

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRINEO PARA APNEA EN PESO VARIABLE**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs:

Molina V., Gabriel A.

Salazar Del V., Luis M.

Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRINEO PARA APNEA EN PESO VARIABLE**

Tutor Académico: Prof. Pedro Cadenas, Dr. Sc.

Tutor Industrial: Prof. Gabriela Contreras, Dr. Sc.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs:

Molina V., Gabriel A.

Salazar Del V., Luis M.

Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013



Facultad de Ingeniería  
INGENIERIA MECÁNICA  
Universidad Central de Venezuela  
DEPARTAMENTO DE DISEÑO

Caracas, 14 noviembre de 2013

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

*Molina, Gabriel y Salazar, Luis*

Titulado: “*Diseño y Construcción de un Trineo para Apnea en Peso Variable*”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. *Ramón Sánchez*  
Jurado

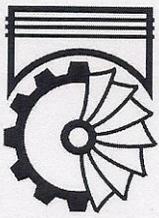


Prof. *Rodolfo Berrios*  
Jurado

Prof. *Pedro Cadenas*  
Tutor

Dra. *Gabriela Contreras*  
Tutora Industrial

“50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales”



Caracas, 14 de noviembre de 2011

Ciudadana  
Profa. Norma Guzmán  
Jefe de División de Control de Estudios  
Presente.

Quienes suscriben profesores del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle la decisión de otorgar a el (los) bachiller(s):

*Molina, Gabriel y Salazar, Luis*

*Titular de la Cédula de Identidad N° 20.028.368 y 20.483.627 respectivamente*

**“MENCION TRABAJO ESPECIAL DE GRADO”**

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado Titulado:

*“Diseño y Construcción de un Trineo para Apnea en Peso Variable”*

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,

Prof. *Ramón Sánchez*

Jurado



Prof. *Rodolfo Berrios*

Jurado

Prof. *Pedro Cadenas*

Tutor

Dra. *Gabriela Contreras*

Tutora Industrial

## **DEDICATORIA**

*A Dios en primer lugar, y a todo el Cielo. Se los debo todo.*

*A mi familia, especialmente a mis padres Domingo y Gisela, a mi hermano David, a Josefina y José, y a Carlos. Por su apoyo constante a lo largo de la carrera.*

*A todos mis amigos y compañeros por las experiencias compartidas.*

*A mi compañero Luis, a Gaby, Carlos, y a Pedro. El mérito de este trabajo es suyo.*

*Gabriel Alberto Molina Valera*

## DEDICATORIA

*A mis padres Edgar y Luisa, a quienes les debo más que la vida, gracias por estar siempre a mi lado, por sus enseñanzas, apoyo y constancia, me dieron la fortaleza para ser la persona que hoy en día soy, por eso este logro también es de ustedes, los quiero...*

*A Vanessa, con quien compartí toda la niñez, gracias por estar presente en mi vida, te quiero hermanita...*

*A mi Nonna y mi Nonno, que sé que desde el cielo me dieron su bendición, los extraño...*

*A mi compañero de tesis Gabriel Molina, excelente amigo durante toda la carrera, un gran pana...*

*A todos mis amigos de la universidad, gracias por todos esos buenos momentos...*

*Luis Miguel Salazar Del Vecchio*

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradecemos a Dios, que desde el cielo nos cuidó y guío.

A la Universidad Central de Venezuela por abrirnos las puertas del conocimiento y brindarnos la formación necesaria para ser ingenieros.

A nuestra tutora industrial Ing. Gabriela Contreras por su incondicional guía y apoyo en todo momento.

A nuestro tutor académico Prof. Pedro Cadenas por su amplia paciencia y orientación certera.

Al atleta Carlos Coste que sirvió de inspiración para este trabajo, persona que admiramos mucho y disfrutamos de su grata amistad.

A los Profesores Rodolfo Berrios, Ramón Sánchez y Crisanto Villalobos por el aporte de sus conocimientos en la realización de este trabajo.

A PROMARINE, en especial a Ramón Canela, y Andrés Canela por permitirnos el uso de sus instalaciones y a Francisco Cardier y a Diego por todo su apoyo técnico y asesoría para la fabricación del Perfil Hidrodinámico.

Al Taller del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) en especial al Prof. Falcón y al Ing. Gustavo por prestarnos la infraestructura y algunos materiales, al sr. Peraza, a Choque, Darlin y Hernán por su valiosa asesoría para la construcción de diversas piezas.

A los técnicos Vizcaya y Araque por su amplia colaboración.

A los demás profesores que participaron en nuestra formación.

A nuestros compañeros de clases, amigos y familiares porque este gran proyecto no hubiese sido posible sin ustedes.

Gracias a todos.

## **RESUMEN**

**Molina V., Gabriel A. y Salazar Del V., Luis M.**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRINEO PARA APNEA EN PESO VARIABLE**

**Tutor Académico: Dr. Pedro Cadenas.**

**Tutora Industrial: Dra. Gabriela Contreras.**

**Trabajo Especial de Grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela.**

**Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.**

**2013, 149 pp.**

**Palabras Clave:** Diseño, apnea, elementos finitos, trineo, hidrodinámica.

La apnea es un deporte subacuático basado en la suspensión voluntaria de la respiración dentro del agua. Existen diversas modalidades de apnea, una de las cuales es conocida como peso variable. En ella, el atleta desciende hasta una profundidad del mar previamente establecida con la ayuda de un trineo; y luego asciende a la superficie sin éste. Para cumplir su función, estos trineos deben ser altamente hidrodinámicos, ergonómicos, y fáciles de usar. Los reglamentos oficiales del deporte establecen ciertos requisitos básicos que deben cumplir los trineos, pero dejan un gran margen de libertad a la hora de diseñar y construir estos dispositivos. Por estos motivos, los trineos suelen ser diseñados a la medida de cada atleta interesado.

