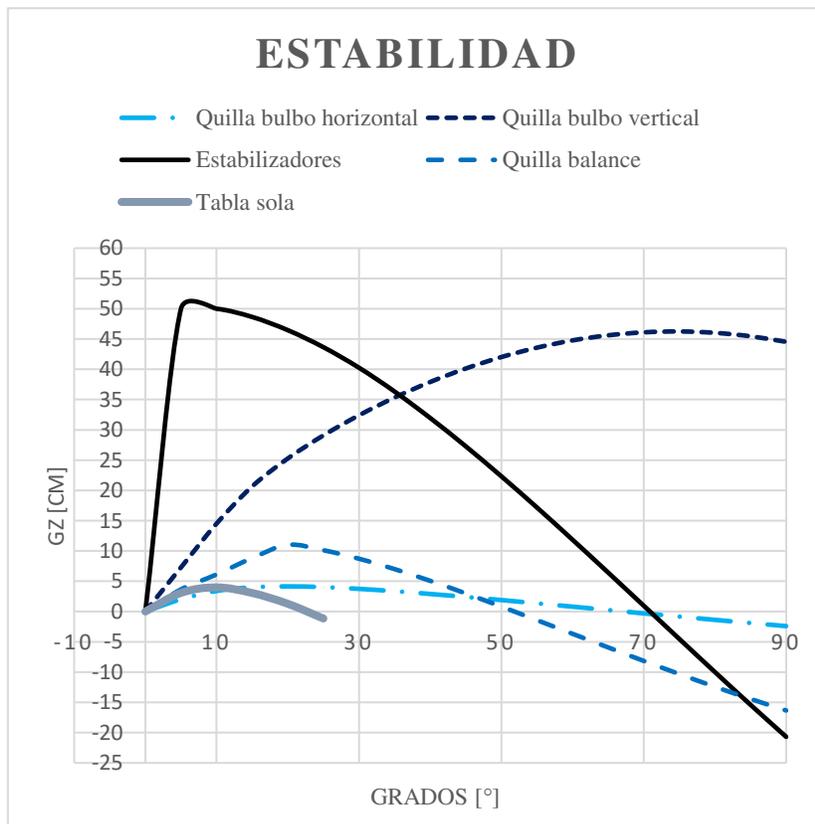


Gráfico 7 - Curvas GZ caso 1

9.4.2 Caso 2

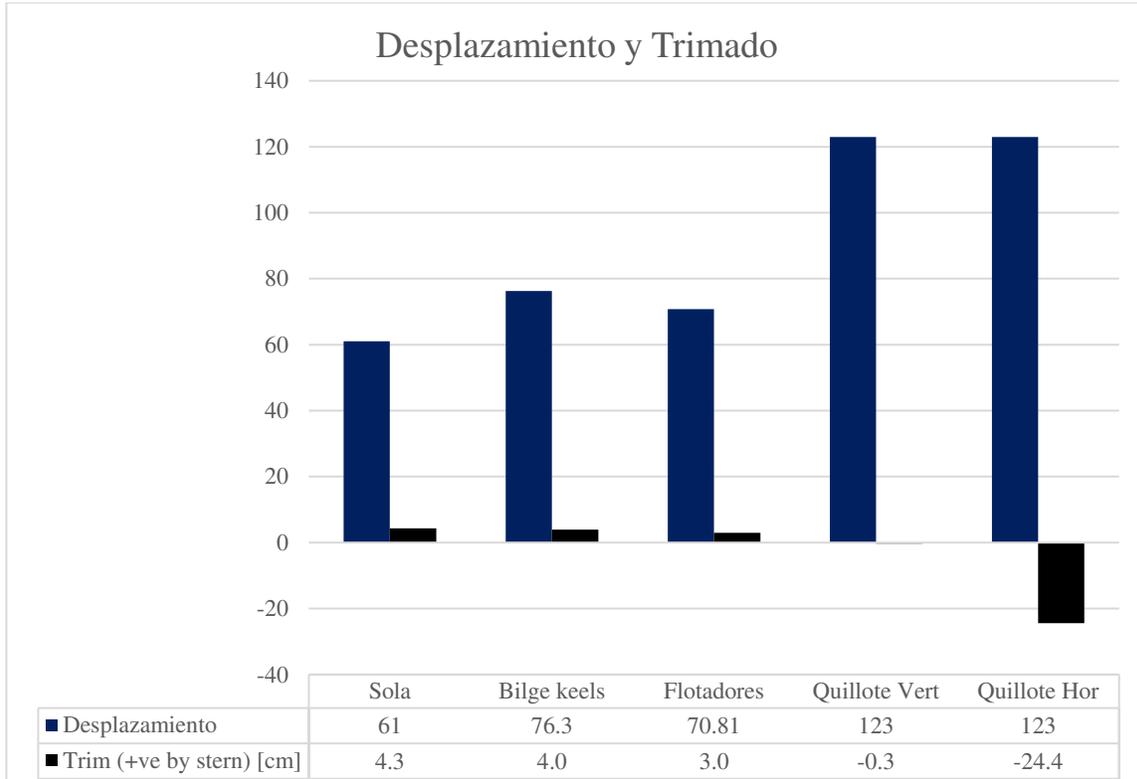


Gráfico 8 - Desplazamiento y trimado caso 2

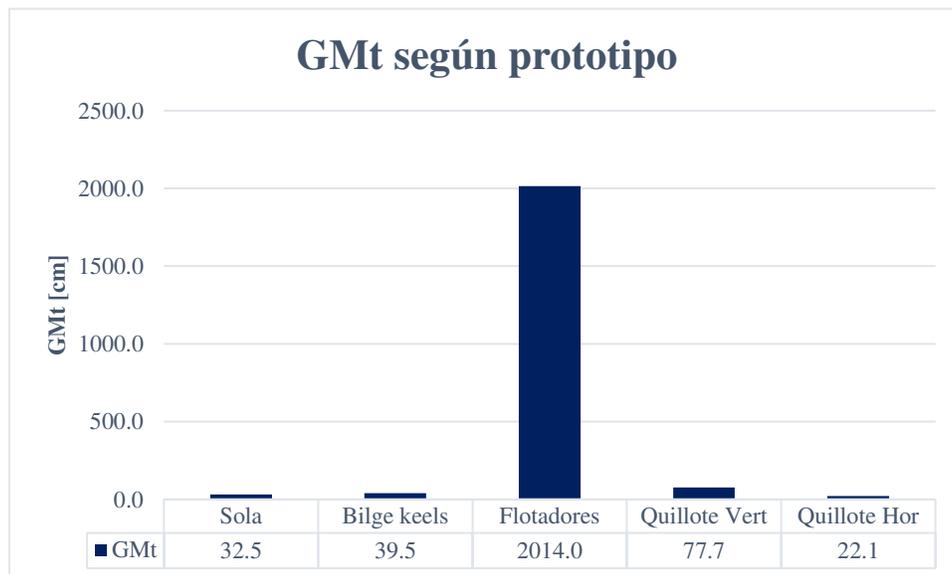


Gráfico 9 - Estabilidad transversal caso 2

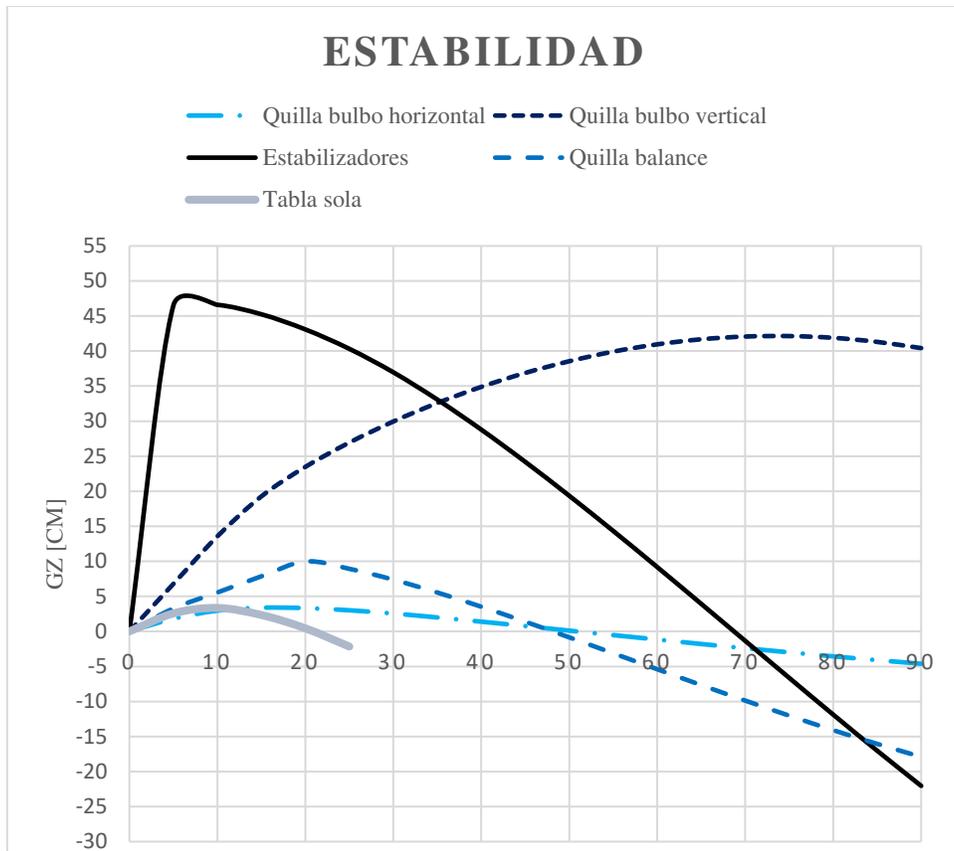


Gráfico 10 - Curvas GZ caso 2

9.4.3 Caso 3

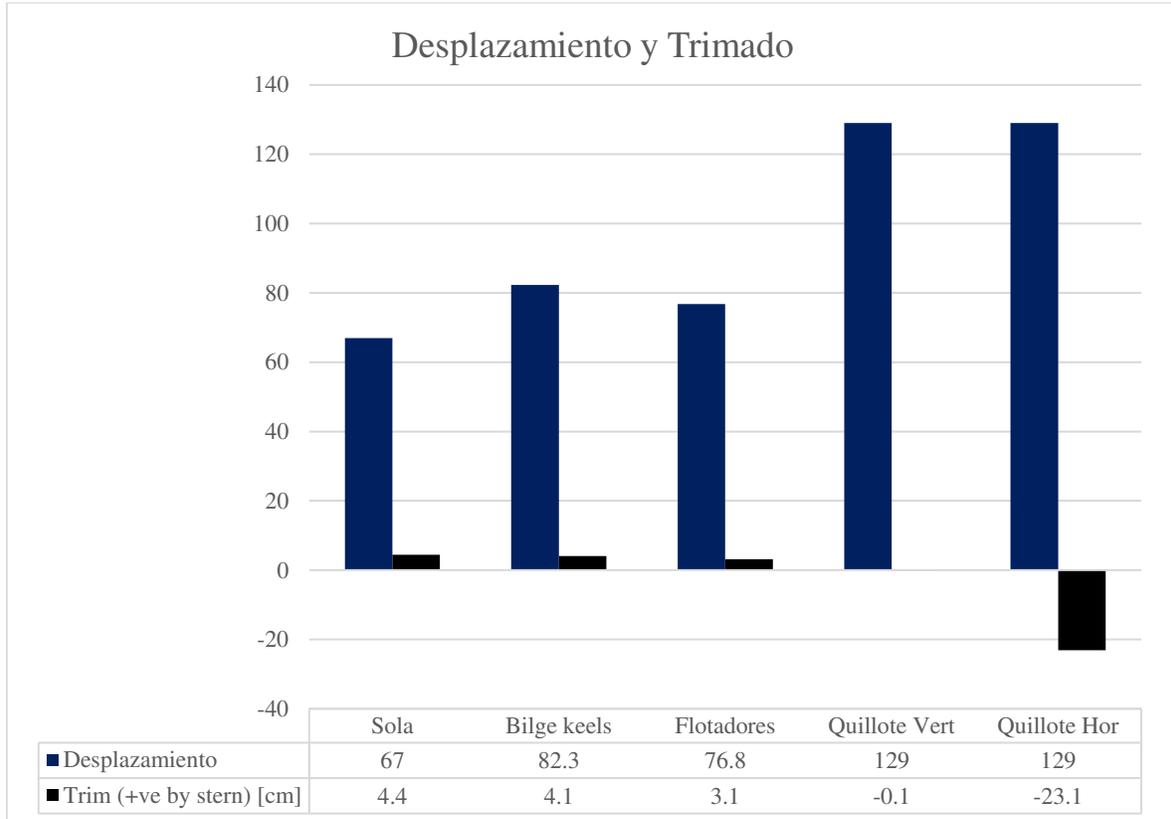


Gráfico 11 - Desplazamiento y trimado caso 3

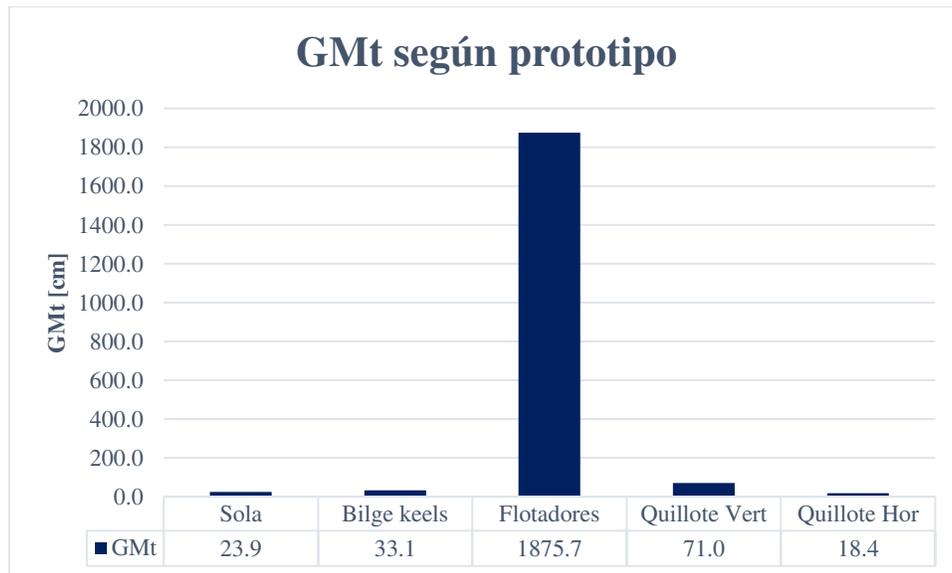


Gráfico 12 - Estabilidad transversal caso 3

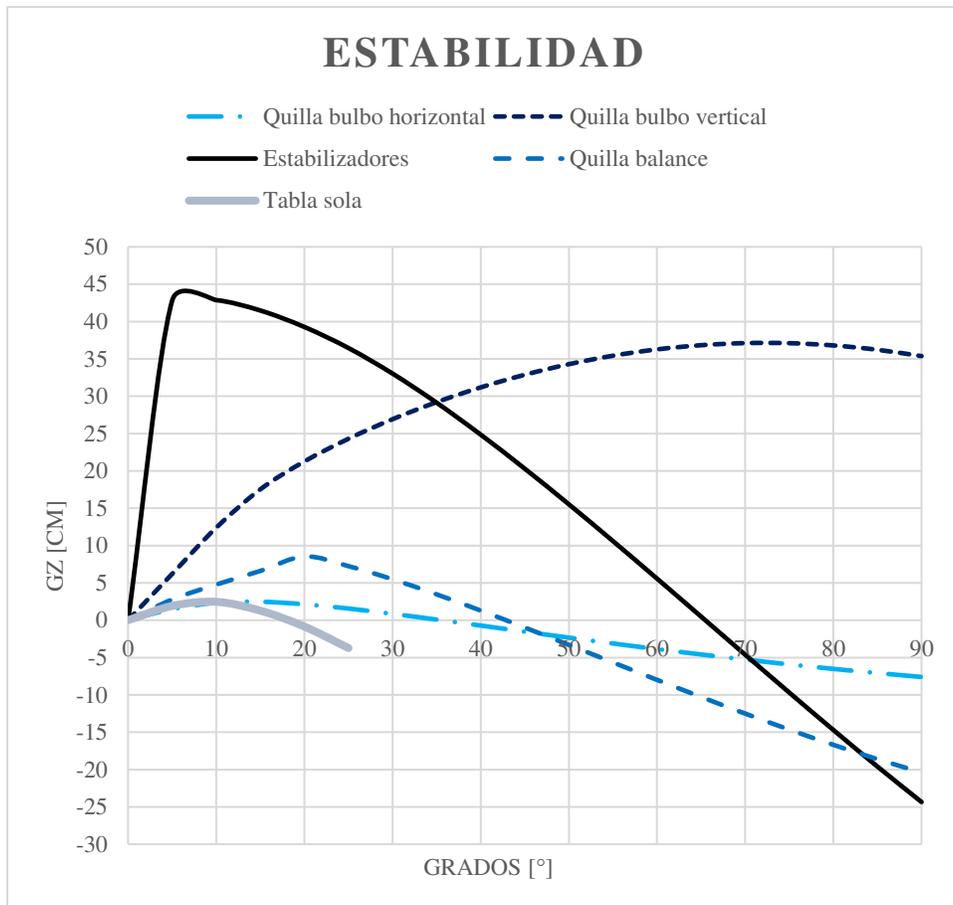


Gráfico 13 - Curvas GZ caso 3

9.4.4 Caso 4

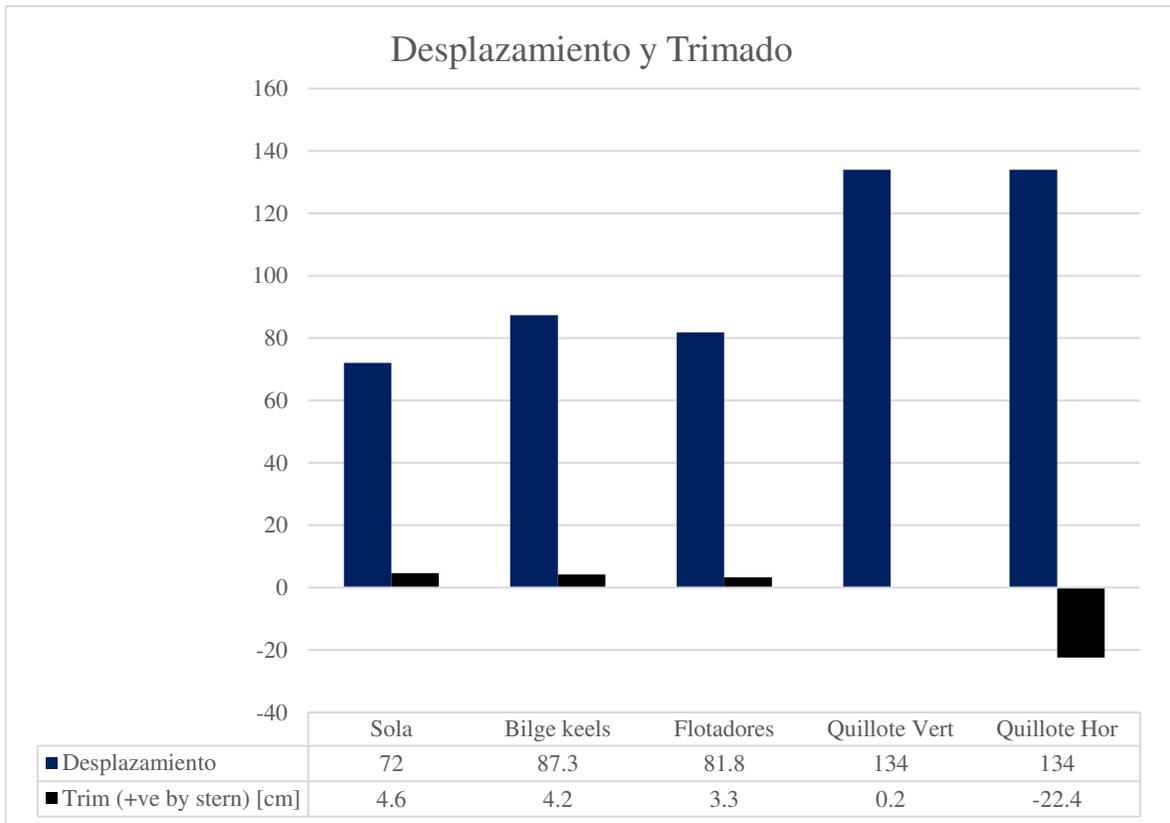


Gráfico 14 - Desplazamiento y trimado caso 4

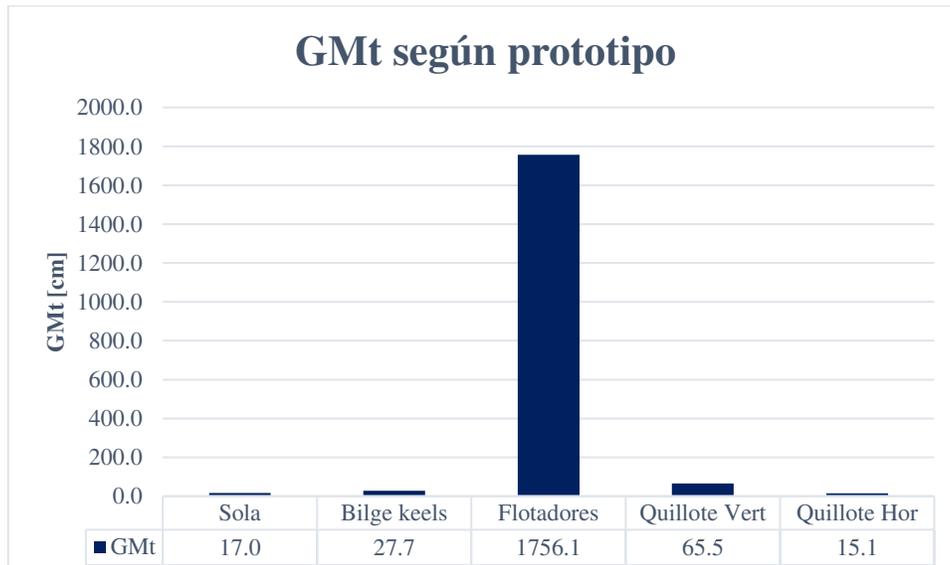


Gráfico 15 - Estabilidad transversal caso 4

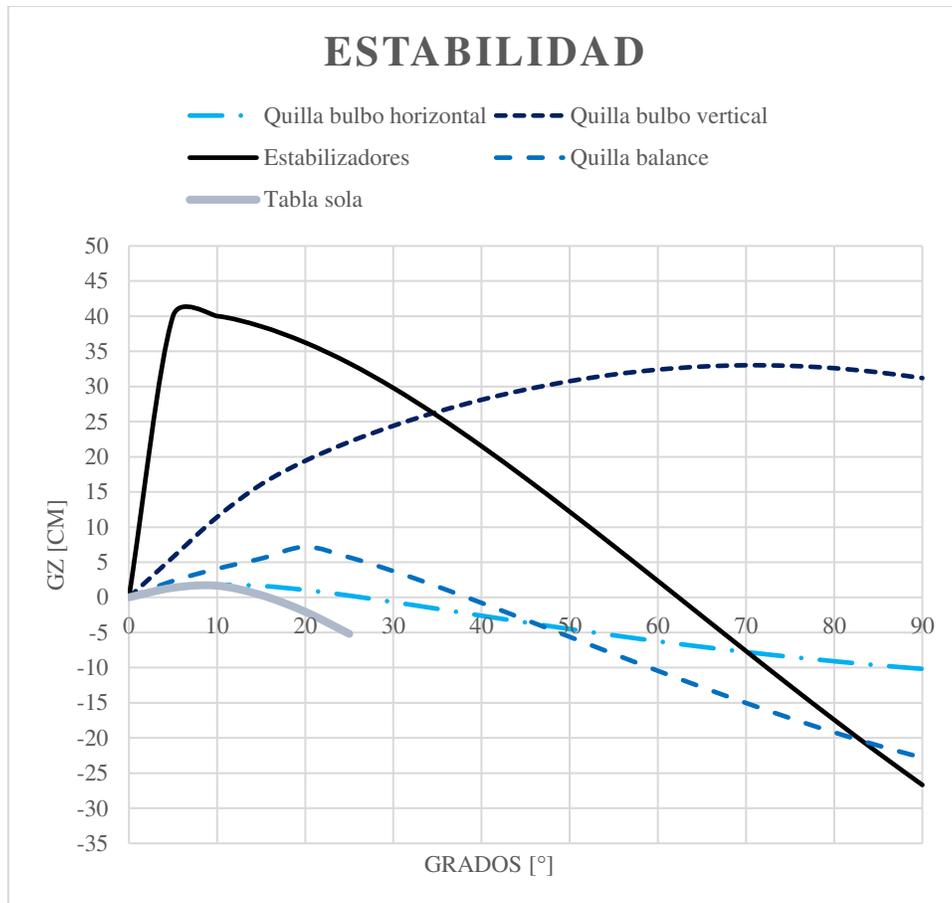


Gráfico 16 - Curvas GZ caso 4

9.4.5 Caso 5

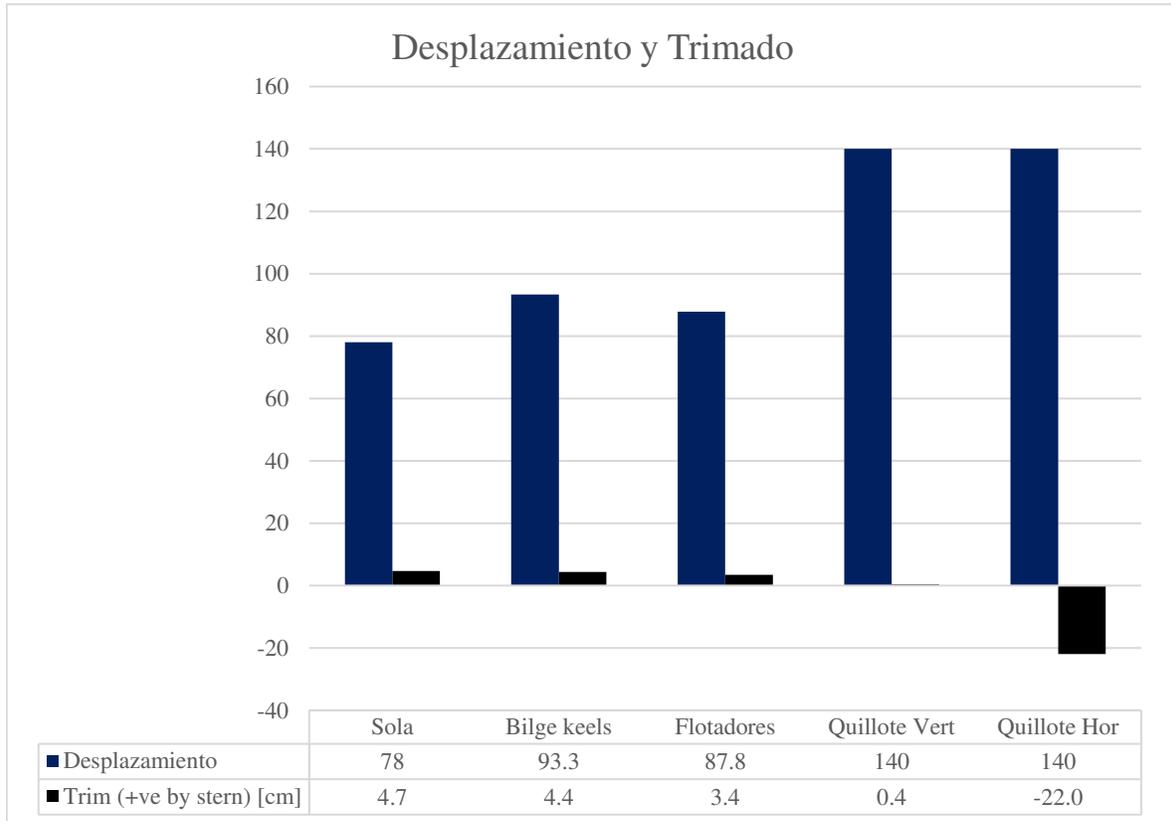