Utilizando ciertos criterios de diseño se logró definir un modelo de trineo para peso variable que cumple con los reglamentos oficiales, y además se caracteriza por su hidrodinámica, pues permite un desplazamiento sin perturbaciones considerables. También permite el descenso del atleta con monoaleta en una posición ergonómicamente óptima, y es de fácil montaje y de fácil traslado.

Se utilizaron programas asistidos por computadora para el análisis numérico del modelo, mediante el método de los elementos finitos, evaluando la distribución de fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la geometría, así como la distribución de esfuerzos sobre el trineo utilizando la teoría de falla de Von Mises. Se realizaron procesos de reingeniería al diseño en base a los cálculos realizados y se seleccionaron los materiales adecuados para resistir a las sollicitaciones mecánicas estimadas y a las condiciones de operación. Posteriormente se fabricó el prototipo y se sometió a pruebas en condiciones reales para verificar su funcionamiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el diseño final propuesto para el trineo de apnea en peso variable funciona como una nueva alternativa para cualquier apneista, pues se adapta a las características físicas y atléticas de cada usuario. Genera fuerzas de arrastre y sustentación bajas, es resistente a sollicitaciones mecánicas de tracción y a las condiciones ambientales de operación, y es de fácil uso y transporte.

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: EL PROBLEMA .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.MOTIVACIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.ANTECEDENTES .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.1.Objetivo general .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.2.Objetivos específicos .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4.ALCANCES Y LIMITACIONES .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.EL DISEÑO Y SU METODOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.1.Programa de instrucciones .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.Análisis de la necesidad .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3.Generación de soluciones.....</b>	<b>11</b>
2.1.3.1.Método de la tormenta de ideas ( <i>brainstorming</i> ).....	12
2.1.3.2.Mecanismos para generar ideas .....	12
<b>2.1.4.Evaluación y selección.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.5.Desarrollo del diseño final .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.6.Memoria técnica y descripción del diseño .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.VARIABLES DE INTERÉS RELACIONADAS CON LA PRÁCTICA DE APNEA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1.Presión, temperatura, salinidad y densidad en el mar .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2.Barotraumas .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.ERGONOMÍA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.FLUJOS EXTERNOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1.Cuerpos sumergidos.....</b>	<b>18</b>

2.4.2. Número de Reynolds .....	20
2.4.3. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	20
2.4.4. Capa límite .....	21
2.4.5. Perfiles fluidodinámicos.....	22
<b>2.5. MECÁNICA DE MATERIALES .....</b>	<b>25</b>
2.5.1. Esfuerzo y deformación .....	25
2.5.2. Teorías de fallas.....	27
2.5.2.1. Teoría de máxima tensión cortante .....	27
2.5.2.2. Teoría de la máxima energía de distorsión .....	28
<b>2.6. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARA EL TRINEO .....</b>	<b>28</b>
2.6.1. Aluminio.....	28
2.6.2. Materiales compuestos.....	29
<b>2.7. ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>30</b>
2.7.1. Construcción del modelo matemático (geometría).....	31
2.7.2. Construcción del mallado .....	32
2.7.3. Resolución del modelo de elementos finitos .....	32
2.7.4. Análisis de resultados.....	32
2.7.5. Tipos de elementos finitos.....	33
2.7.6. Paquete ANSYS CFX ®.....	35
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1. ESTUDIO PREVIO PARA EL DISEÑO DEL TRINEO DE APNEA .....</b>	<b>36</b>
3.1.1. Consideraciones para el diseño del trineo.....	36
<b>3.2. PLANTEAMIENTO DE IDEAS .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN .....</b>	<b>39</b>
3.3.1. Matriz Morfológica .....	40
3.3.2. Selección del diseño de la estructura .....	40
3.3.3. Selección del material para el perfil del trineo .....	42
3.3.4. Selección del material para la estructura principal del trineo.....	43
3.3.5. Selección de la tornillería para el trineo .....	44
3.3.6. Selección del sistema de freno para el trineo .....	44

3.3.7. Selección del diámetro del tubo de la estructura.....	46
<b>3.4. MODELADO GEOMÉTRICO .....</b>	<b>46</b>
3.4.1. Modelado de la estructura principal del trineo.....	46
3.4.2. Modelado de los lastres.....	50
3.4.3. Modelado del cuerpo humano.....	51
3.4.4. Modelado de la monoaleta y perfil del trineo .....	52
3.4.5. Modelado de los perfiles .....	53
<b>3.5. SIMULACIONES COMPUTACIONALES.....</b>	<b>56</b>
3.5.1 Simplificaciones realizadas para las simulaciones computacionales.....	56
3.5.2. Simulaciones fluidodinámicas .....	58
3.5.2.1. Mallado en ANSYS <i>Meshing</i> ®.....	58
3.5.2.2. Condiciones de contorno en ANSYS <i>CFX Setup</i> ® .....	60
3.6.2.3. Resultados en ANSYS <i>CFX Results</i> ®.....	62
<b>CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1. PRESIÓN MÁXIMA .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES FLUIDODINÁMICAS.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3. DISEÑO DE COMPONENTES DEL TRINEO .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3.1. Diseño del Perfil.....</b>	<b>74</b>
4.3.1.1. Simulación para un espesor de 4 mm.....	75
4.3.1.2. Simulación para un espesor de 5 mm.....	77
<b>4.3.2. Peso de los componentes del trineo.....</b>	<b>78</b>
<b>4.3.3. Cálculo de lastre necesario .....</b>	<b>80</b>
<b>4.4. CÁLCULO DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS EN LOS</b>	
<b>COMPONENTES DEL TRINEO .....</b>	<b>82</b>
<b>4.4.1. Resistencia a la tracción del tubo.....</b>	<b>83</b>
<b>4.4.2. Cálculo de las bisagras.....</b>	<b>83</b>
4.4.2.1. Bisagra interior.....	84
4.4.2.2. Bisagra exterior .....	85
<b>4.4.3. Cálculo del alojamiento del freno .....</b>	<b>85</b>
<b>4.4.4. Cálculo del agarre para el atleta.....</b>	<b>88</b>