Gráfico 17 - Desplazamiento y trimado caso 5

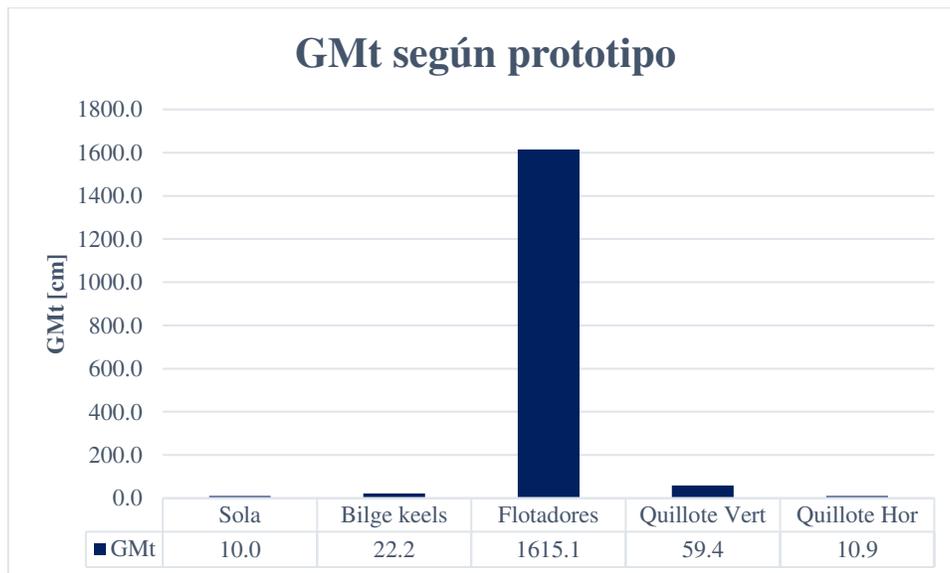


Gráfico 18 - Estabilidad transversal caso 5

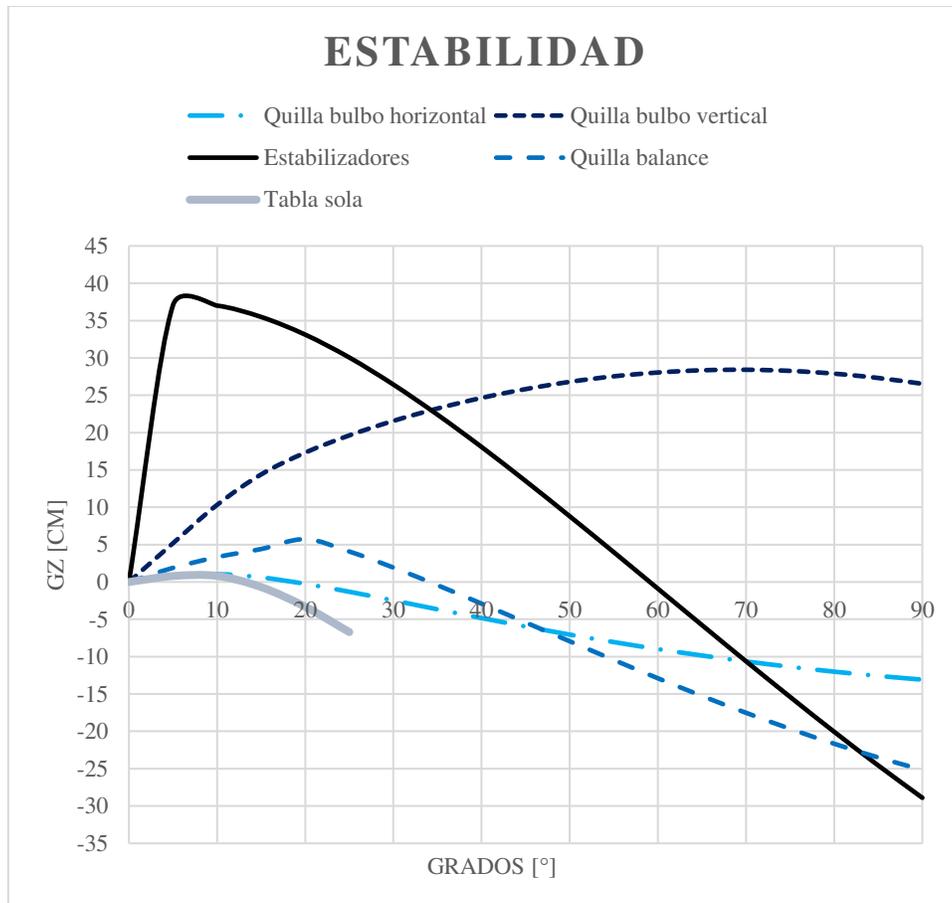


Gráfico 19 - Curvas GZ caso 5

9.4.6 Caso 6

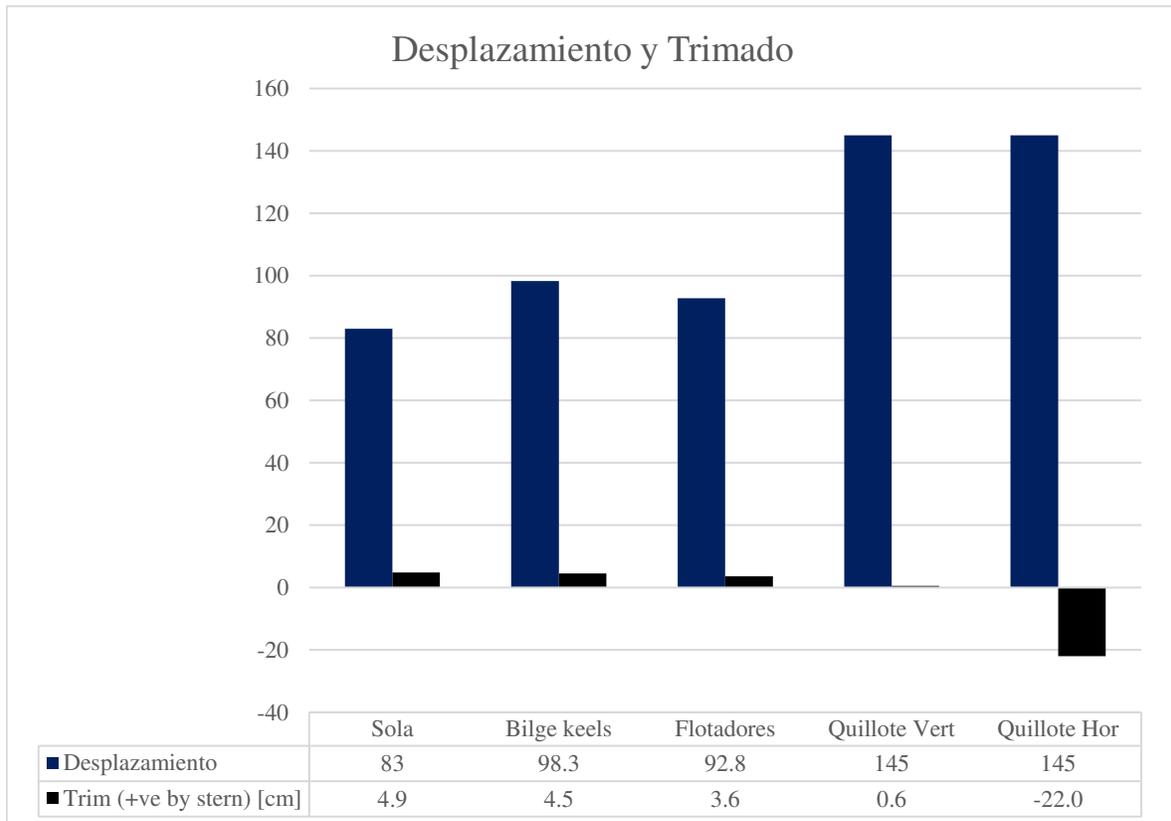


Gráfico 20 - Desplazamiento y trimado caso 6

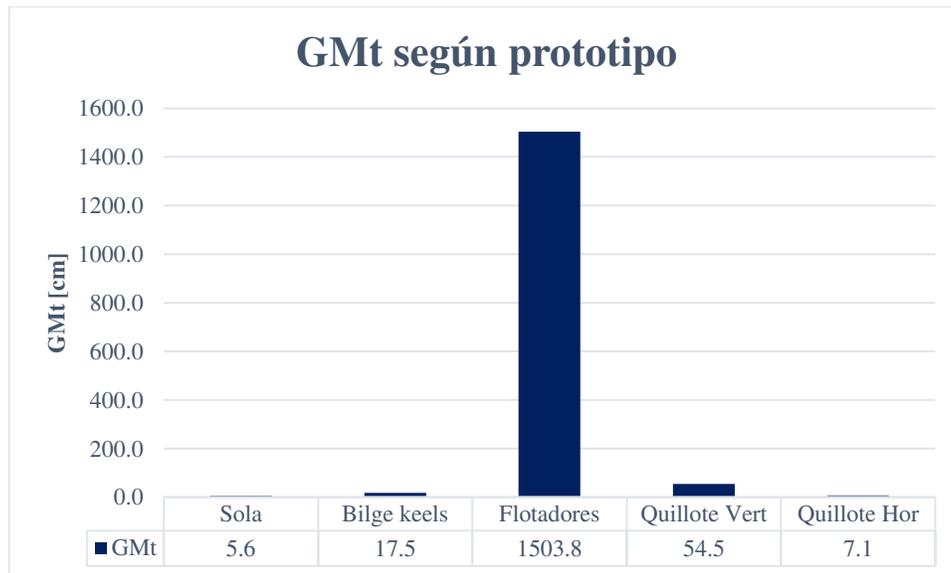


Gráfico 21 - Estabilidad transversal caso 6

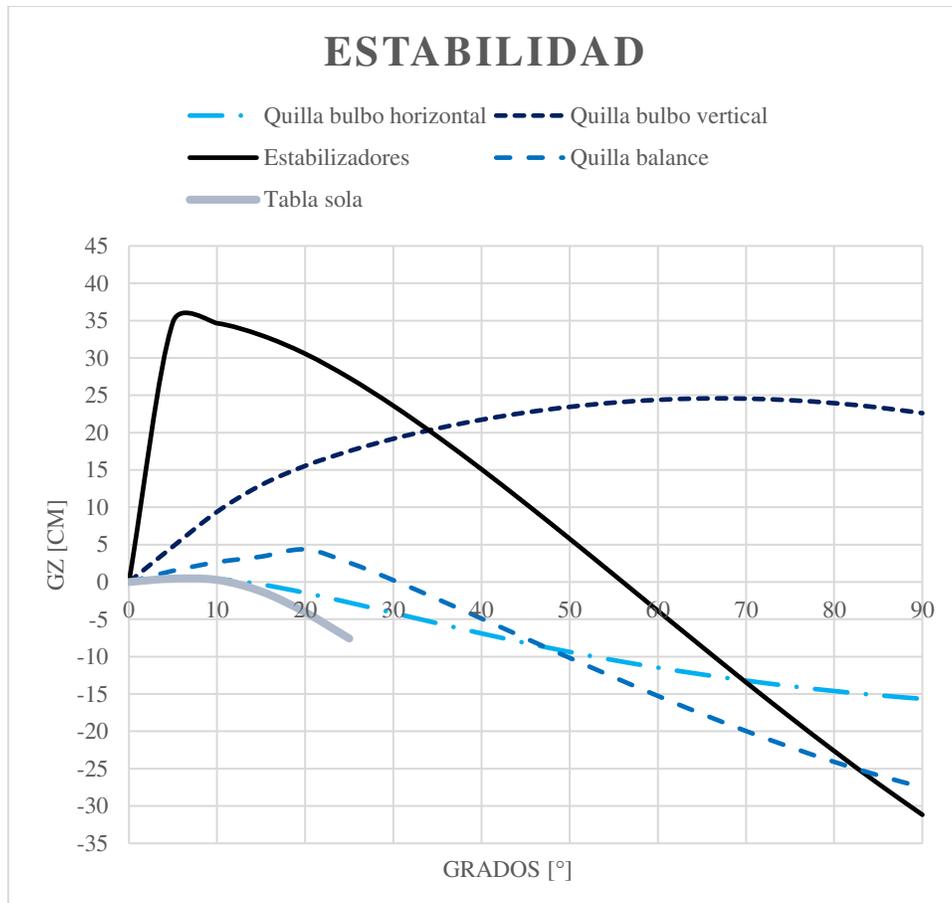


Gráfico 22 - Curvas GZ caso 6

9.4.7 Caso 7

Desde el presente caso en adelante, el trimado para el quillote en posición horizontal superaba los 75°, por lo que el software Maxsurf Stability ® arrojó error, esto es un indicio del trimado excesivo lo que indica que el sistema se torna inestable, por lo cual, para las condiciones de carga de aquí en adelante será necesario que el usuario ingrese al agua con la ayuda de algún compañero.