## TABLA DE CONTENIDO

---

4.4.5. Cálculo del soporte del perfil .....	90
4.4.6. Cálculo de los tornillos.....	92
4.4.7. Cálculo de soldadura.....	93
4.4.8. Cálculos de momento flector sobre el trineo.....	94
4.4.8.1. Momento flector sobre el tubo principal del trineo.....	94
4.4.8.2. Pernos y bisagra .....	96
<b>CAPÍTULO V: MANUFACTURA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL....</b>	<b>99</b>
<b>5.1. PERFIL HIDRODINÁMICO .....</b>	<b>99</b>
5.1.1. Pre-molde del perfil.....	99
5.1.2. Molde del perfil .....	100
5.1.3. Prototipo del perfil .....	102
<b>5.2. ESTRUCTURA PRINCIPAL DEL TRINEO .....</b>	<b>103</b>
<b>5.3. ENSAMBLE DEL TRINEO .....</b>	<b>106</b>
<b>5.4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL .....</b>	<b>109</b>
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RESULTADOS.....</b>	<b>112</b>
<b>6.1 CONCLUSIONES.....</b>	<b>113</b>
<b>6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>114</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>119</b>
<b>APÉNDICE 1: MANUAL DE USO DEL TRINEO.....</b>	<b>119</b>
<b>APÉNDICE 2: PLANOS DE DISEÑO .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO: DETALLES DEL FRENO .....</b>	<b>133</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla N° 1: Velocidad promedio de descenso en modalidades de apnea: ..... 17	17
Peso constante y peso variable..... 17	17
Tabla N° 2: Matriz morfológica del diseño del trineo..... 40	40
Tabla N° 3: Dimensiones comerciales de tubos de aluminio..... 46	46
Tabla N° 4: Fuerzas de arrastre sobre el conjunto (atleta y trineo) usando diferentes perfiles..... 70	70
Tabla N° 5: Valores de Re, FD y CD para diversas velocidades del conjunto atleta y trineo ..... 73	73
Tabla N° 6: Propiedades de la fibra de vidrio ..... 75	75
Tabla N° 7: Masa de los componentes de aluminio calculada por el programa (3,493 kg en total)..... 79	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Ejemplos de trineos usados en peso variable .....	5
Figura N° 2: Curva de Profundidad vs Densidad en el océano a una latitud de 30-40 grados Sur (Bergman, 2001) .....	15
Figura N° 3: Nomenclatura de un perfil .....	23
Figura N° 4: Coeficiente de arrastre para flujo alrededor de un cilindro largo y una esfera (Potter y Wiggert, 2002) .....	24
Figura N° 5: Diagrama esfuerzo deformación general (Gere, 2002) .....	26
Figura N° 6: Elementos bidimensionales: a) Triangular, b) Cuadrilátero .....	33
Figura N° 7: Elementos tridimensionales de primer orden: a) Tetraedro, b) Hexaedro .....	34
Figura N° 8: Elementos tridimensionales de segundo orden: a) Tetraedro, b) Hexaedro .....	34
Figura N° 9: Idea N°1 .....	37
Figura N° 10: Idea N°2 .....	37
Figura N° 11: Idea N°3 .....	38
Figura N° 12: Idea N°4 .....	38
Figura N° 13: Idea N°5 .....	39
Figura N° 14: Estructura ensamblable .....	41
Figura N° 15: Estructura telescópica .....	41
Figura N° 16: Estructura plegable .....	41
Figura N° 17: Pesas de máquina de fricción y desgaste .....	42
Figura N° 18: Curva de carga vs diámetro de cuerda que soporta el freno (SPINLOCK) .....	45
Figura N° 19: Modelado geométrico del alojamiento del freno .....	47
Figura N° 20: Modelado geométrico del sistema de bisagra inferior .....	48
Figura N° 21: Modelado geométrico del agarre lateral y del brazo de la cámara .....	49
Figura N° 22: Modelado geométrico del anclaje del perfil .....	50
Figura N° 23: Modelado geométrico de los lastres apilables .....	51
Figura N° 24: Modelado del cuerpo humano .....	52
Figura N° 22: Modelado de monoaleta (izquierda) y monoaleta real (derecha) .....	53
Figura N° 23: Modelado del perfil A .....	53
Figura N° 24: Modelado del perfil B .....	54
Figura N° 25: Modelado del perfil C .....	54
Figura N° 26: Modelado del perfil D .....	54
Figura N° 27: Modelado del perfil E .....	55
Figura N° 28: Ensamble del perfil A con su soporte .....	55
Figura N° 29: Ensamble del modelo geométrico (vista frontal y lateral) .....	56
Figura N° 30: Información de la malla y refinamiento alrededor de la geometría .....	59
Figura N° 31: Estadísticas de calidad ortogonal de la malla .....	60
Figura N° 32: Convergencia de la malla .....	61
Figura N° 33: Perfil de fuerzas totales sobre la geometría a 150 m de profundidad .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura N° 34: Perfil de fuerzas totales sobre la geometría a 80 m de profundidad.....	64
Figura N° 35: Perfil de fuerza de arrastre (eje Y) a una profundidad de 150 m (arriba) ..... y 80 m (abajo) .....	66
Figura N° 36: Perfil de fuerzas en la dirección del eje X a una profundidad de: a) 150 m b) 80 m .....	67
Figura N° 37: Perfil de fuerzas en la dirección del eje Z a una profundidad de: a) 150 m y b) 80 m .....	67
Figura N° 38: Presión absoluta sobre la geometría a: a) 150 m y b) 80 m) .....	68
Figura N° 39: Líneas de corriente alrededor del cuerpo: a) vista lateral y b) vista frontal .....	69
Figura N° 40: Líneas de corriente sobre la geometría y fuerzas de arrastre a diferentes velocidades: a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s, d) 2, m/s, e) 10 m/s f) 50 m/s .....	72
Figura N° 42: Distribución de fuerzas sobre el perfil .....	74
Figura N° 43: Esfuerzo de Von Mises sobre la pieza (4mm).....	75
Figura N° 44: Deformación de la pieza (4mm).....	76
Figura N° 45: Factor de seguridad del perfil (4mm) .....	76
Figura N° 46: Esfuerzo de Von Mises sobre la pieza (5 mm).....	77
Figura N° 47: Deformación de la pieza (5 mm) .....	77
Figura N° 48: Factor de Seguridad de la pieza (5 mm).....	78
Figura N° 49: DCL del conjunto (atleta y trineo) durante el descenso .....	80
Figura N° 50: Cálculo de la masa de atleta a través del programa (76,037 kg).....	81
Figura N° 51: Cálculo del volumen desplazado a través del programa .....	82
Figura N° 52: Carga sobre la bisagra inferior .....	84
Figura N° 53: Dimensiones de la bisagra interna .....	84
Figura N° 54: Dimensiones de la bisagra externa .....	85
Figura N° 55: Información de la malla.....	86
Figura N° 56: Esfuerzo de Von Mises sobre el alojamiento del freno aplicando una carga de 287,88 N .....	86
Figura N° 57: Deformación del alojamiento del freno .....	87
Figura N° 58: Factor de seguridad del alojamiento del freno .....	87
Figura N° 59: Esfuerzo sobre el agarre para el atleta aplicando una carga de 63,173 N en cada extremo.....	88
Figura N° 60: Deformación del agarre para el atleta .....	89
Figura N° 61: Factor de seguridad del agarre .....	89
Figura N° 62: Asignación de las fuerzas y generación de la malla .....	90
Figura N° 63: Esfuerzo de Von Mises sobre el anclaje del perfil aplicando una carga de 245,25N en la cara superior y una carga de 24,52N en la cara posterior .....	91
Figura N° 64: Deformación del anclaje del perfil .....	91
Figura N° 65: Factor de seguridad del anclaje del perfil.....	92
Figura N° 66: Fuerzas cortantes sobre los tornillos.....	93
Figura N° 67: Dimensiones de la soldadura .....	94
Figura N° 68: Representación del trineo como viga empotrada en un extremo.....	95
Figura N° 69: DCL de trineo sometido a flexión.....	97
Figura N° 70: DCL reacciones sobre la bisagra.....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura N° 71: Bisagra externa .....	98
Figura N° 72: Pre-molde finalizado .....	100
Figura N° 73: Producción del molde en fibra de vidrio .....	101
Figura N° 74: El perfil terminado.....	103
Figura N° 75: Refrentado en torno.....	104
Figura N° 76: Fresado .....	104
Figura N° 77: Taladrado .....	105
Figura N° 78: Mecanizado en CNC .....	105
Figura N° 79: Soldadura T.I.G.....	106
Figura N° 80: Ensamble del sistema de freno.....	106
Figura N° 81: Ensamble de estructura: a) plegada y b) extendida.....	107
Figura N° 82: Ensamble completo del trineo.....	108
Figura N° 83: Posicionamiento del atleta en trineo .....	110
Figura N° 84: Trineo en descenso (cámara a bordo) .....	110
Figura N° 85: Trineo en descenso (cámara externa).....	111

## INTRODUCCIÓN

### INTRODUCCIÓN

La apnea, también conocida como buceo a pulmón o buceo libre, es un deporte subacuático basado en la suspensión voluntaria de la respiración dentro del agua. Según la modalidad que se practique, la apnea puede llevarse a cabo en piscinas o realizando descensos a la profundidad del mar.

Este deporte tiene sus orígenes en prácticas de pesca milenarias realizadas en diversos países del mundo. Entre ellas, la “*Skandalopetra*” en Grecia, donde los pescadores de esponjas marinas se sumergían en el mar a una profundidad de 20 m aproximadamente, con la ayuda de una roca de granito de 15 kg con aristas redondeadas a la cual se le ataba una cuerda que posteriormente halaban los compañeros desde la superficie para ayudar a los apneistas en su ascenso. Otra práctica similar muy famosa es la recolección de perlas submarinas en Japón, donde un grupo de mujeres, conocidas como “Amas” se especializan desde temprana edad en esta actividad, realizando entre 20 y 30 inmersiones diarias en el mar para adquirir cada vez mayor capacidad de retención de la respiración y alcanzar mayores profundidades; continuando así una tradición milenaria que conlleva numerosos aspectos sociales y rituales, haciendo de esta actividad un estilo de vida para estas mujeres.

Sin embargo, la apnea meramente deportiva comienza a practicarse alrededor de la década de 1950 en Italia, donde los pescadores comienzan a competir entre ellos y a marcar los primeros récords; y no es sino hasta 1992 cuando se funda la “*Association Internationale pour le Développement de l'Apnée*” (Asociación Internacional para el Desarrollo de la Apnea, AIDA) en Francia. Esta organización sin fines de lucro tiene como finalidad promover y normalizar la práctica de la apnea alrededor del mundo. Desde su fundación, AIDA ha definido disciplinas en el buceo libre y ha reconocido y autenticado récords mundiales en esas disciplinas.

Para la modalidad de apnea de peso variable, el buceador desciende con la ayuda de un peso de lastre hasta alcanzar la profundidad objetivo y asciende sólo por sus propios medios (fuerza muscular y, si lo desea, con ayuda de bialetas o

## INTRODUCCIÓN

monoaleta). La forma de descenso debe ser cómoda para el atleta a fin de que éste no pierda concentración y ahorre energía para el ascenso.

El conjunto (atleta, trineo y aletas) debe ser hidrodinámico para causar la mínima perturbación del agua que pueda sacar al apneista de concentración y disminuir los tiempos de descenso ya que durante todo el tiempo que el atleta está sumergido debe contener la respiración.