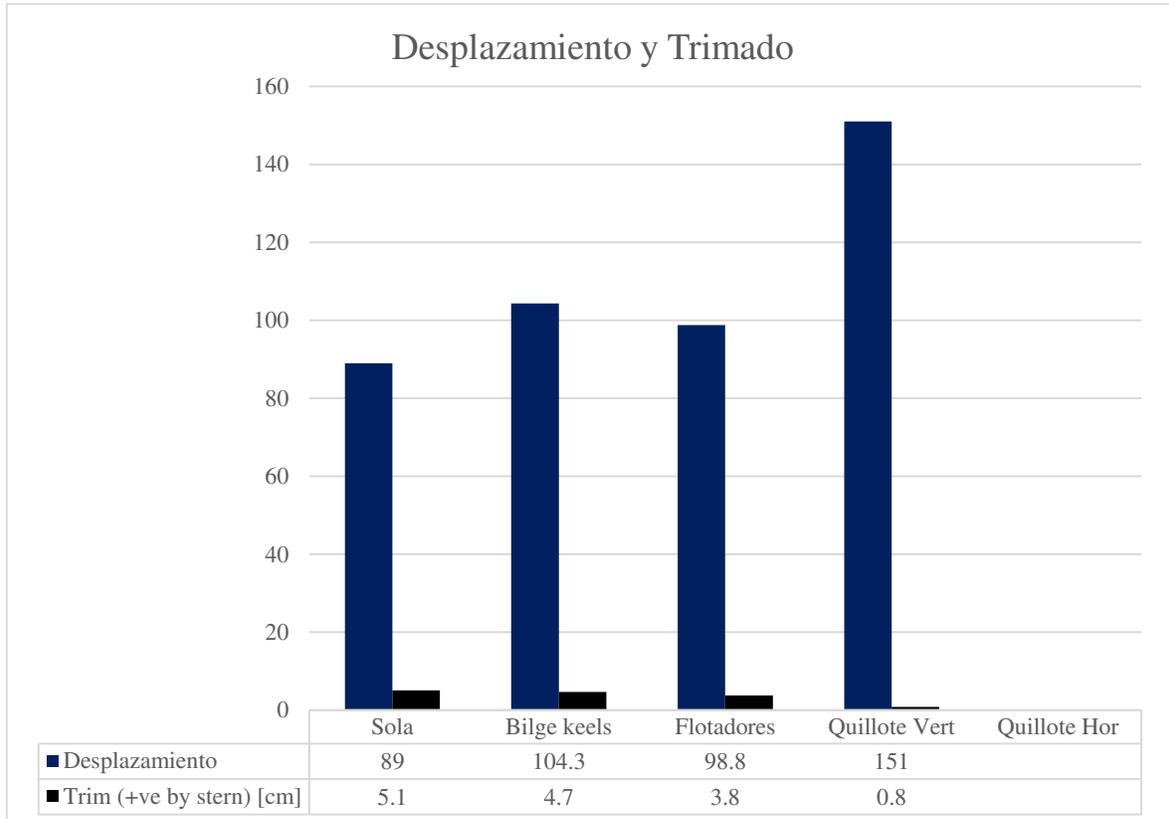


Gráfico 23 - Desplazamiento y trimado caso 7

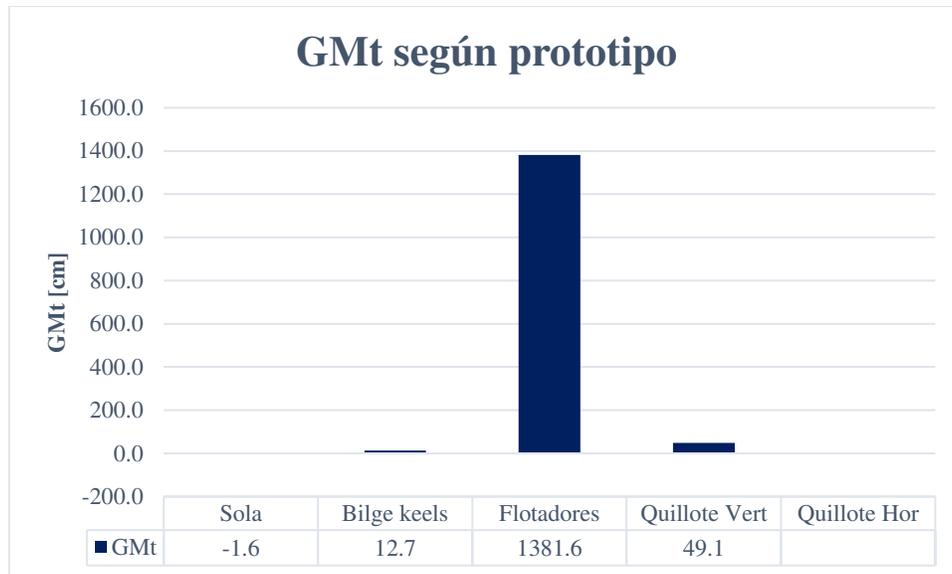


Gráfico 24 - Estabilidad transversal caso 7

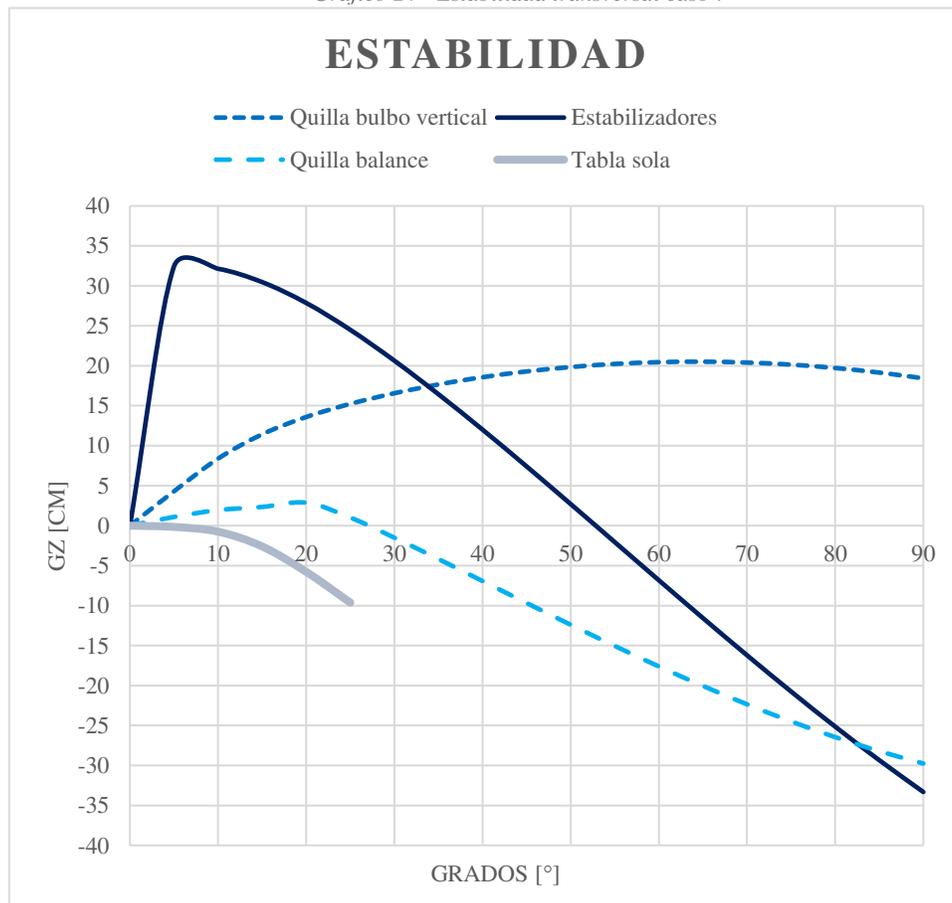


Gráfico 25 - Curvas GZ caso 7

9.4.8 Caso 8

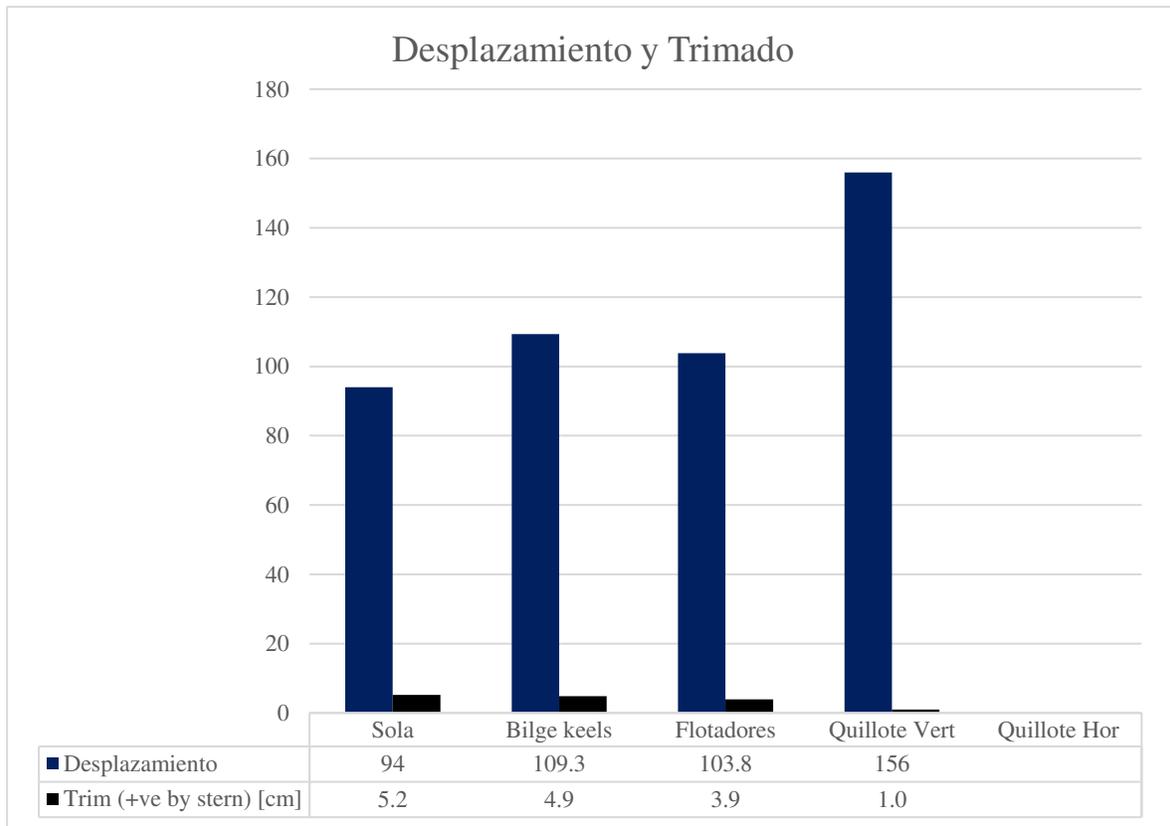


Gráfico 26 - Desplazamiento y trimado caso 8

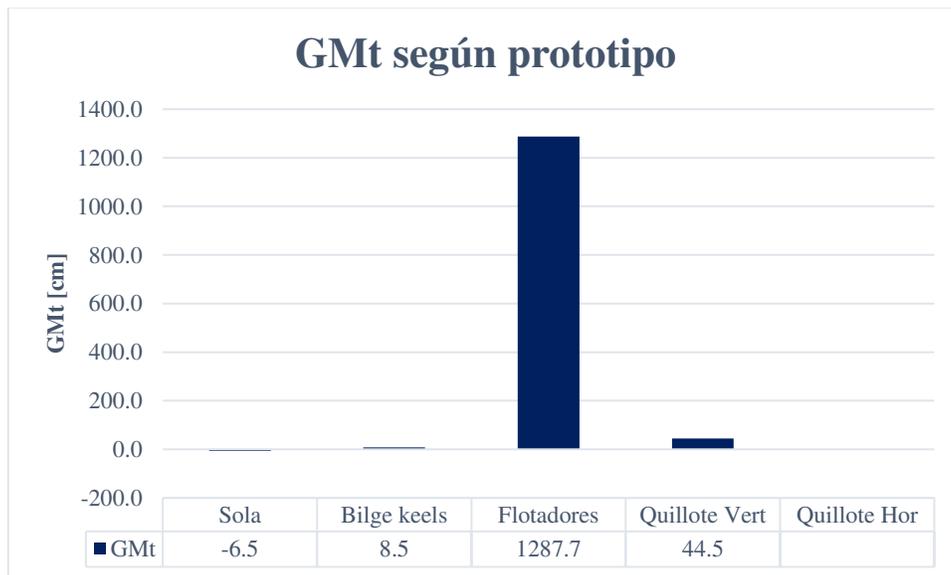


Gráfico 27 - Estabilidad transversal caso 8

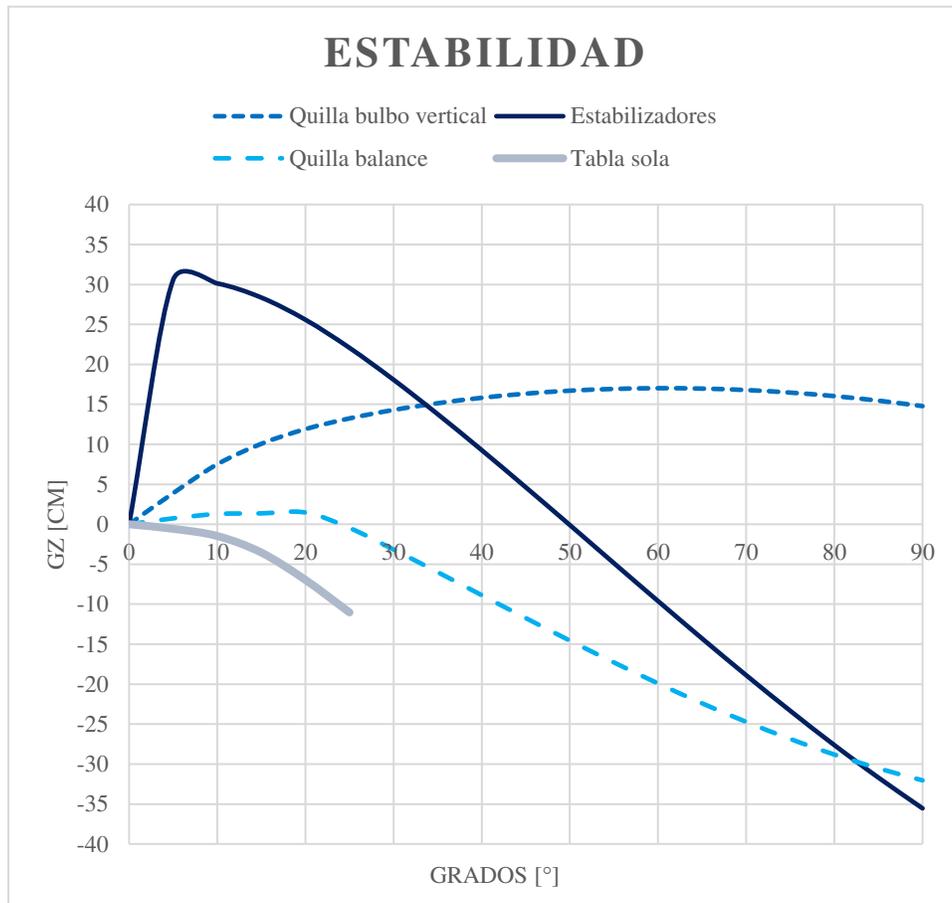


Gráfico 28 - Curvas GZ caso 8

9.4.9 Caso 9

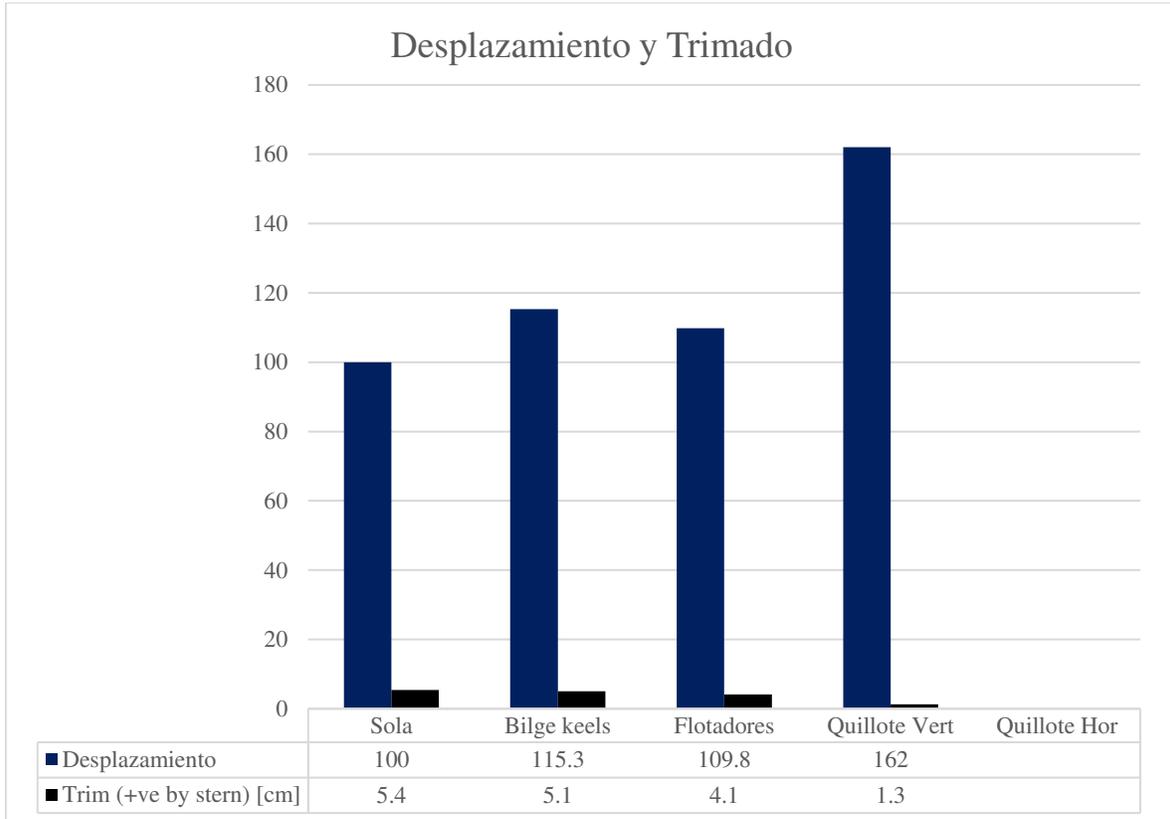


Gráfico 29 - Desplazamiento y trimado caso 9

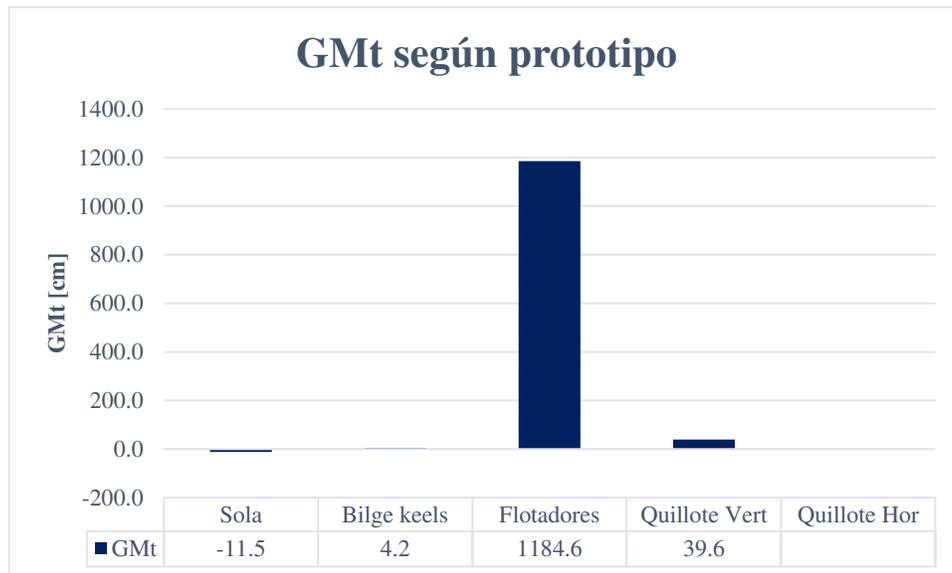


Gráfico 30 - Estabilidad transversal caso 9

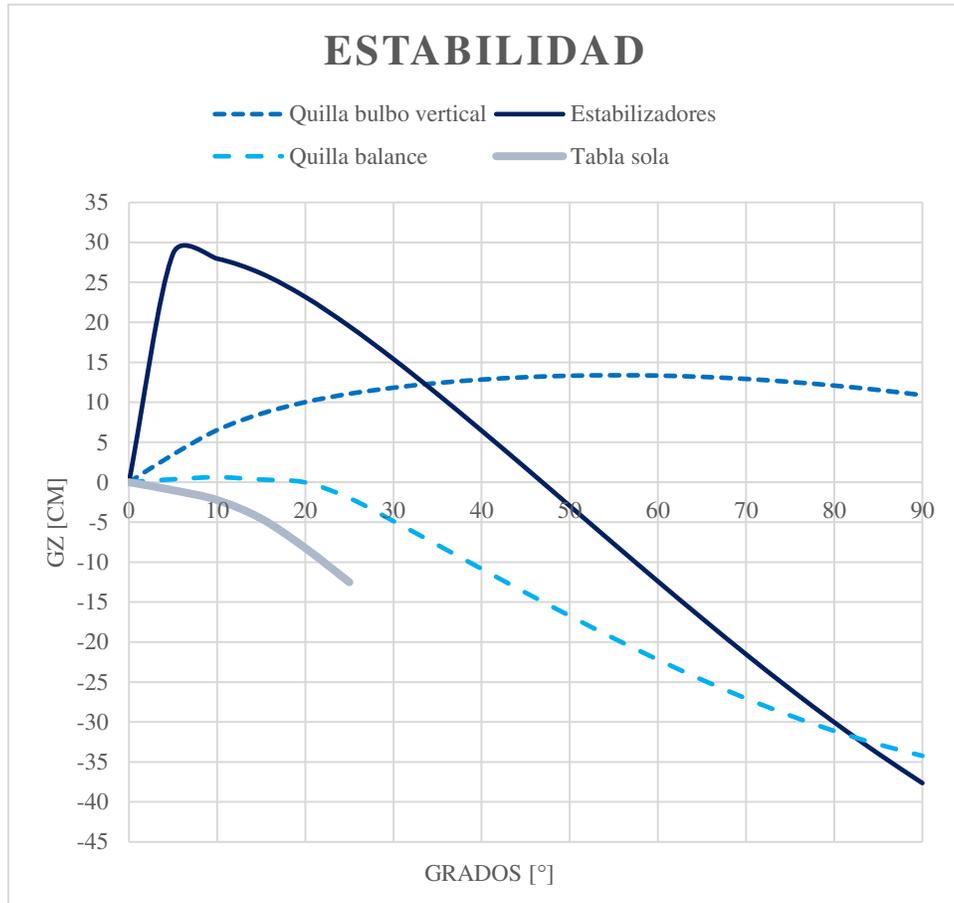


Gráfico 31 - Curvas GZ caso 9

9.4.10 Caso 10

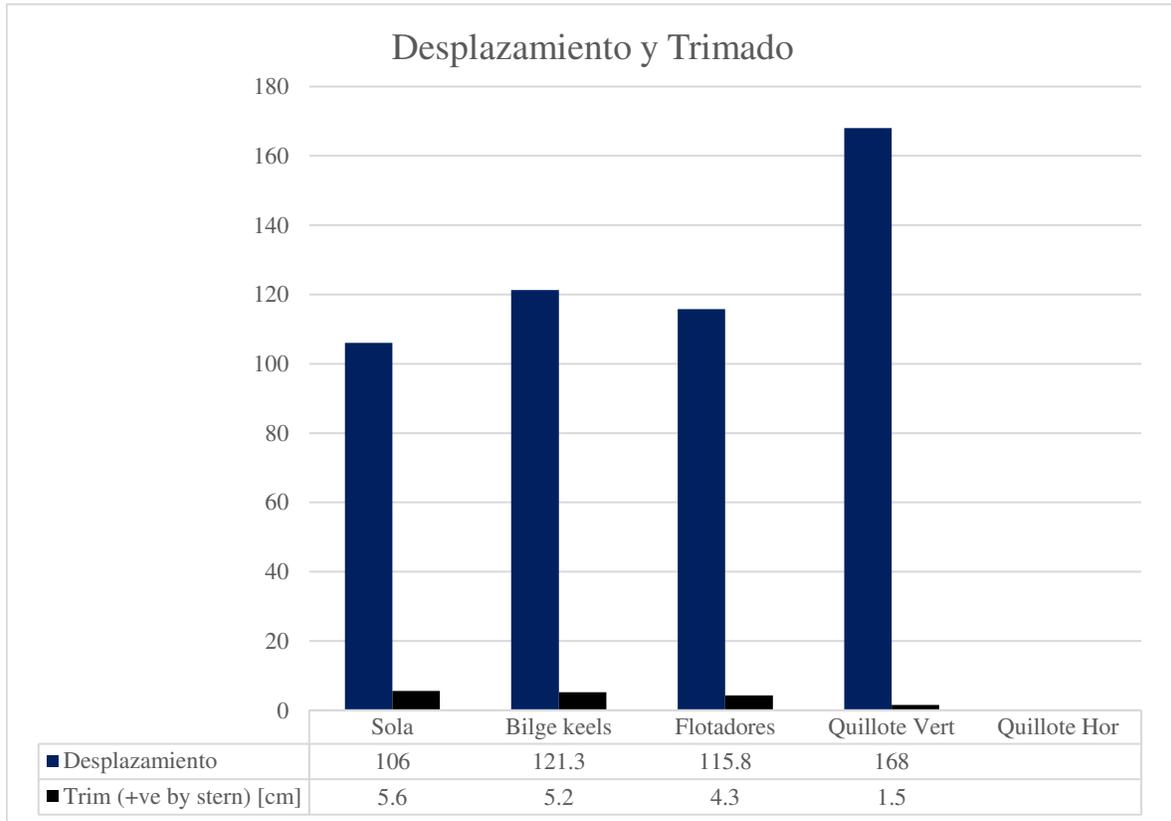


Gráfico 32 - Desplazamiento y trimado caso 10

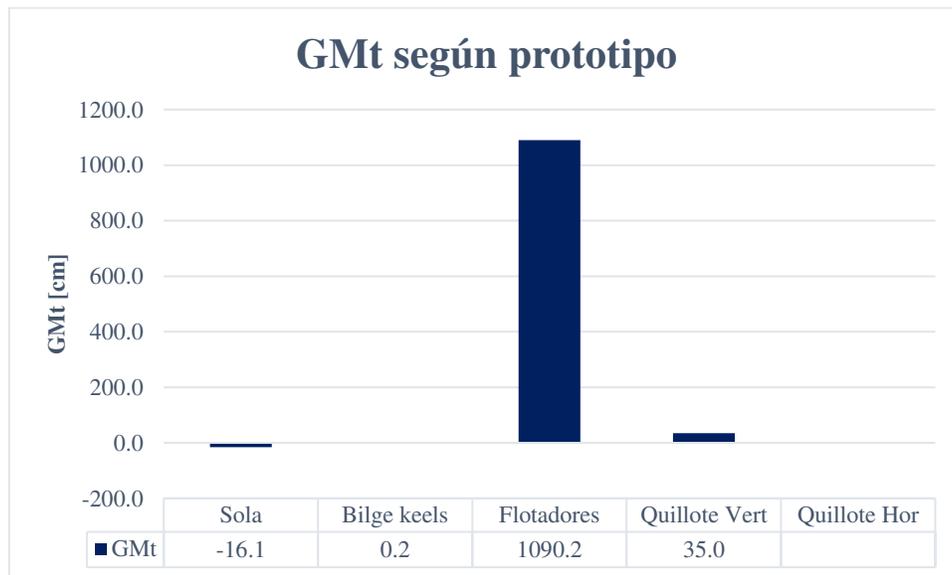


Gráfico 33 - Estabilidad transversal caso 10

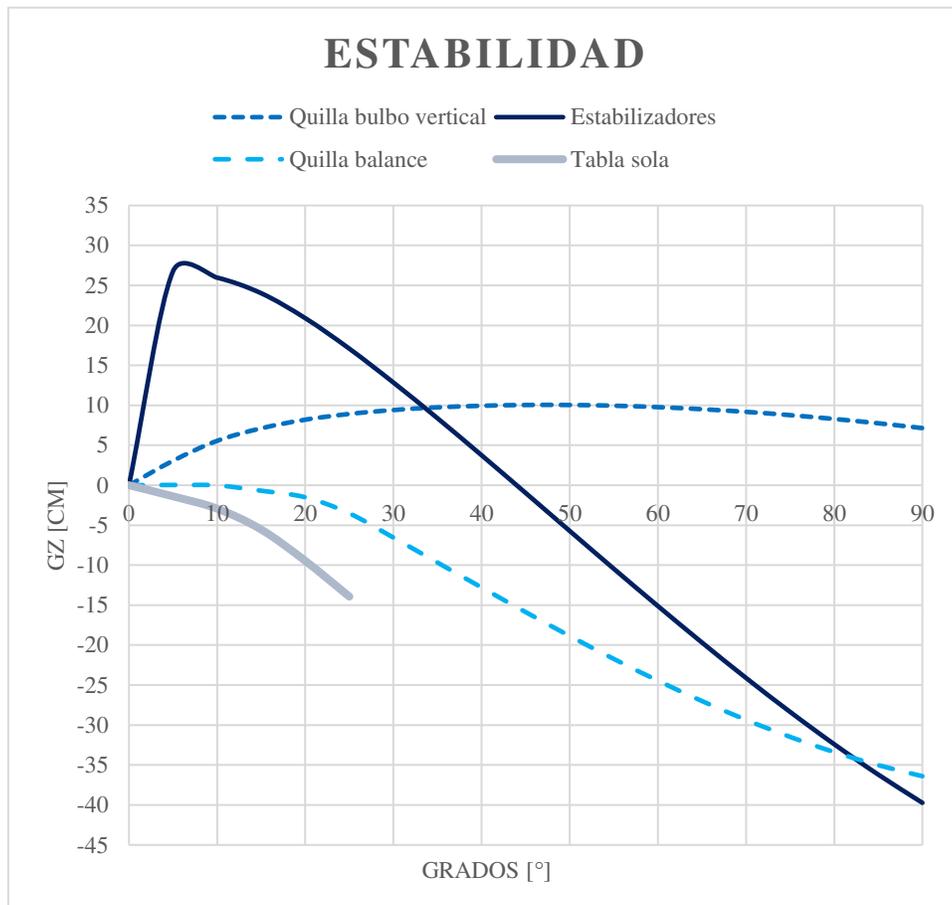


Gráfico 34 - Curvas GZ caso 10

9.4.11 Caso 11

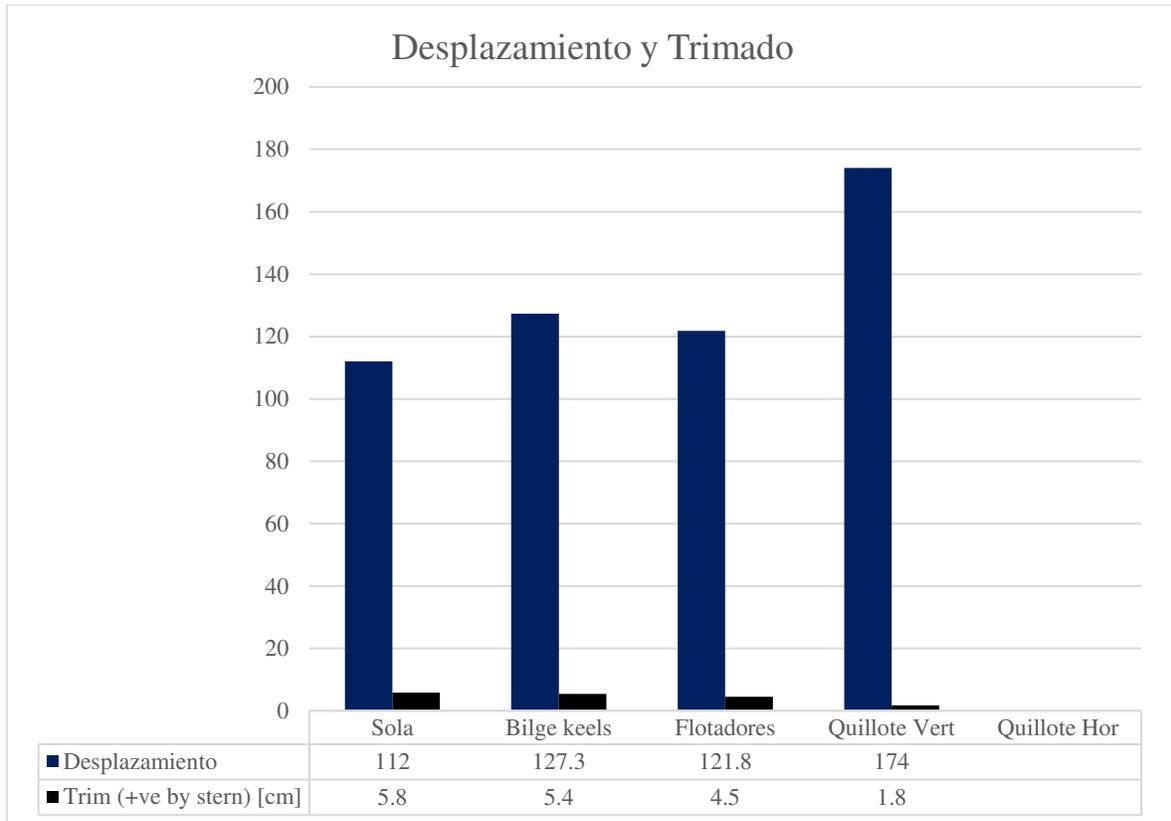


Gráfico 35 - Desplazamiento y trimado caso 11

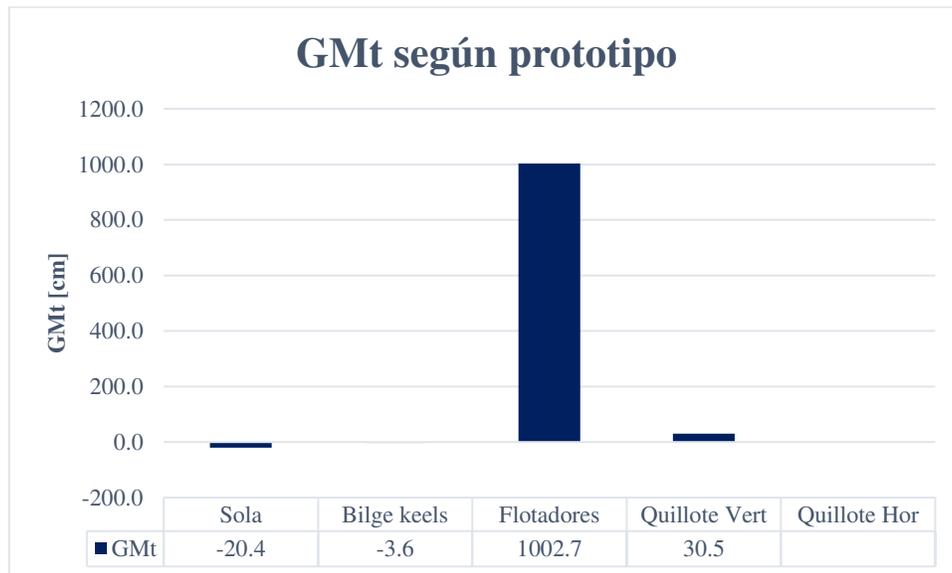


Gráfico 36 - Estabilidad transversal caso 11

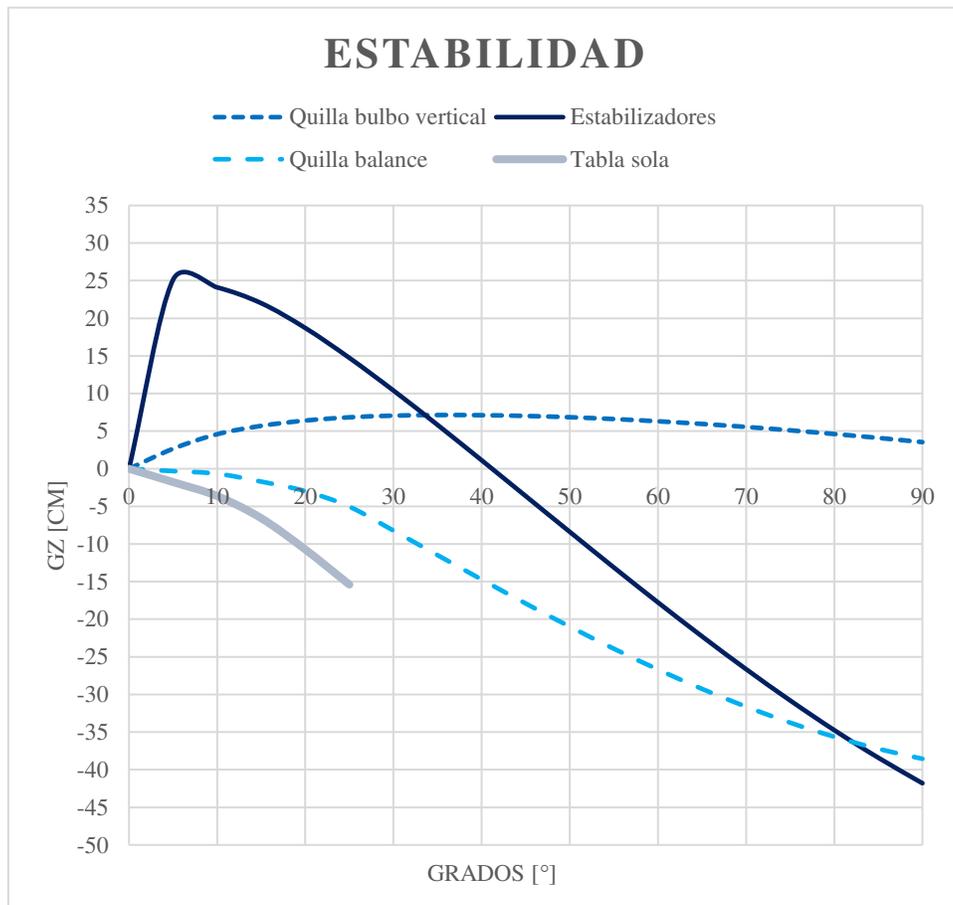


Gráfico 37 - Curvas GZ caso 11

9.4.12 Caso 12

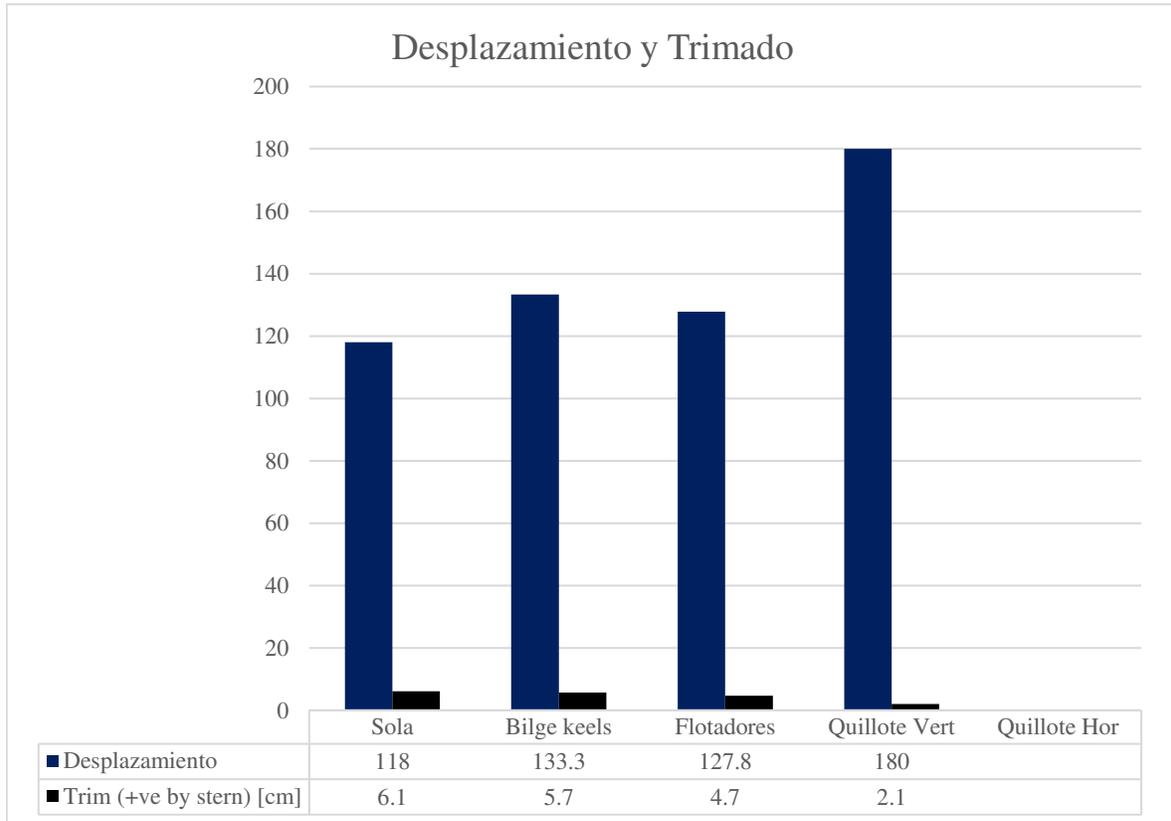


Gráfico 38 - Desplazamiento y trimado caso 12

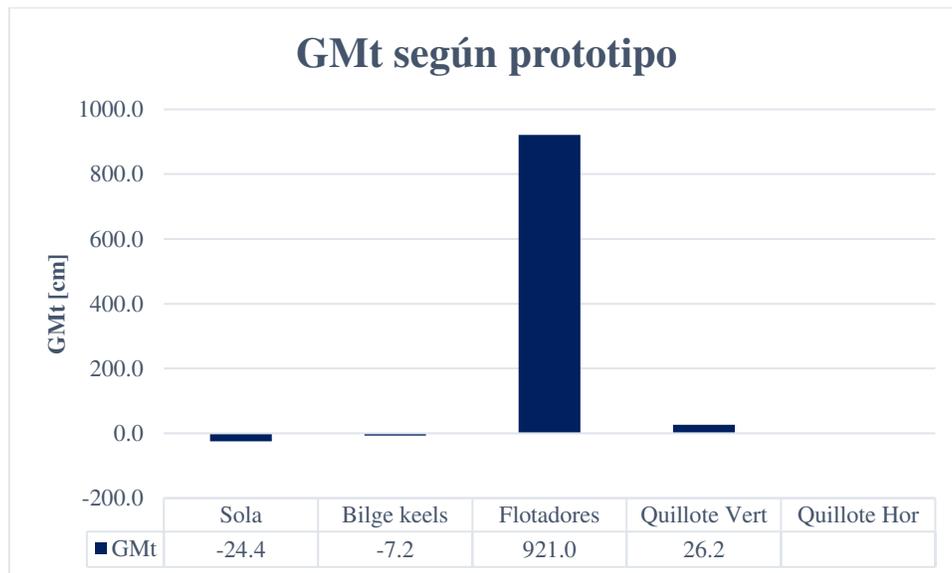


Gráfico 39 - Estabilidad transversal caso 12

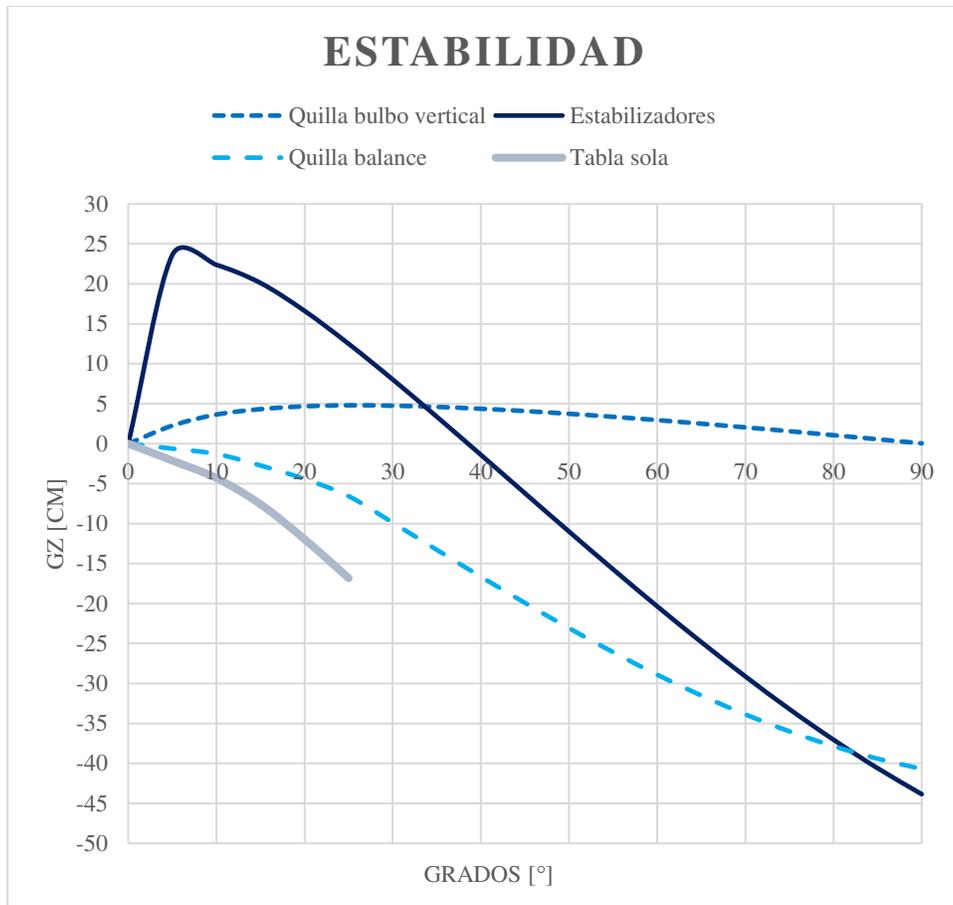


Gráfico 40 - Curvas GZ caso 12

9.4.13 Caso 13

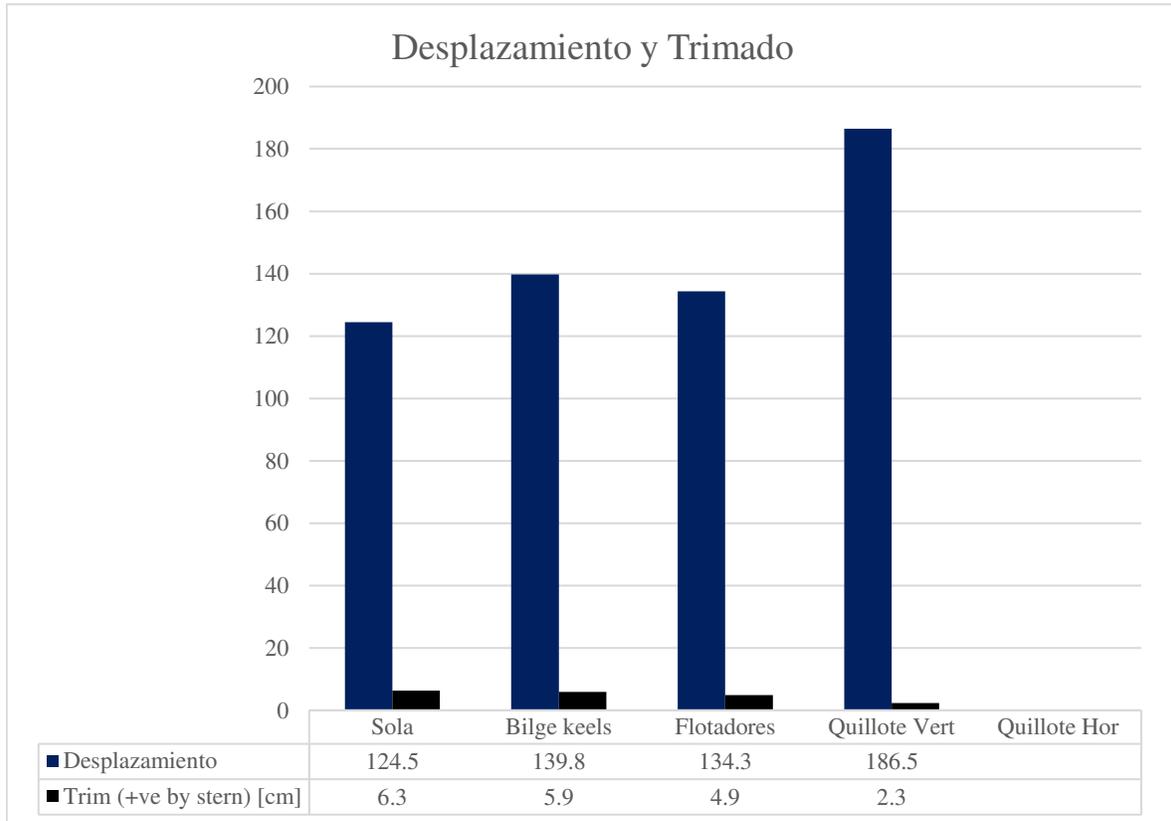


Gráfico 41 - Desplazamiento y trimado caso 13



Gráfico 42 - Estabilidad transversal caso 13

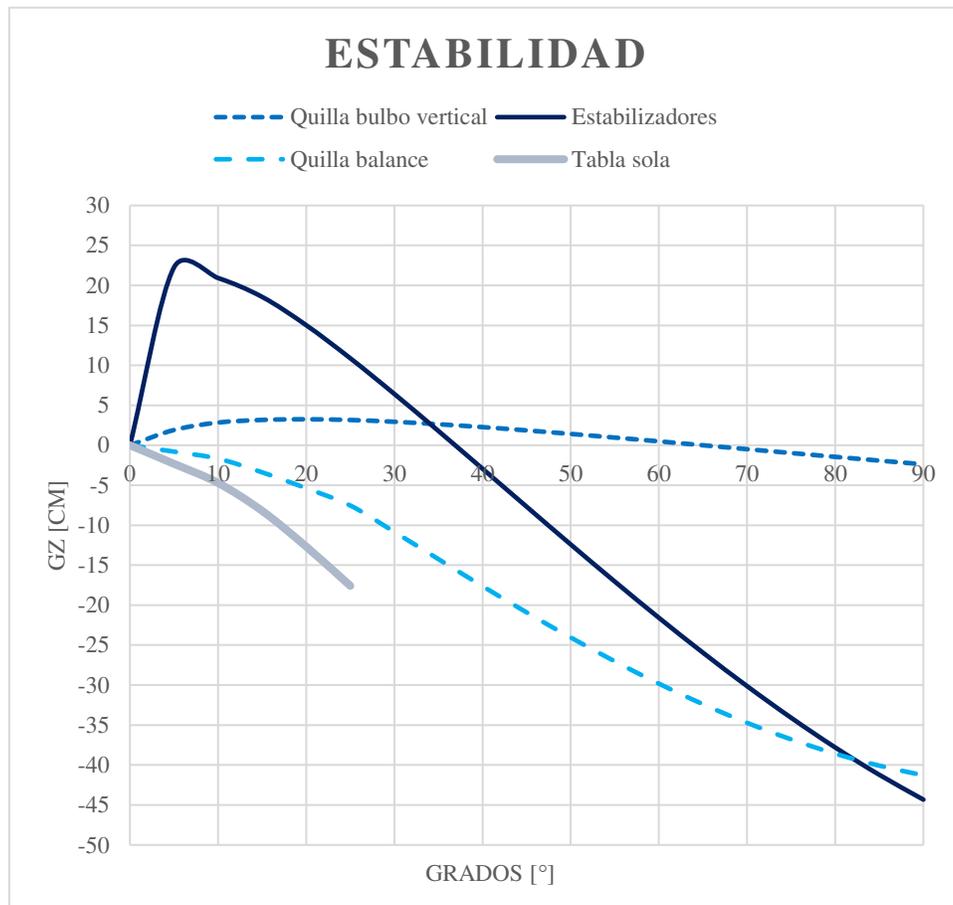


Gráfico 43 - Curvas GZ caso 13

9.4.14 Caso 14

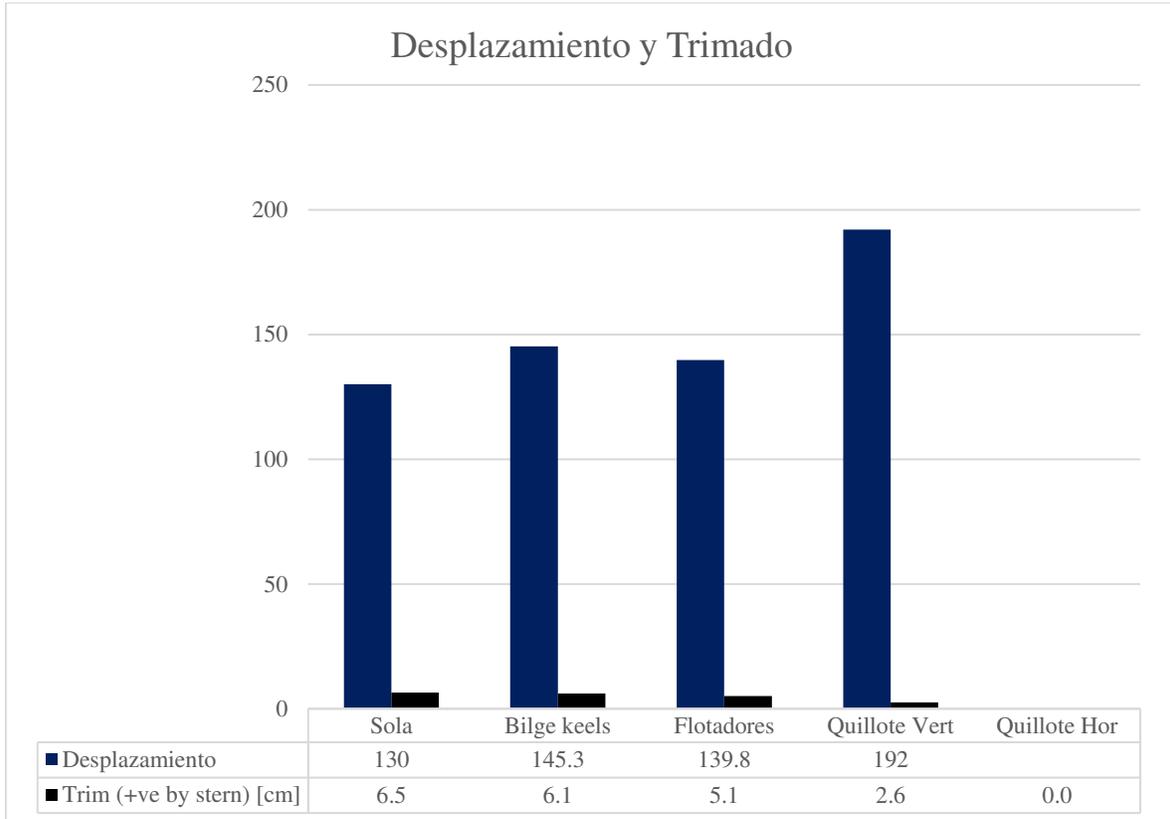


Gráfico 44 - Desplazamiento y trimado caso 14



Gráfico 45 - Estabilidad transversal caso 14

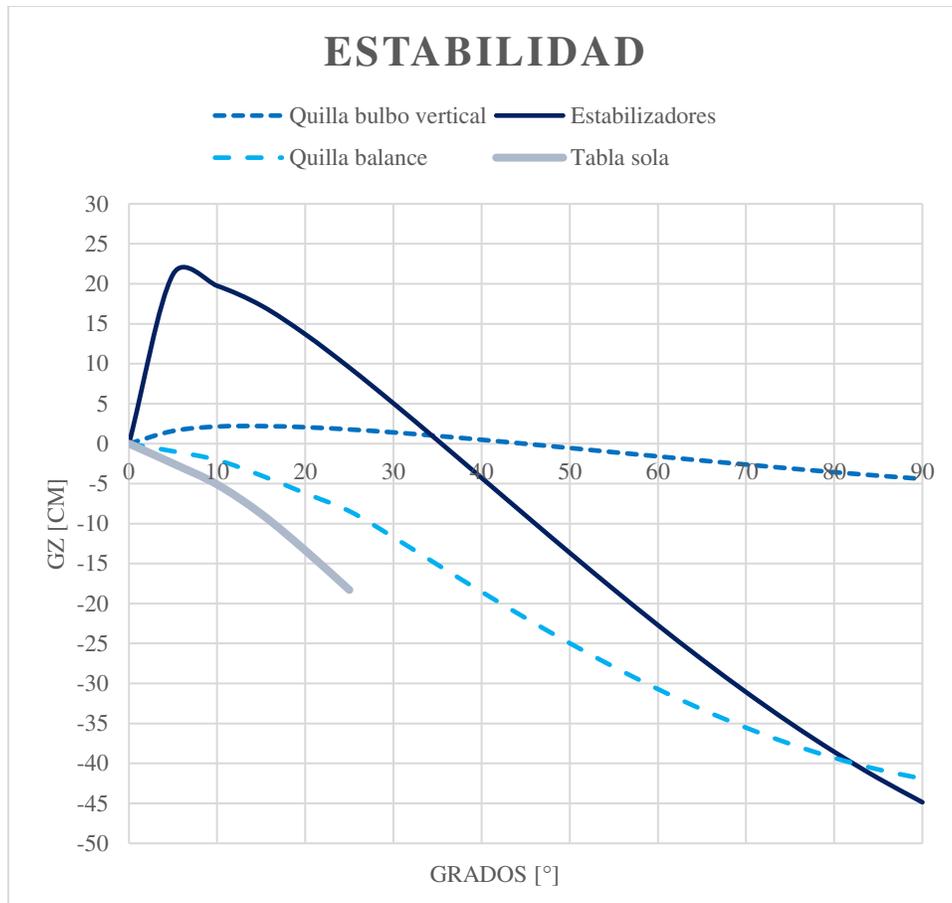


Gráfico 46 - Curvas GZ caso 14

9.4.15 Caso 15

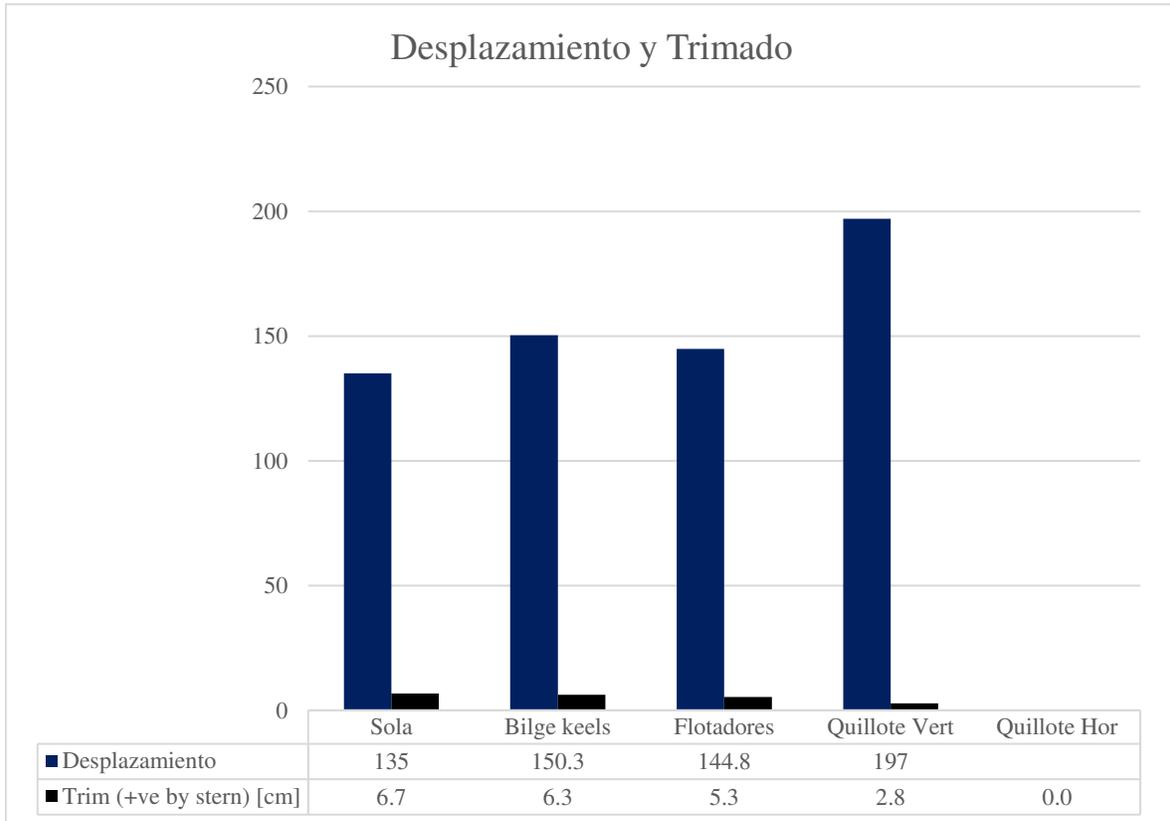


Gráfico 47 - Desplazamiento y trimado caso 15

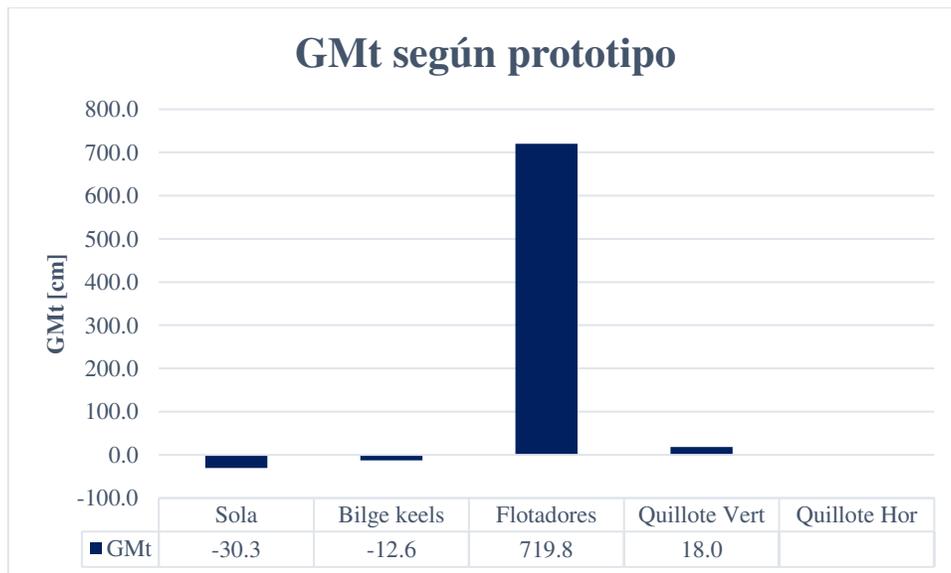


Gráfico 48 - Estabilidad transversal caso 15

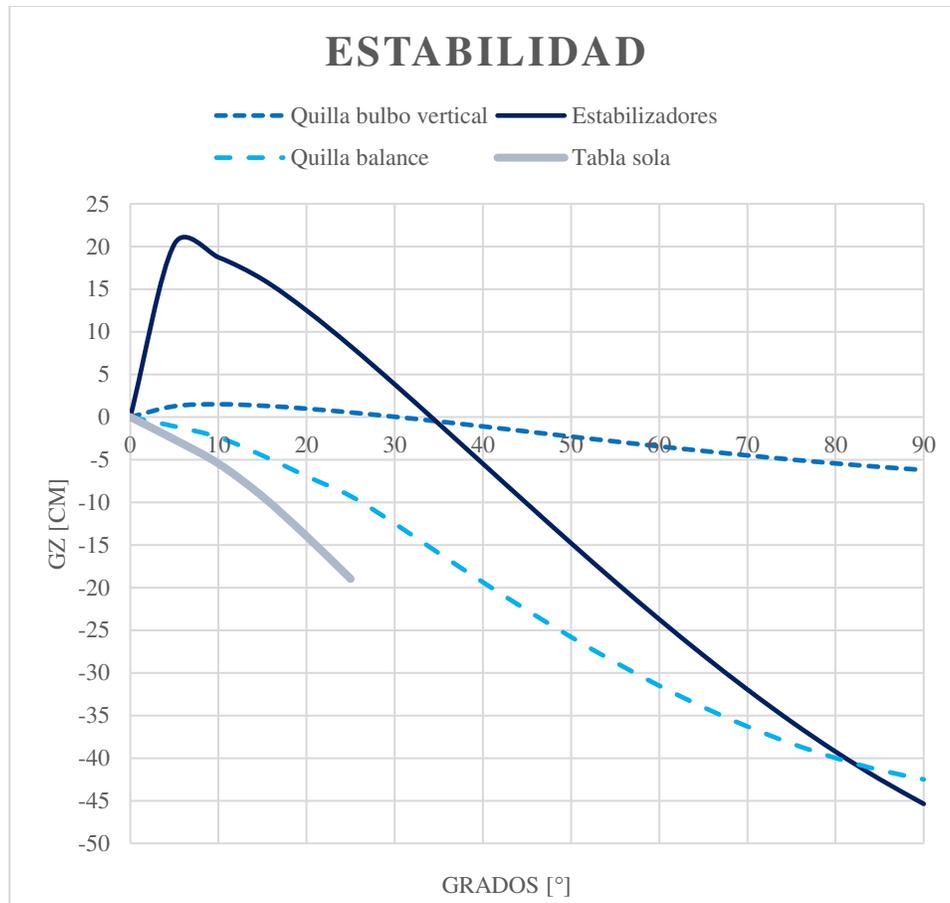


Gráfico 49 - Curvas GZ caso 15

De las gráficas anteriores se puede concluir lo siguiente:

- El modelo Flotadores es el más liviano de los tres modelos presentados, esto hace lo transforma en el modelo con menor desplazamiento del grupo.
- El trimado para cada uno de los 15 casos presenta una tendencia de disminución en relación con la tabla sin modificaciones, donde destaca el modelo Quilla de Bulbo con un trimado tendiente a cero, mientras que el modelo Flotadores varía levemente desde el caso con un trimado de -0,5 cm a 2,8 cm para el caso 15.
- La estabilidad transversal (GMt) es uno de los aspectos donde destaca notablemente el modelo Flotadores, siendo su menor registro 720 cm en el caso 15.