Actualmente los atletas de alto rendimiento dedicados a las modalidades de apnea en mar abierto están alcanzando profundidades mayores a los 80 m desde el año 1999, siendo 214 m la mayor profundidad alcanzada hasta los momentos en alguna modalidad. Esta marca fue alcanzada por Herbert Nitsch en 2007 en la modalidad sin límites con ayuda de un trineo halado mecánicamente y provisto de un perfil hidrodinámico para el ascenso. La marca actual para peso variable es del atleta William Winram, con 145 m en febrero de 2013 con ayuda de bialeas. Sin embargo no todos los apneistas logran llegar a distancias tan profundas; y es de notar que los que las alcanzan recurren a equipamientos adicionales como el trineo (lastrado para el descenso) y las aletas (separadas o monoaleta, que generan mayor potencia para el ascenso), entre otros, que contribuyen a aumentar su rendimiento. Pero en el caso de los trineos, suelen ser voluminosos, difíciles de transportar y preparar, y diseñados a la medida de un solo atleta.

Este trabajo especial de grado tiene como finalidad diseñar y construir un trineo cuyas características tengan una óptima relación entre las propiedades hidrodinámicas, la facilidad de construcción y la facilidad de utilización para los apneistas dedicados a la modalidad de peso variable. Para ello se realizó primero una investigación bibliográfica relacionada con las diversas disciplinas involucradas en el diseño de un trineo de apnea (mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, resistencia de materiales, procesos de fabricación, método de elementos finitos para simulaciones asistidas por computador, reglamentos oficiales del deporte, técnicas y riesgos del buceo libre, entre otras); para luego diseñar el trineo al cual se le realizaron los análisis computacionales y cálculos necesarios para estimar su comportamiento. A partir de estos análisis se realizaron diversos procesos de reingeniería al diseño; y una

## INTRODUCCIÓN

vez determinada la geometría final se procedió a fabricarla y probarla en condiciones reales para validar el diseño y los cálculos realizados.

Este trabajo se dividió en 6 capítulos. En el primero se hace una descripción del problema y de las razones que lo justifican, igualmente se plantean los objetivos y alcances del mismo. En el Capítulo II se introducen las teorías multidisciplinarias en las que se enmarca el estudio, necesarias para la comprensión del mismo. En el Capítulo III se desarrolla la metodología utilizada y se definen las características del diseño del prototipo. En el Capítulo IV se explican las simplificaciones hechas para la realización de los cálculos y simulaciones fluidodinámicas y estructurales del diseño del prototipo; también se elaboran estos cálculos y se analizan los resultados obtenidos. El Capítulo V expone los procesos utilizados para la manufactura del prototipo. El Capítulo VI contiene las conclusiones y las recomendaciones pertinentes. Finalmente en el Capítulo VII se dan las referencias bibliográficas que sustentan el presente trabajo.

### **CAPÍTULO I**

#### **EL PROBLEMA**

La AIDA reconoce diversas modalidades del buceo libre, entre las cuales están las modalidades practicadas en piscina (apnea estática y dinámica):

- (a) Apnea estática: en esta modalidad, el atleta sumerge sus vías respiratorias en una piscina de por lo menos 60 cm de profundidad, y suspende la respiración por el mayor tiempo posible sin desplazarse.
- (b) Apnea dinámica: el apneista, sumergido en una piscina de al menos 90 cm de profundidad, realiza desplazamientos horizontales tratando de recorrer la mayor distancia posible. El uso de aletas y lentes está permitido.

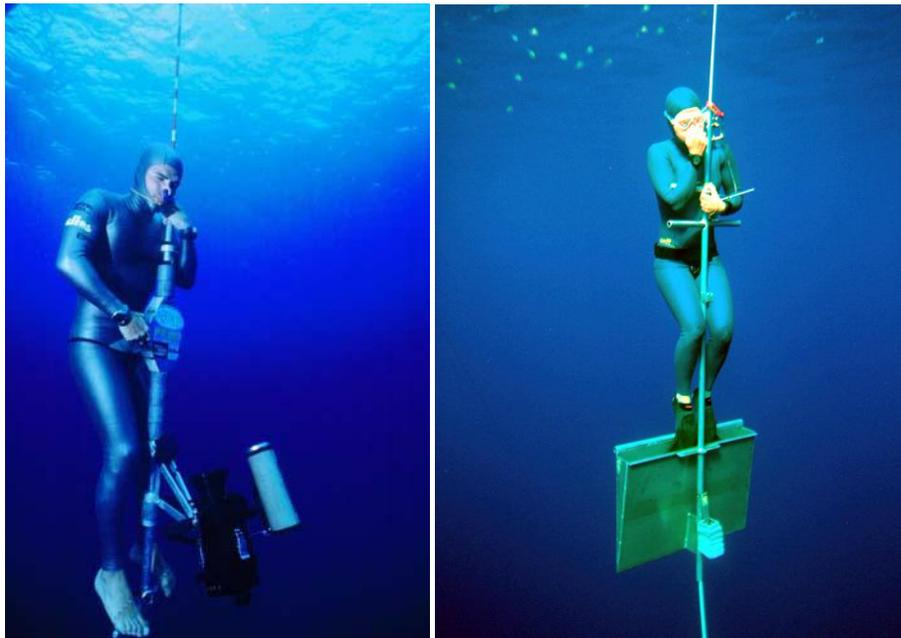
La AIDA reconoce además otras modalidades practicadas en mar abierto: En ellas se realiza el descenso hasta una profundidad previamente establecida. Para evitar la desorientación visual se utiliza una cuerda o “línea” vertical con la cual el apneista puede guiarse simplemente tocándola durante su recorrido. En las modalidades denominadas “peso variable” y “sin límites” el atleta utiliza además una plataforma de descenso llamada “trineo”, la cual debe cumplir una serie de requisitos normados (lugar para una videocámara que registre la hazaña, sistema de fijación que se deslice por la cuerda guía, no tener sistemas de fijación para el atleta) que permitan validar el establecimiento de un nuevo récord.

- (a) Peso constante: el deportista desciende hasta la profundidad establecida y recoge un testigo previamente colocado en dicha profundidad cerca de la línea guía y asciende con él. Durante todo el recorrido el atleta utiliza un cinturón de lastre que no puede remover. El uso de aletas y lentes está permitido.
- (b) Sin límites: el atleta desciende en un trineo lastrado que se desplaza por la cuerda guía. Luego asciende con el mismo trineo, el cual está habilitado para el uso de mecanismos propulsores (motores, hélices, u otros). El uso de lentes está permitido.
- (c) Peso variable: el apneista desciende en un trineo lastrado que desplaza por la cuerda guía hasta la profundidad establecida. Al llegar allí, abandona el trineo y asciende por su propia fuerza muscular, y también puede halar la cuerda ocasionalmente. El trineo puede contar con un sistema de freno que permita al atleta realizar maniobras de compensación cuando lo requiera; así como con una plataforma de apoyo para aletas en caso de que el apneista las use. El uso de aletas y lentes está permitido.

## CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

Muchos de los trineos utilizados hoy en día para este deporte, son generalmente el resultado de un proceso de diseño centrado en la fabricación y en la satisfacción de las necesidades funcionales básicas, sin hacer mucho énfasis en las variables que tienen lugar durante su operación. Aunque el producto final funcione y cumpla con los requerimientos de la competencia, estos trineos pueden ser optimizados haciendo uso de los conocimientos ingenieriles a fin de brindar al deportista un descenso más cómodo y rápido para que éste no pierda concentración y ahorre energía para el ascenso, ya que durante todo el tiempo que el atleta está sumergido debe contener la respiración. Así, un trineo óptimamente diseñado y fabricado puede mejorar el desempeño del atleta.

Para realizar el descenso el atleta puede optar diferentes posturas desde ir de pie, de cabeza o encorvado, además de utilizar o no variado equipamiento como aletas o monoaleta. Es por ello que en términos de geometría y materiales el diseño de este trineo es un campo abierto a la imaginación y los recursos del equipo técnico que apoya al atleta. Siendo así, los apneistas de peso variable han utilizado diversos modelos de trineos a lo largo de los años. En la Figura N° 1 se muestran varios ejemplos de ellos:



*Figura N° 1: Ejemplos de trineos usados en peso variable*

La mayoría de los trineos empleados para la apnea en la modalidad de peso variable constan de una barra vertical que sirve de guía para la cuerda o cabo, y al cual se sueldan o apernan elementos más pequeños que sirven de apoyo para las manos, pies o rodillas del atleta, para la colocación de una cámara y el lastre o peso. Además se suele colocar un freno de accionamiento mecánico, ya sea mediante una palanca y cables *Bowden* para la transmisión de la fuerza a unas pastillas (u otro mecanismo equivalente) que entran en contacto con la cuerda o cabo que guía el trineo, reduciendo por fricción la velocidad con la que desliza a través de éste; o bien mediante un freno de cabos de marinería, donde la palanca accionada contacta directamente al cabo.

El problema con este tipo de trineo es que son fabricados en una sola pieza, haciéndolos difícil de trasladar y por la configuración que presentan solo permiten que el apneista descienda descalzo o con aletas individuales, por lo cual para el empleo de monoaleta se recurre al uso de otro tipo de trineo que por lo general disponen de diversos tipos de perfil que permiten alojar solo los pies o hasta el cuerpo entero del atleta. Los materiales que suelen usarse en la construcción del perfil de este tipo de trineos son variados, entre ellos la fibra de vidrio, resinas, fibra de carbono, etc. En el caso de los perfiles que solo cubren las aletas del apneista, se busca que el mismo tenga cierto grado de inclinación para evitar que la columna de agua choque bruscamente con ellas y retrase la velocidad de descenso.

Otro inconveniente que presentan estos trineos es que son diseñados a la medida de un solo atleta, lo cual obstaculiza la masificación del deporte, puesto que los apneistas emergentes hallan muchas dificultades para recurrir a este tipo de equipos que permiten optimizar su desempeño.

### **1.1.MOTIVACIÓN**

La realización de este trabajo especial de grado surge de la necesidad del atleta venezolano Carlos Coste de contar con un nuevo trineo para peso variable para intentar establecer un nuevo récord mundial en esta modalidad a mediados del año

2014. Para hacerlo debe superar al menos por 1 metro la marca actual (145 m); sin embargo él desea llevar la marca hasta la profundidad de 150 metros bajo el agua. Para el ascenso tiene planteado utilizar, por primera vez en su carrera, una monoaleta; por lo que requiere un nuevo trineo que sea lo más hidrodinámico posible para evitar retrasos en el trayecto de descenso. Además, con el fin de optimizar los modelos de trineo que ha utilizado Coste en sus récords previos, el nuevo trineo debe ser ergonómico, ligero, fácil de transportar, resistente tanto a las sollicitaciones mecánicas de uso como al ambiente corrosivo, y contar con un mecanismo de freno de accionamiento rápido.

Por otra parte, con esta trabajo se pretende fomentar el desarrollo de una nueva línea de investigación dentro de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Central de Venezuela, orientada hacia la aplicación de los conocimientos técnicos adquiridos durante la carrera al ámbito de la biomecánica deportiva, mediante el análisis, diseño, construcción e implementación de nuevas herramientas que contribuyan a mejorar el desempeño de los atletas nacionales. De esta manera se contribuye a colocar en alto el nombre de Venezuela en el mundo del deporte de alto rendimiento e impulsar la práctica deportiva en diferentes niveles dentro del país.