- En cuanto a las características de estabilidad, hay dos modelos que destacan, el modelo Flotadores y Quilla bulbo. Por otro lado, el modelo Quillas de Balance, sólo supera la estabilidad de la tabla sin modificaciones y desde la condición de carga 10 en adelante su estabilidad se vuelve nula.

Los modelos de Flotadores y Quilla bulbo presentan dos tendencias distintas en sus gráficas de estabilidad, el primero de ellos tiende a alcanzar grandes picos de GM a bajos grados de inclinación, el segundo, presenta una curva más suave, la cual se caracteriza por un GM de menor

magnitud que el modelo Flotadores, pero con una gran capacidad de estabilidad, se destaca que hasta la condición de carga 12, su estabilidad sobrepasa los 90° de inclinación.

Ambas condiciones mencionadas anteriormente encuentran una explicación lógica cuando se compara con una embarcación. Por ejemplo, en naves donde la manga se ve incrementada se originan valores más altos de las alturas metacéntricas (GM) y brazos adrizantes (GZ), lo que corresponde con el modelo Flotadores, donde los flotadores emulan un aumento de manga en la tabla, sin embargo, este aumento de manga significa una disminución de su estabilidad, pudiendo volcar a un ángulo de escora más pequeño [6].

Por otro lado, tenemos que cuando a una embarcación se le añade peso, su centro de gravedad se mueve en la dirección del peso añadido, como ocurre con el modelo Quilla Bulbo, donde el peso añadido se sitúa en la parte más baja del quillote, bajando demasiado su centro de gravedad y aumentando su altura metacéntrica (GM), en comparación a la tabla sin modificaciones y al modelo Quillas de Balance, pero bastante menor que la altura metacéntrica del modelo Flotadores.

10 Modelo seleccionado

Dadas las conclusiones anteriores, considerando que la navegación se realizará principalmente en lagos, ríos navegables, y aguas tranquilas en general. Lo anterior sumado a la dificultad constructiva, se escoge el Modelo II: flotadores laterales, dada su alta estabilidad transversal y su aceptable curva estabilidad, además del escaso trimado presente.

En las secciones siguientes se mostrará el proceso constructivo del modelo seleccionado.

11 Construcción del modelo

En el apartado siguiente se detalla el prototipo construido con sus dimensiones finales, su estudio de estabilidad, materiales utilizados y su comportamiento en el río Calle - Calle.

11.1 Característica general del prototipo

El prototipo por crear se compone de cuatro partes principales, Figura 22, éstas son:

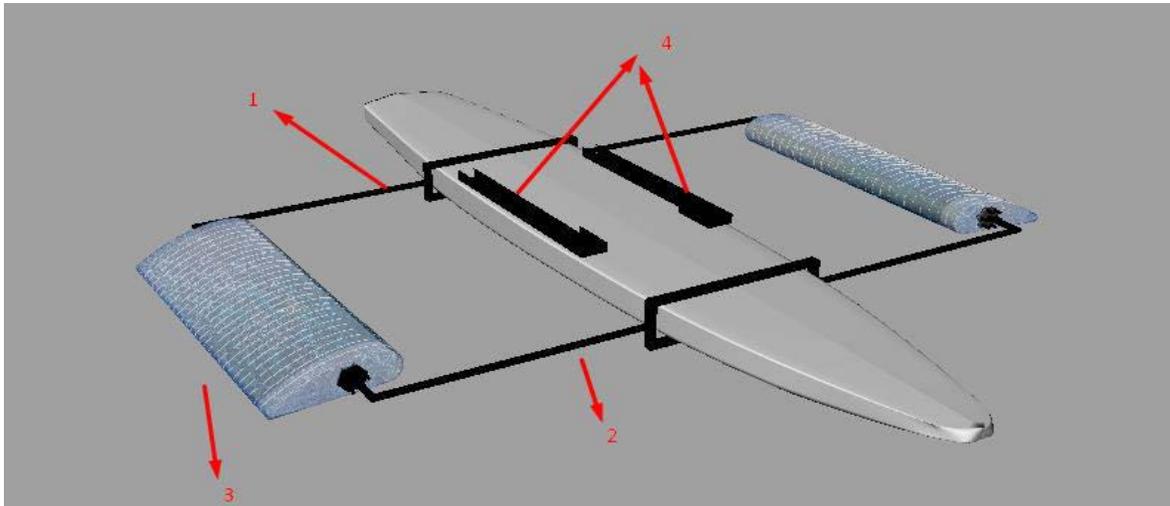


Figura 22 - Partes del prototipo

- 1: Marco de popa: cuya función es acoplarse a los estabilizadores por la popa de la tabla.
- 2: Marco de proa: cuya función es acoplarse a los estabilizadores por la proa de la tabla
- 3: Flotadores: definen la distancia a la cual se ubican los marcos, entregan la estabilidad extra al sistema.