### **1.2.ANTECEDENTES**

Debido a que la apnea no es una disciplina olímpica, y tampoco ha sido un deporte de práctica masiva, los trineos que han utilizado los apneistas para batir récords en las modalidades de peso variable y sin límites han sido en todos los casos diseñados y construidos de manera empírica y específicamente para un solo usuario, por lo que la bibliografía relacionada a los procesos de diseño y construcción de estos equipos es muy escasa. Un trabajo especial de grado de la Universidad de Los Andes (Venezuela) es el primer documento enfocado en el diseño industrial de trineo para apnea en las modalidades peso variable y sin límites (Molina y León, 2005). En este trabajo se propone como diseño óptimo un modelo de trineo con estructura principal tubular con un perfil en forma de bala acoplado, sin embargo no se realizó la

manufactura del prototipo, por lo que los aspectos relacionados con la facilidad de construcción no fueron tratados a fondo y el diseño no ha podido ser validado experimentalmente.

La multinacional TRYGONS DESIGNS se ha dedicado desde 2007 a diseñar y construir equipos e implementos usados por apneistas, tales como aletas, carcasas para cámaras subacuáticas, lentes de buceo, ganchos tapa narices, etc. También ha realizado 2 trineos para el apneista alemán Herbert Nitsch, convirtiéndose así en la primera empresa en el mundo que ha realizado este tipo de equipos para ser usados en el establecimiento de récords oficiales de alguna modalidad de apnea. En ambos casos, los trineos fueron diseñados y usados para establecer marcas en la modalidad “sin límites”, donde se permite el uso de sistemas que contribuyan a incrementar considerablemente la flotabilidad del atleta en el trayecto de ascenso, tales como mecanismos de propulsión como motores, hélices o un sistema de tanques de aire comprimido para inflar un globo de ascenso, por lo que los trineos en esa modalidad pueden tener también un perfil hidrodinámico en la parte superior, a diferencia de los trineos para peso variable.

### **1.3.OBJETIVOS**

#### **1.3.1.Objetivo general**

Diseñar y construir un prototipo de trineo eficiente para la práctica de apnea en la modalidad de peso variable.

#### **1.3.2.Objetivos específicos**

- (a) Investigación bibliográfica.
- (b) Estudio del reglamento proporcionado por la AIDA.
- (c) Investigar acerca de los trineos existentes.
- (d) Plantear diversos diseños de modelos de trineo.
- (e) Elaborar una matriz de selección a fin de elegir un diseño óptimo.
- (f) Elaborar el modelado geométrico de las piezas del trineo.
- (g) Realizar análisis y simulaciones computacionales del diseño seleccionado. mediante el método de elementos finitos.

- (h) Hacer procesos de reingeniería en base a los resultados de los análisis computacionales.
- (i) Seleccionar y adquirir los materiales de construcción disponibles en el mercado en base a los recursos económicos disponibles.
- (j) Construir el prototipo de trineo.
- (k) Realizar pruebas del funcionamiento del prototipo en condiciones reales.

### **1.4.ALCANCES Y LIMITACIONES**

Los alcances y límites del trabajo propuesto se plantean en base a una evaluación del tiempo, recursos y conocimientos académicos disponibles para la ejecución del proyecto.

- (a) Se realizarán modelados geométricos de los diseños y se someterán a análisis de simulaciones asistidas por computador. Se hará uso del software especializado ANSYS 14.0®.
- (b) El trineo debe permitir que el atleta descienda en él utilizando una monoaleta, y contar con un sistema de freno rápido e intuitivo.
- (c) Durante la fase de manufactura se construirá solamente un prototipo, que corresponderá al del modelo de diseño óptimo realizado previamente.
- (d) El trineo debe ser ligero y fácil de transportar. Sus componentes no deberán exceder 1 metro de longitud y el sistema completo (sin lastre) no pesar más de 10 kg.
- (e) Los materiales empleados deberán ser livianos, resistentes a las solicitaciones de su funcionamiento y tener propiedades resistentes a la corrosión.
- (f) Se hará uso de recursos ya disponibles tales como una cuerda de 11mm de diámetro para la línea de deslizamiento.
- (g) La adquisición de diversos materiales dependerá de la disponibilidad en el mercado y de los recursos económicos
- (h) Las pruebas finales de funcionamiento del prototipo se realizarán en condiciones reales en mar abierto.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.EL DISEÑO Y SU METODOLOGÍA**

El diseño puede ser definido como “un proceso cuyo objetivo principal es transformar los recursos en sistemas o productos para la satisfacción de necesidades de cualquier índole” (Milani, 1997).

Todo diseño surge para dar solución a una necesidad o problema y para ello pueden presentarse diversas soluciones, todas ellas deben analizarse según las limitaciones y requerimientos impuestos por el problema a fin de elegir la más adecuada a la situación planteada, muchas veces este proceso puede ser iterativo.

A la hora de diseñar se puede seguir una metodología, es decir, aplicar ciertas técnicas comunes que permitirán, a través de un razonamiento lógico y creativo, desarrollar de manera exitosa el proceso de diseño. Hay proyectos en los que por su simplicidad, no será necesario seguir todos los pasos, mientras que existen otros que por su naturaleza mucho más compleja requerirán de otras etapas adicionales. Por lo tanto, cada diseñador podrá adaptar su método de forma flexible según cada situación en particular.

Las etapas del proceso de diseño son según (Tablante, 1988):

- (a) Programa de instrucciones o método de solución de problemas.
- (b) Estudio o análisis de la necesidad.
- (c) Generación de soluciones.
- (d) Evaluación y selección.
- (e) Desarrollo.

##### **2.1.1.Programa de instrucciones**

En esta etapa se identifica el problema, se analiza y clasifica todo lo relevante que se conoce acerca del mismo. Se busca hacer una descripción tanto cualitativa como cuantitativa que se tiene del problema, así como también una descripción de las

características o especificaciones, alcance y limitaciones que debe tener el sistema a diseñar.

Es de suma importancia tener claros los objetivos en esta etapa, de esta forma se encaminará la búsqueda de soluciones de forma productiva y directa sin estar divagando y el diseño final será una expresión física de la descripción realizada previamente. Durante el desarrollo del trabajo especial la sección titulada introducción y alcances definen claramente el programa de instrucciones.