- 4: Riel de anclaje: su función es mantener la silla de ruedas sujeta a la tabla.

11.2 Dimensiones principales y construcción

En esta sección se definen las dimensiones principales de las partes del prototipo mencionadas en Figura 22, además del proceso constructivo de cada elemento.

11.2.1 Estabilizadores

Las dimensiones requeridas se definen en Figura 23. En relación con el modelo propuesto en Modelo II: flotadores laterales Anexo 2, se disminuyó su longitud, sin embargo, se aumentó su sección transversal, además de definir los bordes de la sección transversal con dos circunferencias, las cuales definen el borde del flotador.

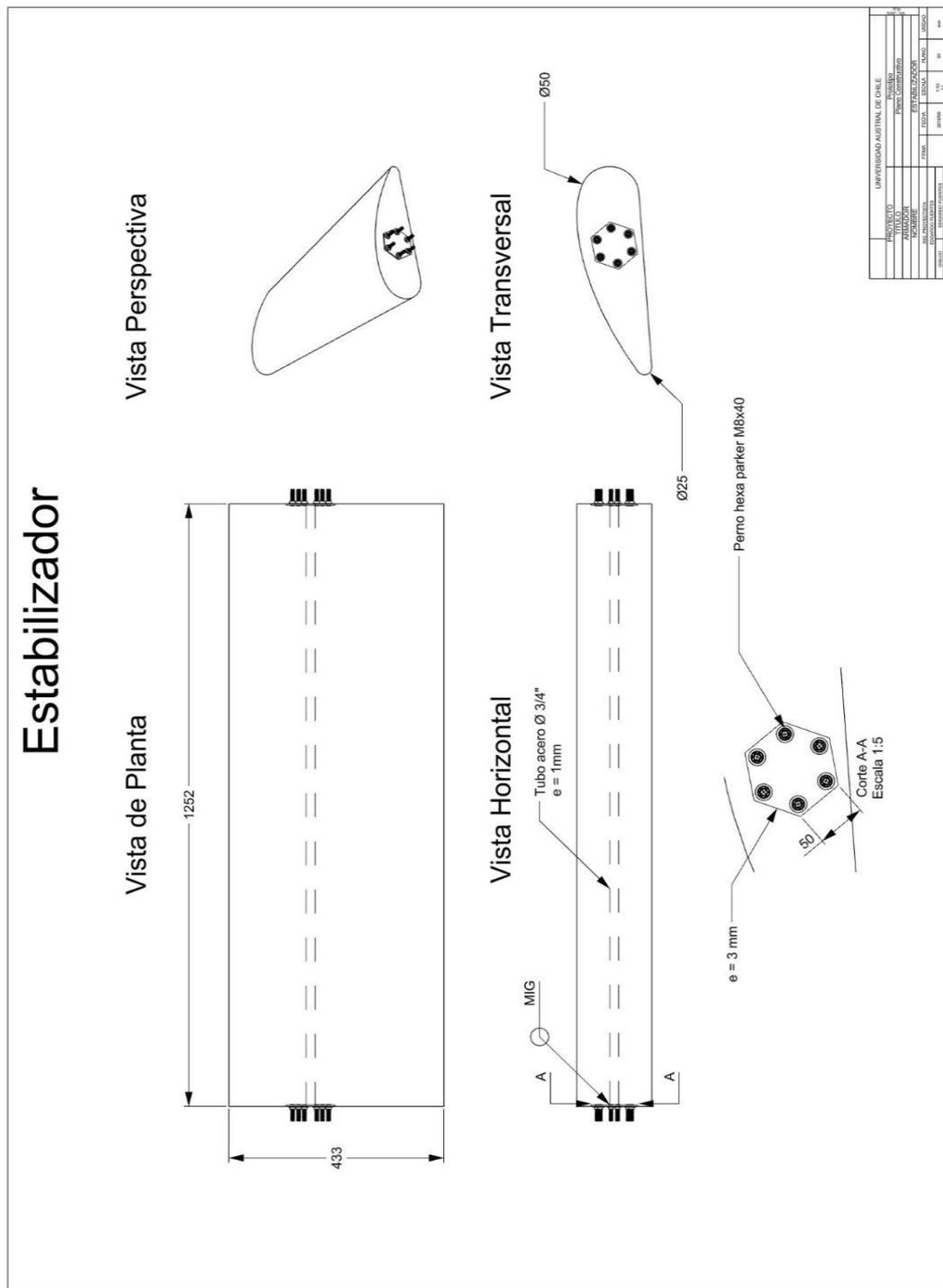


Figura 23 - Plano constructivo estabilizadores

La primera consideración a la hora de construir el flotador es que debe ser liviano, para esto se hará con fibra de vidrio y resina de poliéster semi acelerada.

Para poder hacer el laminado se utilizará una matriz base Figura 25, hecha mediante fajas de poliestireno expandido (plumavit), esta matriz base, debe ser recubierta con un sachet de polietileno transparente genérico, Figura 24. Sin esta cobertura el poliestireno se vería afectado por la alta temperatura alcanzada en el proceso de curado de la mezcla de resina y fibra de vidrio.

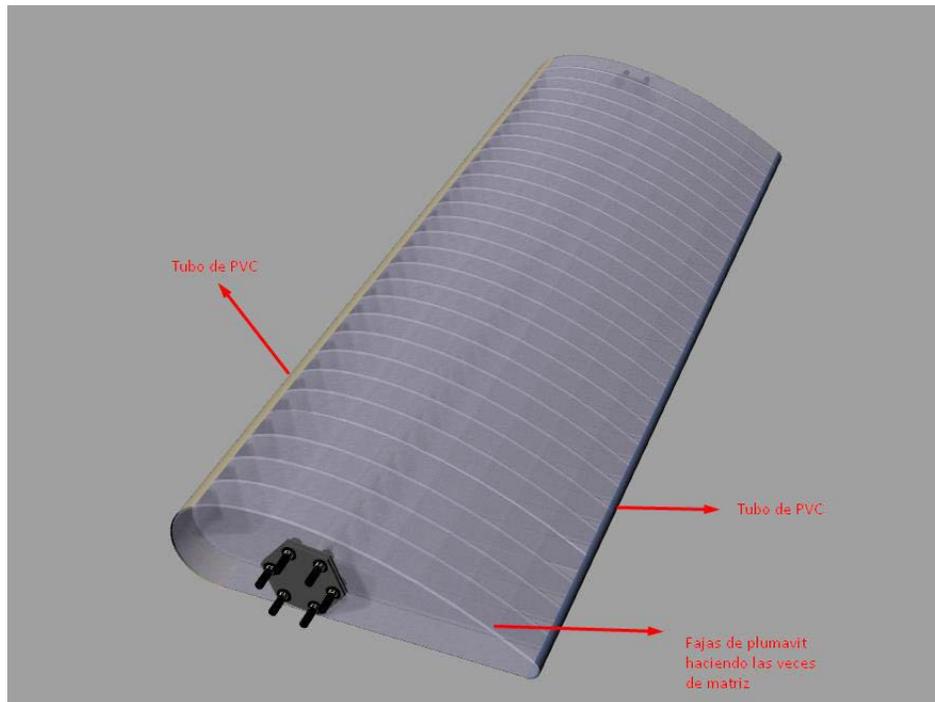


Figura 25 – Componentes del estabilizador



Figura 24 - Sachet polietileno genérico

Para obtener las fajas de plumavit se utilizaron planchas de plumavit de 1x0,5m x 50mm, con densidad aparente de 10 kg/cm³,

Una vez hechas las fajas, estas fueron agrupadas mediante un tubo metálico hueco de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, véase Figura 23, esto con el objeto de entregarle mayor resistencia a la flexión en el sentido longitudinal del estabilizador, además de asegurar la agrupación de las fajas de plumavit. Dicho tubo metálico previamente fue soldado a su respectivo acople, Figura 23 corte A-A, mediante soldadura MIG aplicada a todo alrededor. Ya teniendo agrupadas las fajas de plumavit se procedió a soldar el acople del lado opuesto, protegiendo de salpicaduras candentes al plumavit, en la Figura 23 vista de planta se representa el objetivo alcanzado. Con todo lo anterior montado, para dar mejor definición a los bordes del estabilizador se colocan tubos de PVC de 50 mm y 25 mm de diámetro a cada lado del flotador como se indica en la Figura 25, los cuales además contribuyen a reforzar la estructura en su sentido longitudinal. Luego de esto se procede a cubrir toda la matriz o base con el genérico de polietileno para luego poder aplicar el pack de fibra de vidrio con su respectiva resina de poliéster y catalizador. En la Figura 26 se proyecta el modelo esperado a obtener. En la Figura 27 se observa el modelo obtenido luego de aplicar el proceso de trabajo anterior y posterior pintado con esmalte al aceite azul.

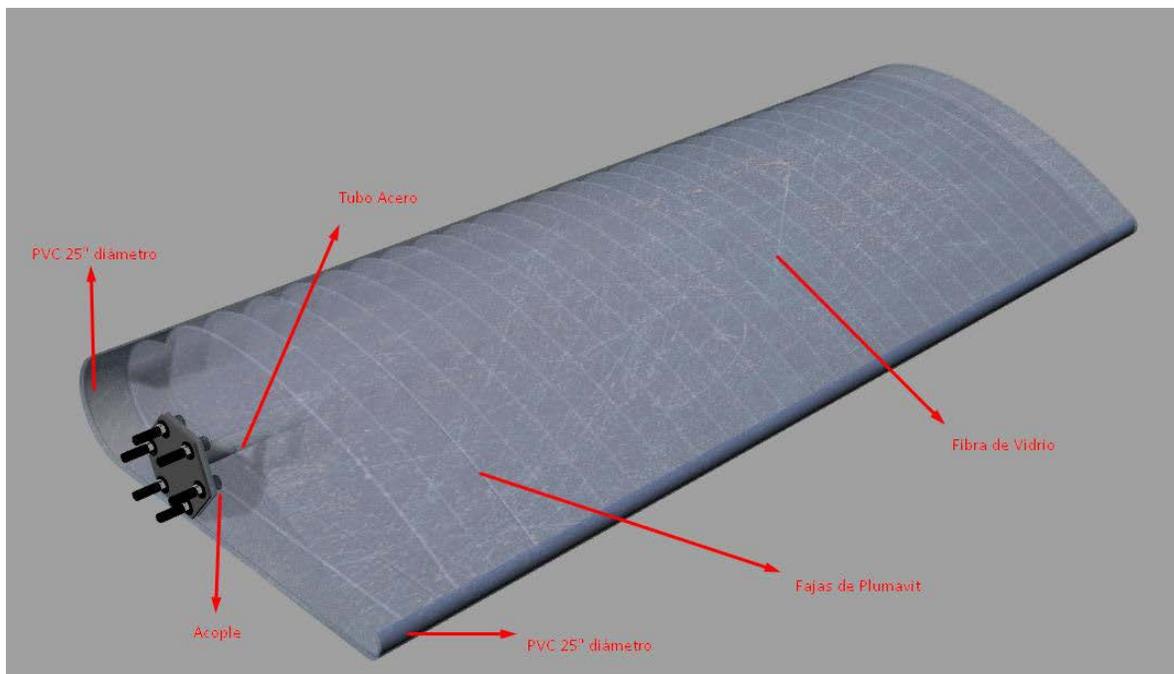


Figura 26 - Resultado esperado



Figura 27 - Estabilizador obtenido

11.2.2 Marcos

La función de los marcos, tanto de proa como de popa, es unir los flotadores a la tabla, y sus dimensiones están definidas según la sección transversal correspondiente de la tabla.

Las dimensiones de los marcos de popa y proa se encuentran en Figura 28 y Figura 29. El proceso constructivo consiste en dimensionar los perfiles especificados y unirlos mediante soldadura del tipo MIG aplicada en todo alrededor.

Para completar el proceso constructivo se procedió a pintar ambos marcos, primero con una capa de anticorrosivo negro y luego una mano de pintura negra de esmalte.

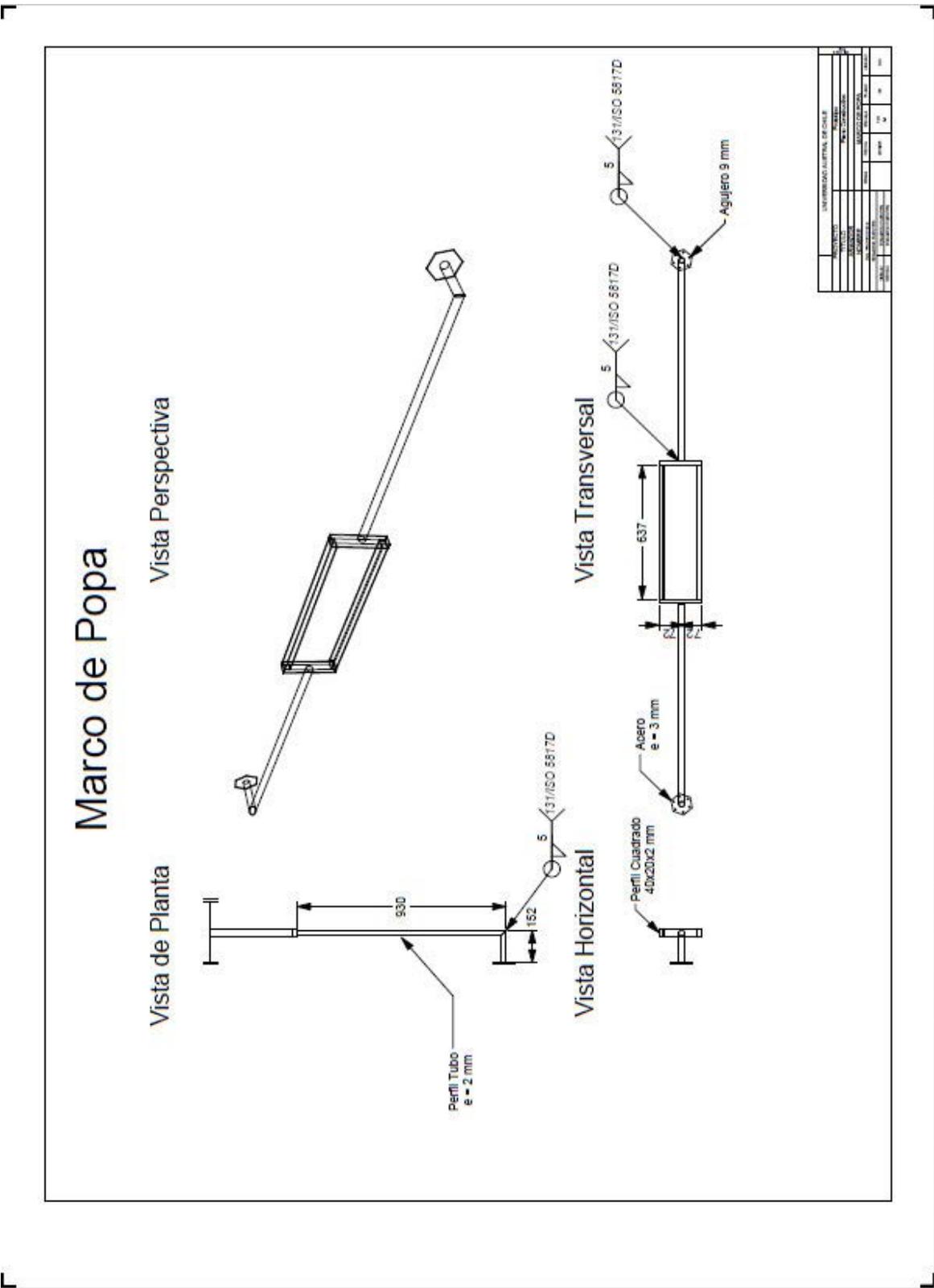


Figura 28- Estructura marco de popa

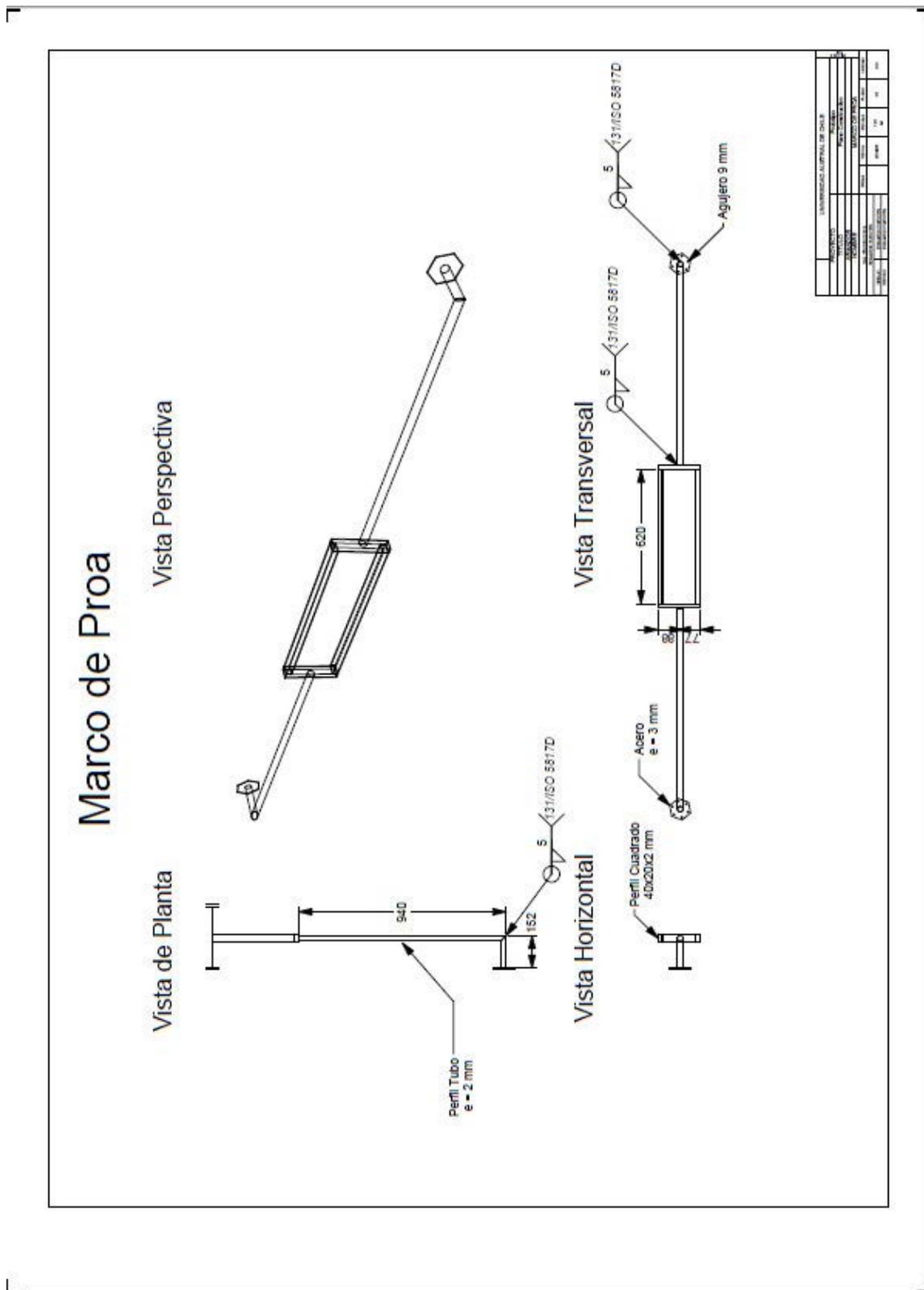


Figura 29 - Estructura marco de popa

La simbología de soldadura de las Figura 28 y Figura 29, se remiten a las normas de la American Welding Society (AWS) y la American National Standard (ANS) tituladas "Standard Symbols for Welding, Brazing and Non-destructive Testing", ANSI/AWS A2.4.

En las Figura 28 y Figura 29, se indica la información referida a una soldadura a filete simple, mediante soldeo con alambre sólido para proceso MIG (referencia 131 Norma ISO 4063), nivel de aceptación requerido D (Norma ISO 5817).

11.2.3 Sujetador tabla – silla de ruedas

El método de sujeción entre la tabla y la silla de ruedas se hará por medio de un perfil del tipo canal de material Metalcon cuyas dimensiones se observan en Figura 30.

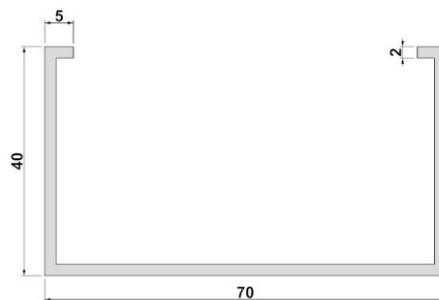


Figura 30 - Vista transversal canal Metalcon

La unión se hará por medio de un perno de 130 mm de largo cuyo diámetro es de 9,5 mm y se asegurará por medio de una tuerca de freno y una golilla plana, para hacer pasar este perno se perforará la tabla en tres puntos diferentes según el plano Figura 32.

Para asegurar la sujeción de la silla de ruedas se utilizarán pernos pasadores como se aprecian en Figura 31, los detalles constructivos se encuentran en la Figura 32.

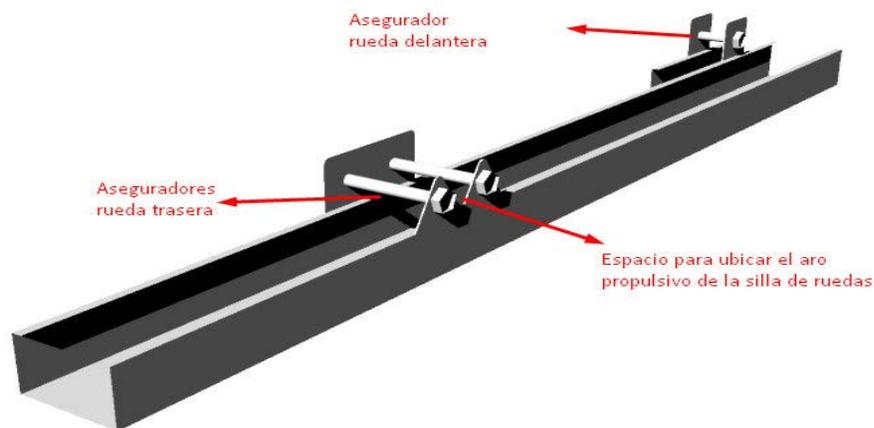


Figura 31 - Sujeción tabla - silla de ruedas

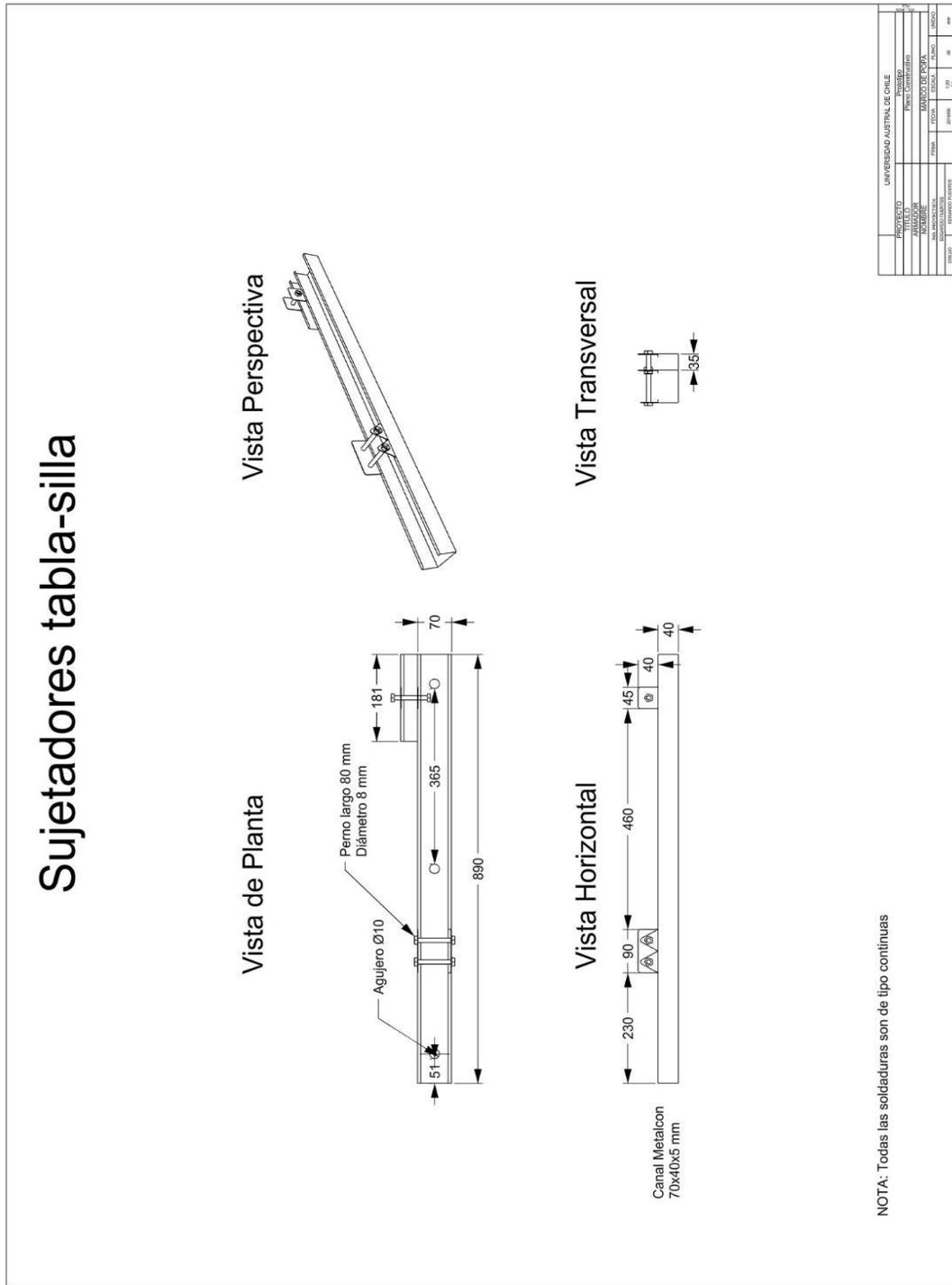


Figura 32 – Estructura de sujeción tabla - silla

11.3 Cálculo estructural

En esta sección presentarán la condición de carga más desfavorable posible para el flotador y un análisis de soldadura para el marco. Se demostrará que el módulo de sección necesario para dicha condición de carga es inferior al módulo de sección aportado por los refuerzos longitudinales internos del flotador. Por otra parte, se realizará un análisis de dimensionamiento de soldadura necesario para que el marco supere la tensión encontrada en su unión al brazo de acople al flotador, Figura 33.



Figura 33 - Punto de tensión en el marco

11.3.1 Condición de carga de flotador

Para el análisis se considera la condición de carga más crítica a la cual se pueda ver sometido el flotador. El volumen desplazado por uno de los flotadores (V_{DF}), según el cálculo del volumen del modelo del flotador según *Rhinoceros*, es el siguiente:

$$V_{DF} = 0,053 \text{ m}^3$$

A partir de lo anterior, y considerando una densidad de $1,025 \text{ kg/m}^3$, es posible determinar la fuerza de empuje producida por el agua sobre uno de los flotadores:

$$F_E = 1,025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,053 \text{ m}^3$$

$$F_E = 54,3 \text{ kg}$$

Dada la condición de fuerzas externas actuando sobre el centro de gravedad del flotador, Figura 34, se tiene que la fuerza neta actuando en esta condición es la siguiente:

$$F_{Neta} = P_{esoFlotador} - F_E$$

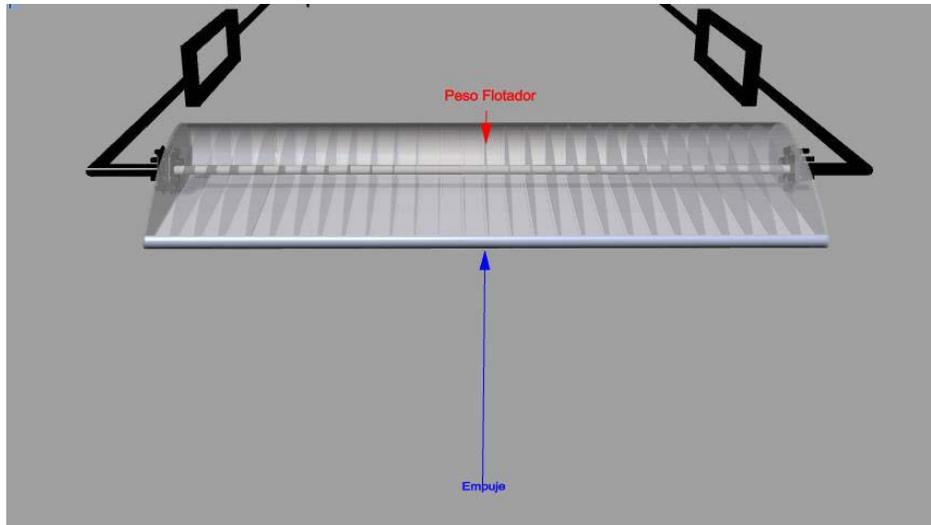


Figura 34 - Fuerzas actuando sobre el flotador

El peso del flotador es de 6,70 kg, con lo cual se obtiene:

$$F_{Neta} = -47,6 \text{ kg}$$

La fuerza neta que actuaría en la condición de carga más crítica para el cálculo estructural del flotador es de 47,6 kg actuando hacia arriba sobre el centro de gravedad del flotador. El diagrama de cuerpo libre siguiente, Figura 35.

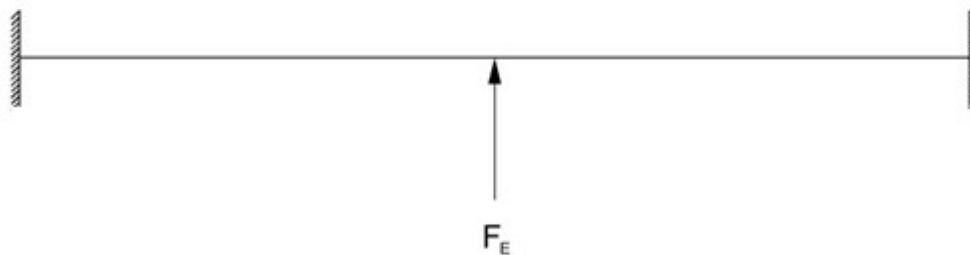


Figura 35 - Diagrama cuerpo libre considerado

Del diagrama anterior, se considera como caso de estudio una viga simple empotrada con una carga puntual centrada (F_E) cuya longitud es de 1252 mm de largo, dicha condición de carga genera un momento flector, determinado por la ecuación descrita en la Tabla 10.

Tabla 12 – Ecuación para estudio flotador

Diagrama	Ecuación
	$M_{\max} = M_C = \frac{FL}{8}$

Donde se define:

F	= F_N	Fuerza de empuje	47,6 kg
L		Largo viga o flotador	1.252 mm

Se obtiene el momento flector siguiente (M_C):

$$M_C = 7.445 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

El esfuerzo al cual se somete la viga - flotador se define como:

$$\sigma_{Flot} = \frac{M_C \cdot c}{I}$$

Dónde:

M_c : momento flector

c : distancia del eje neutro al centroide inferior o superior (la mayor entre ambas)

I : inercia de la sección transversal

Según los valores obtenidos de Tabla 13, se calcula el siguiente esfuerzo sobre el flotador:

$$\sigma_{flot} = \frac{7.445 \cdot 87,9}{1.999.386} = 0,656 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} = 65,6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Dónde σ_{ad} corresponde al esfuerzo admisible del PVC. Se conoce que el esfuerzo de rotura del PVC a la flexión (σ_{rot}) corresponde a 700 kg/cm². Comparando este valor con el esfuerzo sobre el flotador anterior es posible determinar el factor de seguridad a la rotura:

$$FS = \frac{\sigma_{rot}}{\sigma_{rot}} = 10,69$$

Para corroborar el factor de seguridad anterior, se comparará también el módulo de sección transversal del flotador.

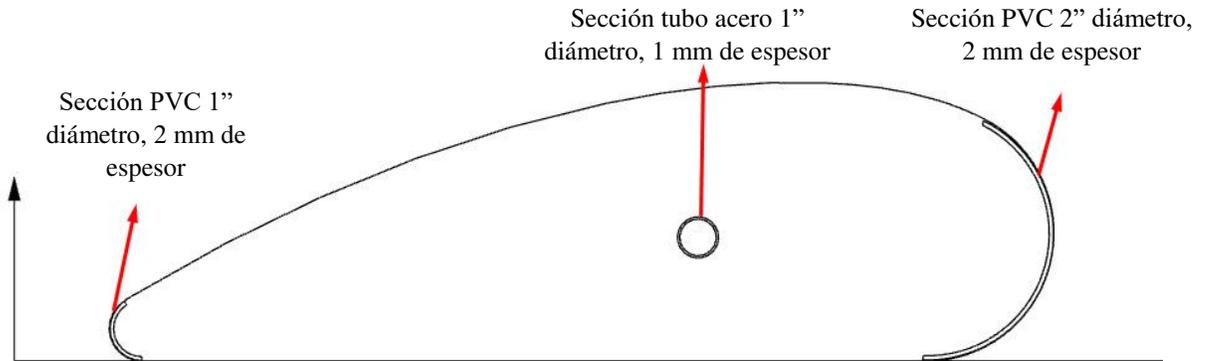


Figura 36 - Refuerzos longitudinales del flotador

11.3.1.1 Módulo de sección

De la definición de módulo de sección se tiene:

$$SM = \frac{M_c}{\sigma_{ad}}$$

11.3.1.2 Módulo de sección requerido

El módulo de sección mínimo requerido en relación con el esfuerzo de rotura del PVC es el siguiente:

$$SM = \frac{7.445 \text{ kg} \cdot \text{mm}}{700 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}} = 2.127 \text{ mm}^3$$

11.3.1.3 Módulo de sección ofrecido

El módulo de sección presentado por el flotador, aportado sólo por sus refuerzos longitudinales se define en la Tabla 13, donde las inercias, áreas y centroides de cada pieza fueron determinados mediante Rhinoceros.

Tabla 13

Tabla de Cálculo							
Nº	A	Y	A*Y	I	d	A*d ²	I+A*d ²
	[mm ²]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
1	56,7	57	3232	2316	15	14399	16715
1	150,80	49	7389	87010	109	1815734	1902744
3	72,26	12	867	9628	31	70299	79927
	279,8		11488				1999386

Centroide Superior [Yu]	41,07	mm
Centroide inferior [Yd]	87,93	mm

Modulo resistente en base	48.698,4	mm³
Modulo resistente en perfil	22.737,2	mm³

A partir de la relación siguiente se obtendrá el factor de seguridad adoptado en relación con el esfuerzo de rotura:

$$FS = \frac{SM_{ofrecido}}{SM_{rotura}} = \frac{22.737}{2.127} = 10,69$$

De todo lo anterior se concluye que el módulo resistente mínimo se encuentra en la parte curva del flotador, la cual es sometida a flexión en condición de tracción, correspondiente al perfil. Y dicho módulo es superior al módulo de sección mínimo requerido. Por lo tanto, el flotador resiste sin problemas la condición de carga planteada con un factor de seguridad a la rotura de 10,7.

11.3.2 Cálculo estructural del marco

En esta sección se presentan las condiciones de carga más desfavorables para el marco. El cuál es el punto de concentración de tensiones originado en la unión entre el marco y el brazo que conecta al flotado. Para el cálculo estructural se utiliza el método de elementos finitos mediante el software SolidWorks 2017 ®.

11.3.2.1 Condición de carga del marco

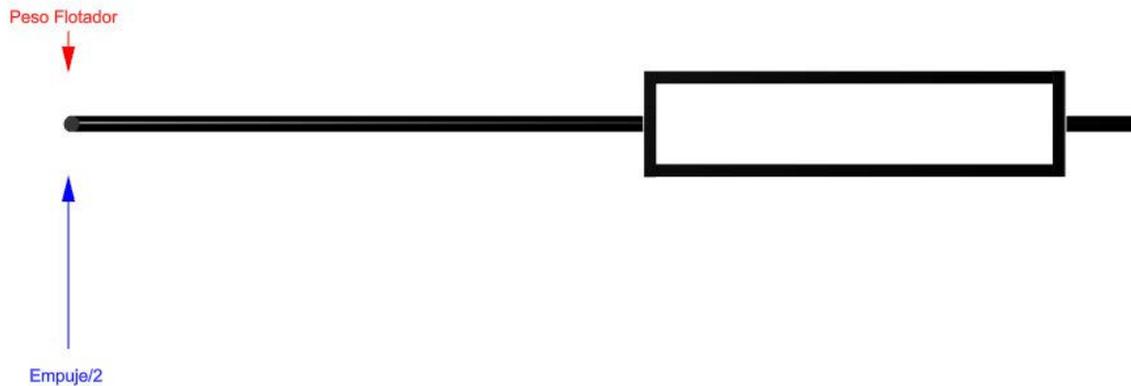


Figura 37 - Fuerzas presentes sobre el marco

Homologo a lo planteado anteriormente, se considera como el caso más desfavorable la acción del empuje considerando al flotador completamente sumergido. Sin embargo, esta vez la fuerza se considerará directamente sobre el extremo del brazo que acopla el flotador al marco, Figura 37.

El diagrama de cuerpo libre y la ecuación que representa el caso anterior se encuentra en la Tabla 14. El estudio corresponde a una viga simple en voladizo, con carga puntual en el extremo, donde F corresponde a la fuerza neta dividida en dos, dado que son un marco a popa y otro a proa, (23,8 kg) y como largo de la viga se considerará 0,94 m, que corresponde al brazo más grande entre marco de popa y proa.

Tabla 14

Diagrama	Ecuación
<p>El diagrama muestra un brazo horizontal negro fijado a un punto B a la derecha. Una fuerza F apunta hacia abajo en el extremo libre a la izquierda. Una flecha horizontal etiquetada como 'x' indica la dirección positiva. El punto de fijación B está etiquetado con un circulo y la letra B. El punto A está etiquetado con un circulo y la letra A. La longitud del brazo es etiquetada como 'L'.</p>	$M_B = -FL$

El caso se resolverá mediante el software de elementos finitos SolidWorks simulation.

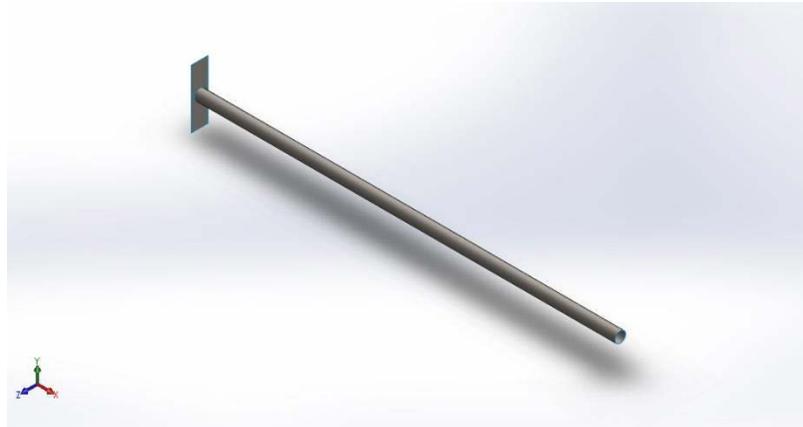


Figura 38 - Modelo tridimensional realizado en SolidWorks

11.3.2.2 Características de los componentes:

- Perfil : Tubo cilíndrico, 1” de diámetro, 2 mm de espesor, características ASTM 36
- Marco : Perfil rectangular 40x20x2, representado en el modelo tridimensional, Figura 38, por una placa plana de espesor 2 mm. Características ASTM 36
- Material de aporte : Electrodo ER 70 56, alambre recubierto en cobre, alambre MIG

11.3.2.3 SolidWorks

Para simular la condición de trabajo a la cual se ve sometido el marco y analizar el estado de la unión soldada, lo primero que se debe hacer es modelar la pieza a analizar, figura 3. Para realizar la simulación se selecciona en las opciones de conector de soldar por aristas el electrodo E70, Figura 39, con resistencia al corte de 318,54 MPa, estándar norteamericano y factor de seguridad unitario. Dentro de las condiciones de contorno se establece como fija la placa, y se aplica una fuerza puntual en el punto superior de la arista que representa el extremo de la barra de 0,94 metros de longitud igual a 233,5 N, Figura 42, este valor está dado por el producto entre 23,8 kg y la aceleración de gravedad considerada como 9.81 kg/m².

Nombre del Electrodo	Clasificación AWS	Descripción General
ER 70 S6	ER 70 S6	El LS-6 es alambre recubierto en cobre, con bajo contenido de carbono, alto contenido de manganeso y silicio, que lo convierte en un alambre MIG de excelentes propiedades mecánicas, con un cordón de soldadura de un acabado excepcional y alta resistencia, para una diversidad de aplicaciones.

Figura 39 - Extracto catálogo Küpfer descripción electrodo

Se ejecutó un mallado estándar compatible con las juntas soldadas, Figura 40. Para corroborar la calidad de malla, se crea un trazado de calidad de malla, Figura 41, se pone un máximo de 4 como coeficiente de aspecto, y vemos que el mallado no supera el cociente de aspecto de 1,9. A menor cociente es mayor la calidad de la malla. Por lo tanto, la malla es apta para realizar el análisis.

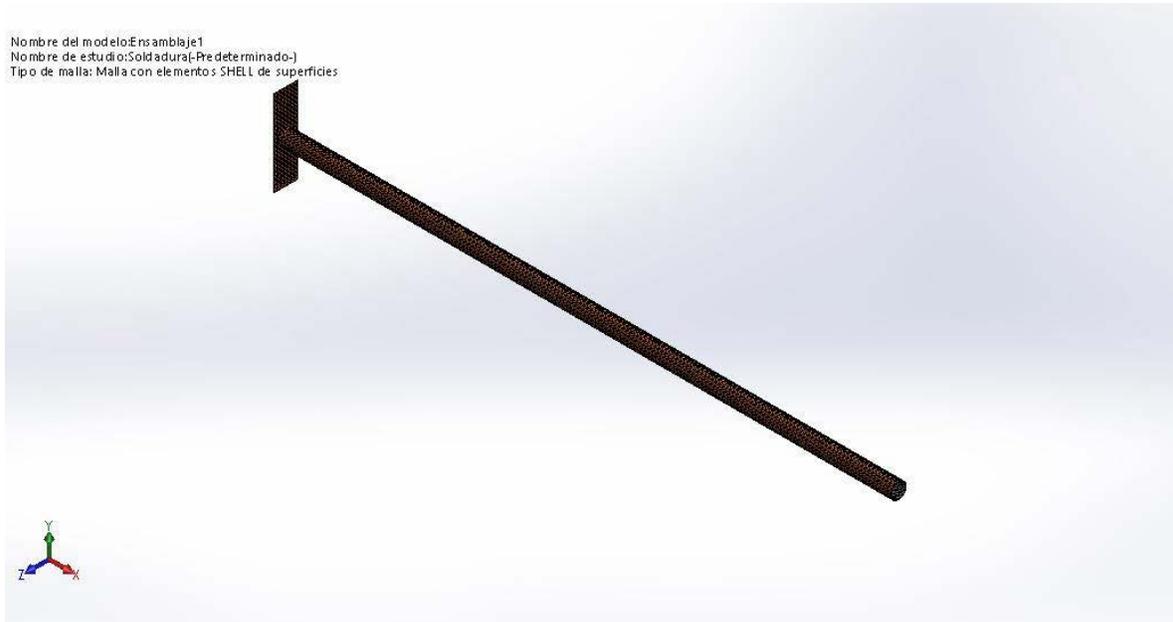


Figura 40 - Mallado

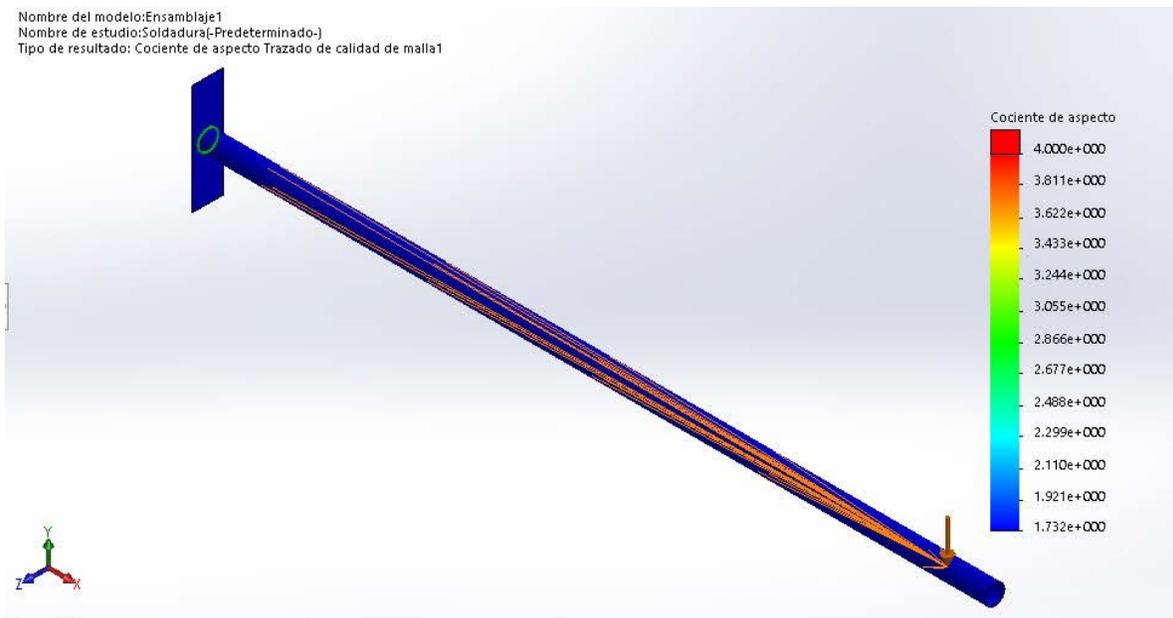


Figura 41 - Trazado de calidad de malla

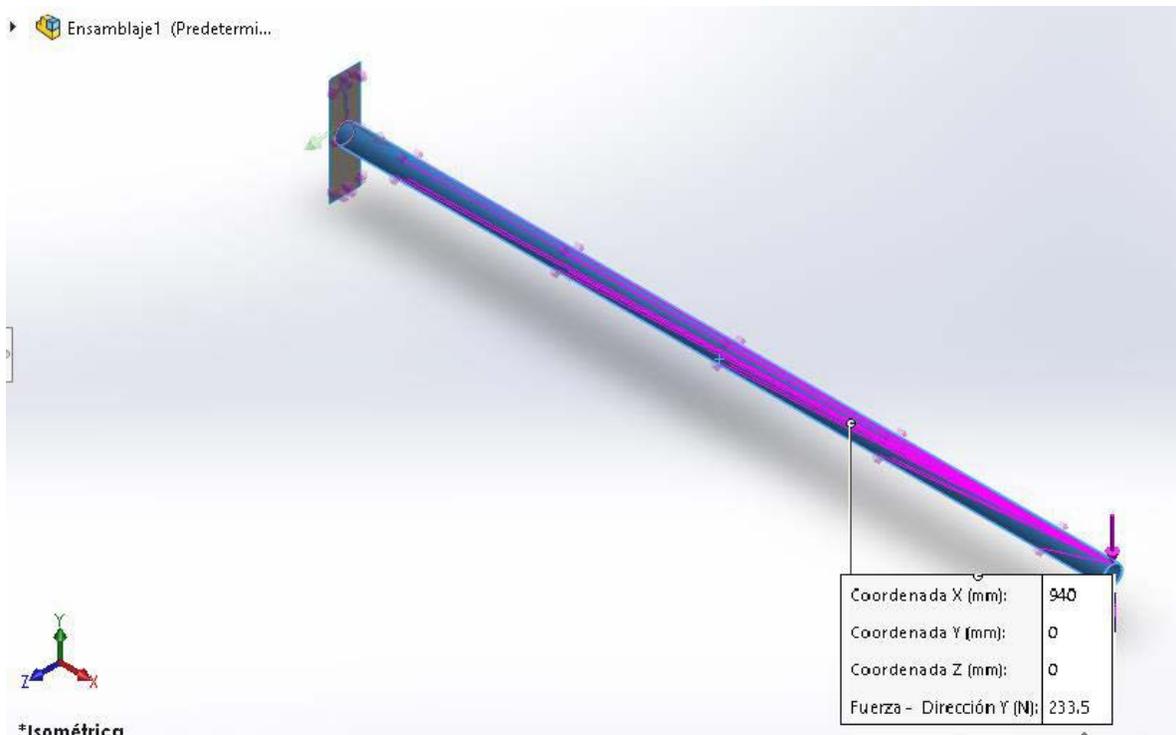


Figura 42 - Definición de carga

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

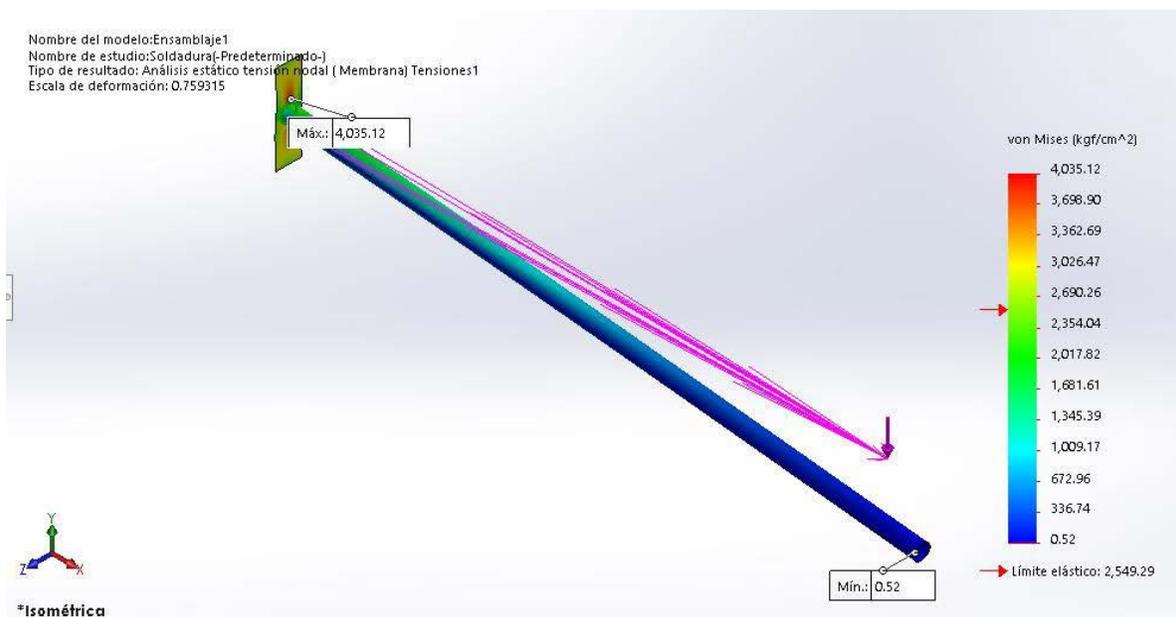


Figura 43 - Detalles tensión Von Mises

Si bien la tensión de Von mises, Figura 43, supera el límite elástico del acero, no supera el límite de rotura.

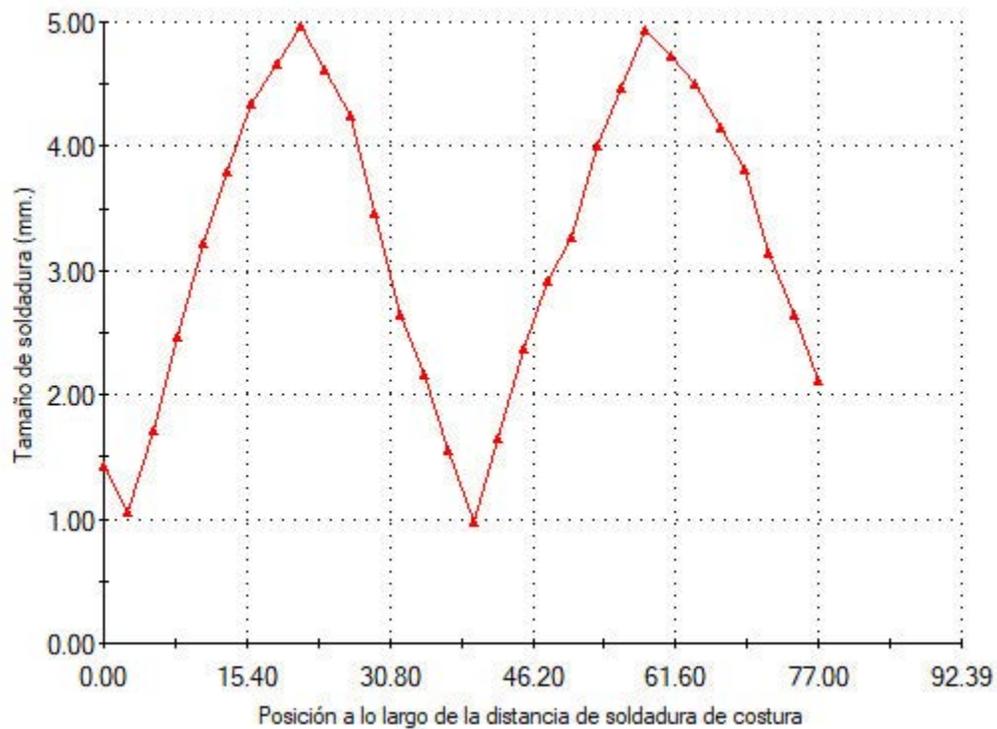


Figura 44 - Tamaño de soldadura a lo largo del cordón

Se puede observar que el cateto de soldadura máximo es aproximadamente 5 milímetros y el mínimo alrededor de 1 milímetro. Por lo tanto, la soldadura aplicada debe ser de al menos 5 milímetros de garganta. [7]

11.4 Análisis de estabilidad

En este ítem se comparan las condiciones de estabilidad entre el modelo postulado y el modelo construido, para cuatro de los casos más relevantes expuestos en 9.3 Condiciones de cargas, estos son los casos 7 – 9 – 11 y 13.

En adelante, la denominación *Estabilizador* corresponde al modelo creado, mientras que *Flotador*, corresponde al modelo diseñado en 8.2 Modelo II: flotadores laterales Anexo 2.

11.4.1 Redefinición de Centros de gravedad de la estructura

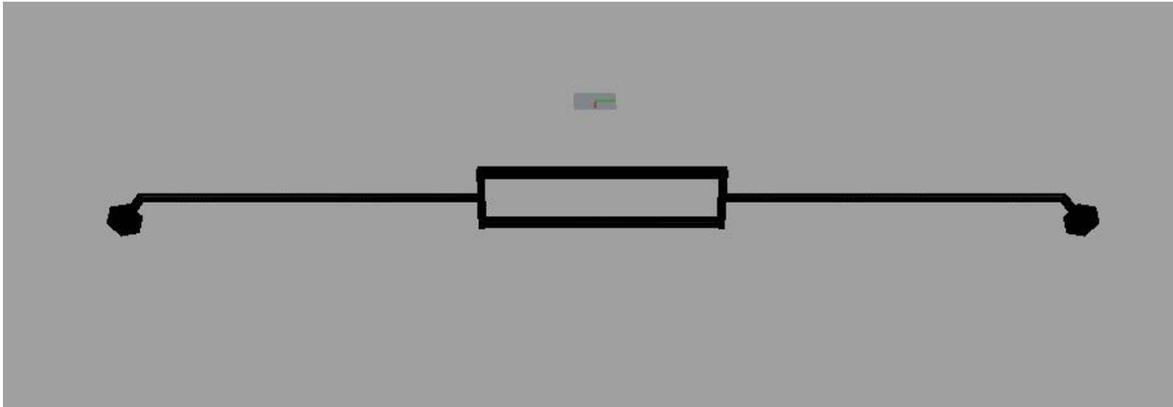


Figura 45- Marco de popa

El centro de gravedad del marco, Figura 45, ubicado a popa de la tabla, determinado según Rhinoceros ® corresponde al punto:

(980, 0, 94) [mm]

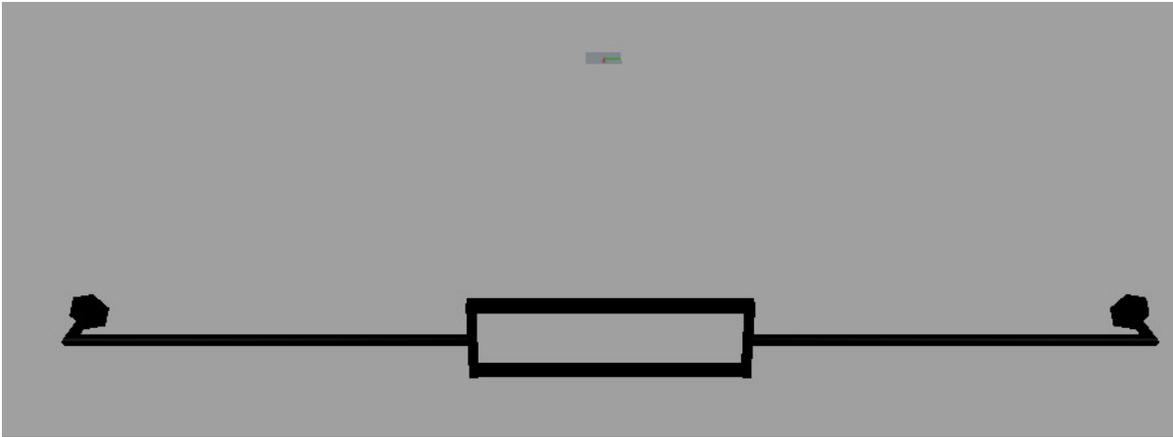


Figura 46 - Marco de proa

El centro de gravedad del marco, Figura 46, ubicado a proa de la tabla, determinado según Rhinoceros ® corresponde al punto:

$(2500, 0, 93)$ [mm]



Figura 47 - Estabilizadores

El centro de gravedad de los flotadores, Figura 47, determinado según Rhinoceros ® corresponde al punto:

$(980, 0, 94)$ [mm]



Gráfico 50 - Comparativa estabilidad del modelo y prototipo creado caso 7



Gráfico 51 - Comparativa estabilidad del modelo y prototipo creado caso 9



Gráfico 52 - Comparativa estabilidad del modelo y prototipo creado caso 11

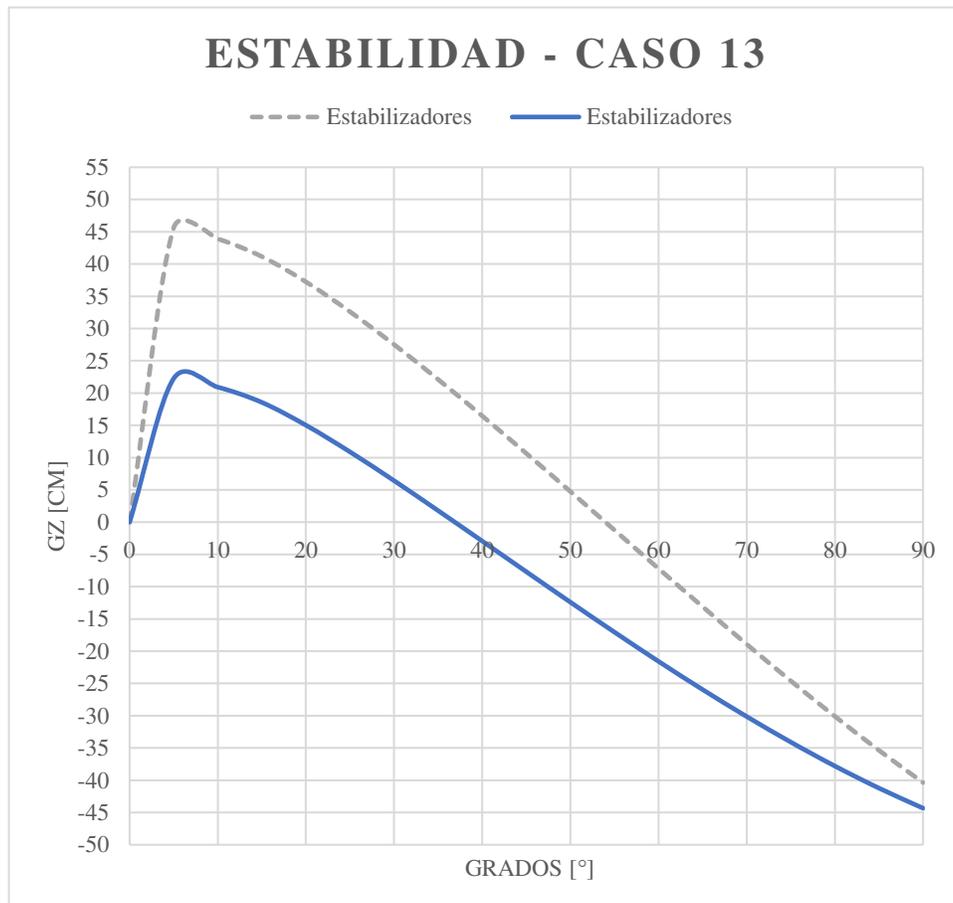


Gráfico 53 - Comparativa estabilidad del modelo y prototipo creado caso 13

Dadas las gráficas anteriores, se evidencia que el prototipo creado presenta un aumento de la estabilidad en relación con el modelo diseñado inicialmente, incrementando el área bajo la curva de estabilidad, y aumentando tanto el GZ máximo, como el ángulo en el cual éste se hace 0.

11.4.2 Comportamiento en el río

Para finalizar esta experiencia, se hace una prueba de navegación en el río Calle - Calle, en condición de aguas tranquilas respetando las medidas de seguridad básicas.

Dentro de lo observado se evidencia un modelo bastante estable, y de gran maniobrabilidad, además el espacio entre flotadores y tabla, además de la distancia entre marcos es suficiente para remar con comodidad.

En cuanto a la sujeción entre tabla y silla de ruedas no se evidencian problemas y es posible navegar sin problemas.

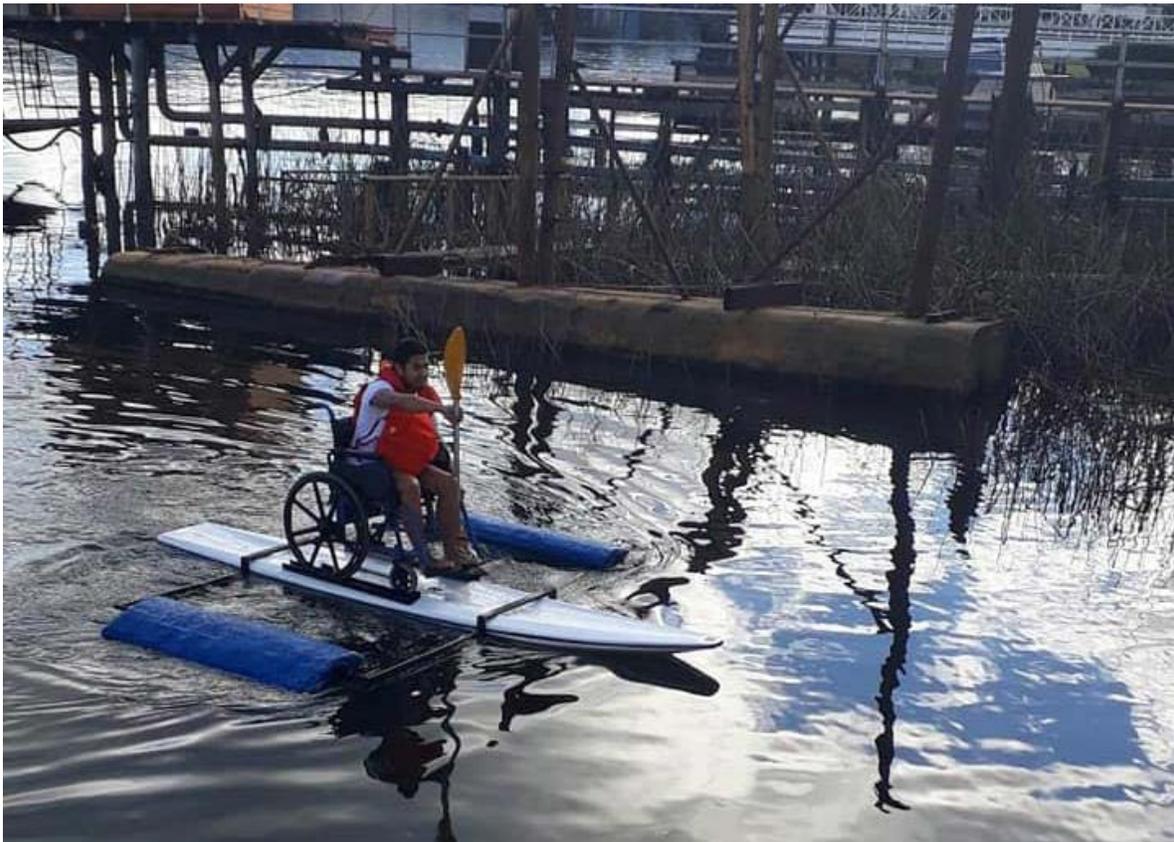


Figura 48 - Prototipo navegando

12 Conclusión

Una vez postulados los tres modelos y comparando aspectos de estabilidad y equilibrio, el modelo que presenta mejores características fue el modelo con flotadores laterales. Si bien no fue el modelo que presentó la mayor estabilidad, fue el modelo que mejor desempeño tuvo en términos generales. Otro factor por considerar es la factibilidad de crear un primer prototipo que valide el análisis teórico.

Con respecto al prototipo diseñado, es factible mejorarlo en varios aspectos como puede ser utilizar resina epóxica para evitar recubrir la matriz hecha de plumavit con genérico de polietileno que puede significar mayor complejidad a la hora de construir los estabilizadores.

Otro punto importante que se podría mejorar sería utilizar aluminio en los marcos en lugar de acero, para obtener un mecanismo que en su conjunto sea más liviano, y más fácil de transportar. Además, pensando en lo anterior sería posible, en lugar de unir todas las partes metálicas con soldadura, utilizar algún otro tipo de unión como podría ser unión por roscas, coplas cónicas o de otro tipo. También sería recomendable agregar en cada pieza que vaya sumergida un perfil hidrodinámico para disminuir la resistencia al avance que se genera.

También sería posible cambiar el tipo de pernos, tuercas y golillas, pudiéndose utilizar de acero inoxidable o del tipo galvanizado.

Es importante además realizar pruebas de comportamiento en navegación, así como una prueba de inclinación.

Finalmente, un último factor por mejorar es la forma de ingreso al agua del modelo, pudiéndose incorporar algún tipo de ruedas o rodillo en la parte inferior de los marcos para poder desplazar el mecanismo sin tener que cargarlo como se hizo con el prototipo inicial para ingresarlo al agua. Además, es imperativo buscar certificaciones que avalen este tipo de naves para disminuir cualquier riesgo de accidente del deportista.

13 Bibliografía

- [1] Caballito de totora. (s.f). En Wikipedia. Recuperado el 10 de enero de 2018 de https://es.wikipedia.org/wiki/Caballito_de_totora
- [2] FONADIS. (2005). “*Primer estudio nacional de la discapacidad en Chile*”. Gobierno de Chile. Santiago.
- [3] Murray. E. (2016). “*Inventor creates opportunity for wheelchair-bound to paddleboard*”. Recuperado el 03 de marzo de 2018 de <https://www.today.com/health/hawaiin-surfer-creates-opportunity-wheelchair-bound-paddleboard-2D80210822>
- [4] Bayona Baques. A. (2015). “*SUP adaptado*”. Recuperado el 03 de marzo de 2018 de <http://albinbayona.com/2015/10/25/408>
- [5] Mandelli. A. (1986) “*Elementos de Arquitectura Naval*”. Librería editorial Alsina, Buenos Aires.
- [6] Gudmunsson, A. (2009) “*Prácticas de seguridad relativas a la estabilidad de buques pesqueros pequeños*”. Departamento de pesca de la FAO, Roma
- [7] García. J (2014) “*Análisis computacional 3D en cordón de soldadura de filete*”. Facultad Regional Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional. Bahía Blanca, Argentina.

1 Anexos

1.1 Anexo 1

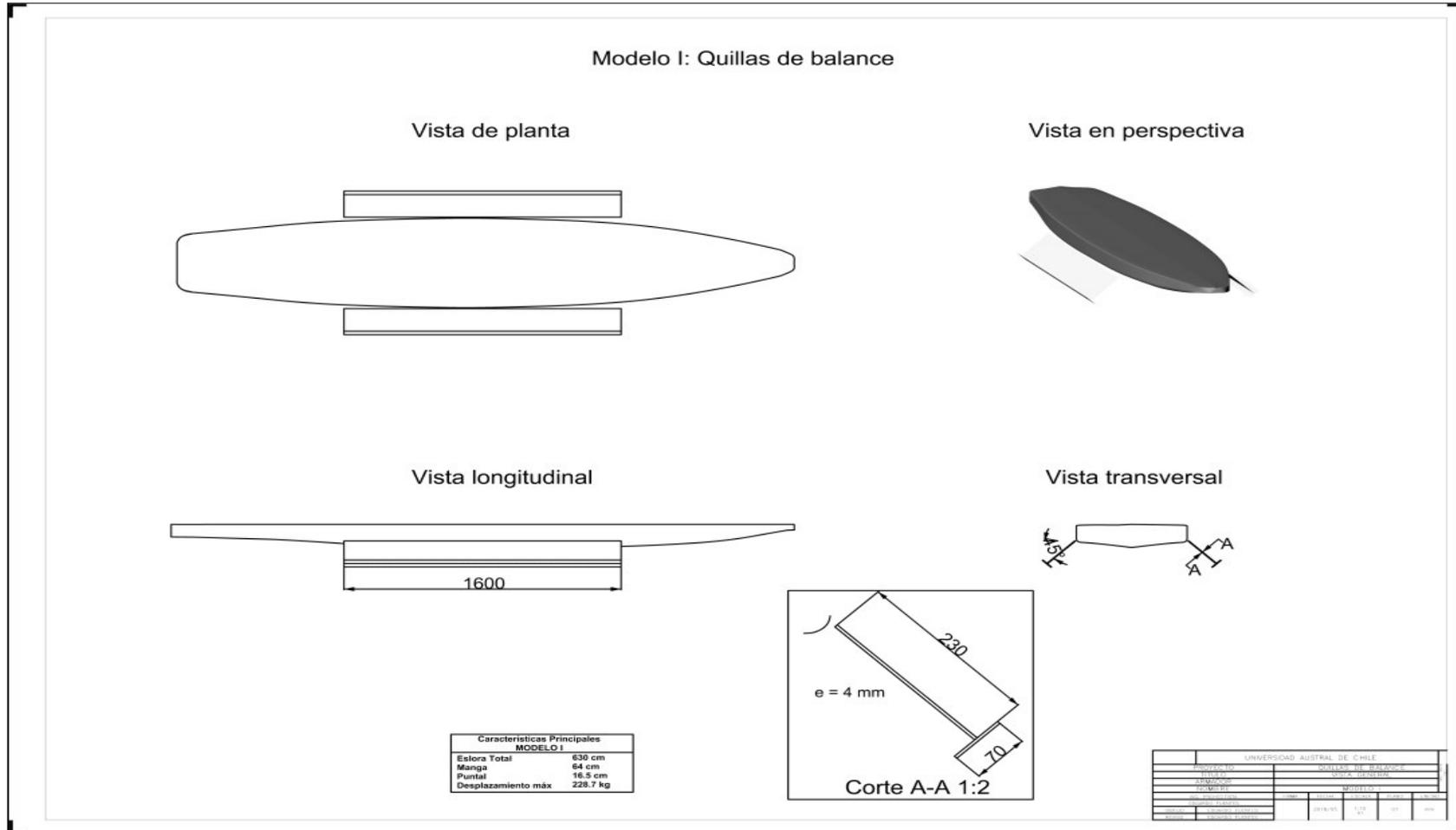


Figura 49 - Modelo I: quillas de balance

1.2 Anexo 2

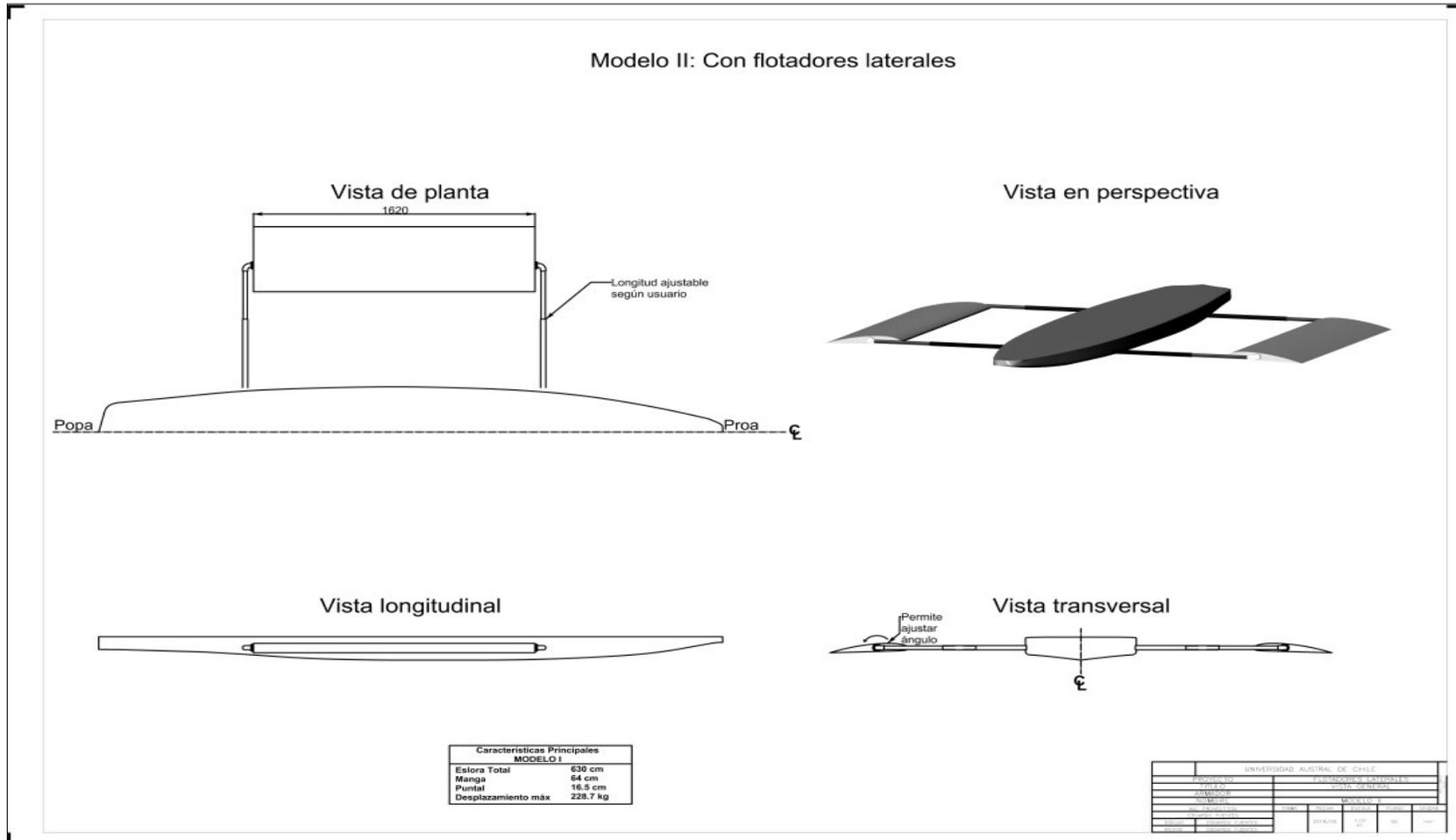


Figura 50 - Modelo II: flotadores laterales

1.3 Anexo 3

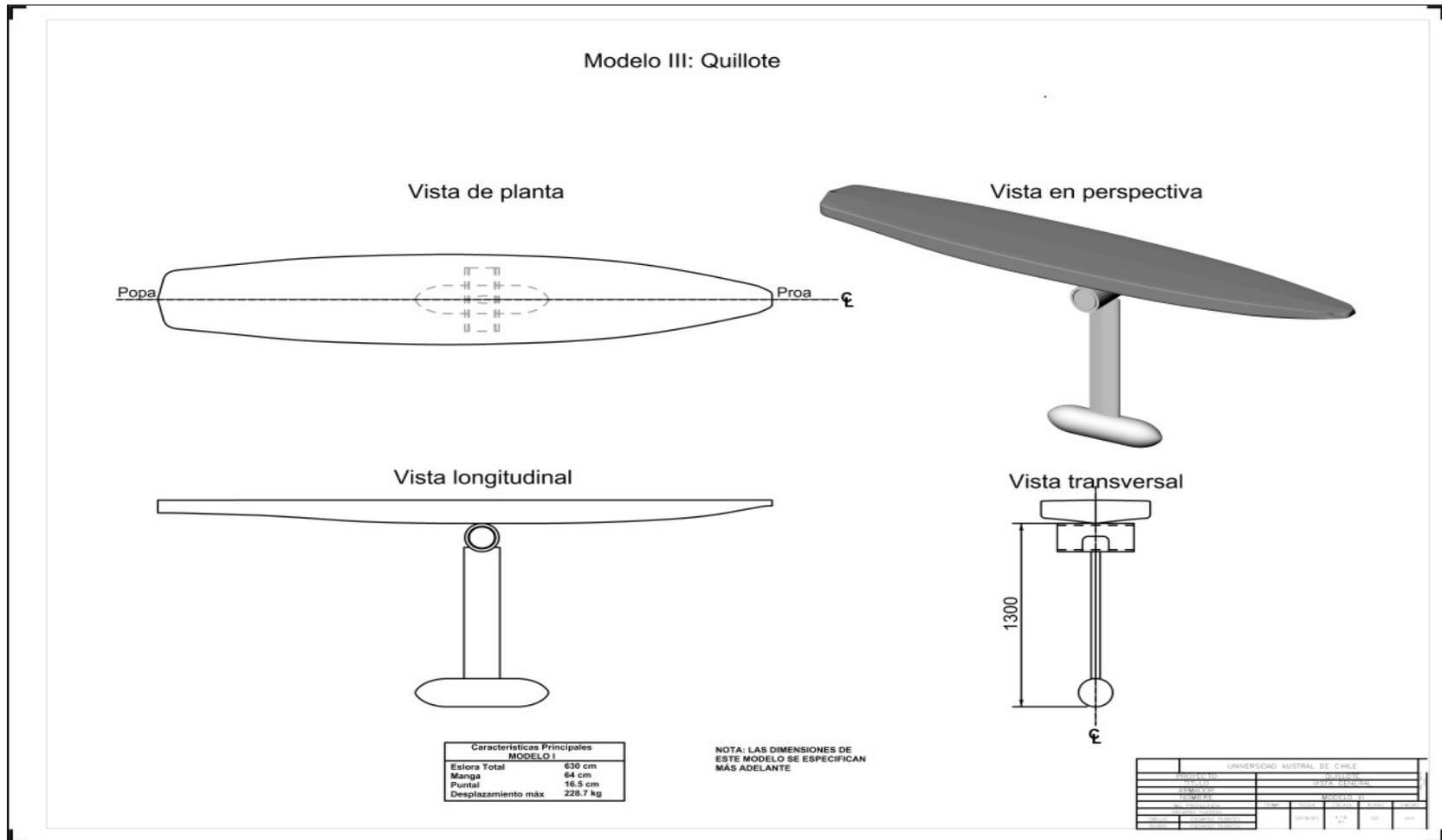


Figura 51 - Modelo III: quilla de bulbo