### **2.1.2. Análisis de la necesidad**

Una vez planteado el programa de instrucciones, se procede a estudiar la necesidad existente a fondo y que se quiere resolver. Se debe evitar el relacionar la necesidad con un aparato o sistema en particular, porque esto limitará más adelante la generación de soluciones.

La investigación es una parte esencial del estudio de la necesidad y permite fijar los lineamientos para definir las especificaciones o requisitos de uso con carácter bibliográfico. La investigación puede ser bibliográfica, tecnológica, o bien recopilando información directamente de usuarios, o de otro tipo según los requisitos del diseño.

Esta fase corresponde al Capítulo II del presente trabajo, donde se expone la investigación relacionada al deporte, ergonomía, mecánica de materiales, mecánica de fluidos, programas de diseño asistido por computadora (CAD), análisis de elementos finitos, y demás conocimientos ingenieriles relativos a los procesos de diseño, manufactura y materiales.

### **2.1.3. Generación de soluciones**

En la ingeniería, el diseño conceptual constituye la principal fase de todo el proceso de desarrollo e innovación de un producto. En esta etapa se requieren de dinámicas mentales y diversos métodos para generar ideas con el fin de crear diseños preliminares de los conceptos solución. El diseñador puede dejar que su imaginación

considere libremente cualquier idea que se le ocurra y debe evitar descartar cualquiera de ellas para no tener ningún tipo de bloqueo o limitación y así poder evaluar la mayor cantidad de alternativas posibles.

### **2.1.3.1.Método de la tormenta de ideas (*brainstorming*)**

Esta es posiblemente la técnica de generación de soluciones creativas más utilizada. Un grupo de personas tiene que generar todas las ideas posibles que llevan a la solución del problema, para luego discutir las y evaluarlas, repitiendo el proceso las veces que sea necesario para llegar a una solución satisfactoria de acuerdo a las restricciones y limitaciones impuestas al plantear el problema. Las cuatro reglas fundamentales de este método son:

- (a) No criticar ninguna idea para evitar los bloqueos y la libre expresión a la generación de ideas.
- (b) Toda idea es bienvenida aunque esté fuera de lo convencional, ya que no todo está inventado o puede ser mejorado.
- (c) Cuantas más ideas se tenga es mejor
- (d) Desarrollar y asociar las ideas. Es posible apoyarse en unas ideas para llegar a otras.

El fundamento del método es que muchas ideas mueren por la crítica destructiva a que se ven sometidas antes de que maduren o se perfeccionen. Mediante este sistema se trata primero de generar las ideas y luego de evaluarlas (Osborn, 1960).

Una versión modificada de la tormenta de ideas sugiere que cada persona debe dibujar de manera individual, la mayor cantidad de figuras solución en el menor tiempo posible (Tablante, 1988).

### **2.1.3.2.Mecanismos para generar ideas**

Estos mecanismos permiten percibir la necesidad en base a situaciones, relaciones, comparaciones que fomentan la creatividad generando ideas solución. Los mecanismos utilizados son:

- (a) Inversión: Consiste en invertir las funciones, configuración o posición de un determinado elemento del equipo o máquina, permitiendo generar nuevas ideas estimuladas por la provocación que produce ese planteamiento ilógico.
- (b) Analogía: Cuando los caminos lógicos y deductivos no resultan eficaces para la resolución del problema se puede recurrir a este mecanismo. Se realiza un diseño buscando similitud con elementos creados por el hombre o presentes en la naturaleza.
- (c) Empatía: Esta técnica creativa consiste en colocarse en el lugar del otro para poder experimentar el problema y tener otros puntos de vista. También se conoce como inteligencia interpersonal y permite percibir, de algún modo, cómo piensa, siente o actúa.

### **2.1.4. Evaluación y selección**

Las soluciones generadas en la etapa anterior se evalúan según las especificaciones previamente establecidas y se descartan aquellas que no cumplan con los requisitos del diseño.

Esta etapa constituye una de las más importantes ya que en ella se fijan los criterios selección que consideramos más importantes y los cuales nos van a permitir definir cuál de todas las ideas propuestas se ajustan mejor a nuestras necesidades para concretar el diseño final.

#### **Método del análisis morfológico**

El método del análisis morfológico consiste en evaluar una serie de diseños en base a los parámetros y criterios más importantes del problema que se quiere resolver, y luego buscar la alternativa o solución que satisfacen la mayor cantidad de funciones o cualidades.

Una vez obtenidas las alternativas de diseño y escogidos los criterios a evaluar, se les asignará una ponderación de acuerdo a su importancia según la investigación realizada y con la colaboración de personas relacionadas al tema, para así garantizar y contemplar tanto las variables como los detalles del diseño en cuestión.

Esta selección es comparada en una matriz morfológica con los criterios de diseño y los puntajes impuestos, la alternativa que obtenga el mayor puntaje es la que

mejor cumple con los parámetros requeridos por el sistema, siendo esta la solución al problema planteado más factible a desarrollar.

### **2.1.5.Desarrollo del diseño final**

Durante esta etapa, el diseñador define la estructura, forma total del diseño y de sus partes, la optimización de los componentes, las dimensiones y superficies, así como el material que caracteriza cada una de ellas; además indicará los procesos de fabricación involucrados y métodos de ensamblaje del equipo.

### **2.1.6.Memoria técnica y descripción del diseño**

La memoria técnica está conformada por: la descripción técnico-funcional del diseño, el cual muestra el despiece, designación y descripción de funcionamiento; y el manual de operaciones y de mantenimiento.

## **2.2.VARIABLES DE INTERÉS RELACIONADAS CON LA PRÁCTICA DE APNEA**

### **2.2.1.Presión, temperatura, salinidad y densidad en el mar**

Estas 4 variables están estrechamente ligadas en cuanto a la determinación de las propiedades de las aguas oceánicas. Las masas de agua menos densas y calientes se distribuyen en los estratos superiores del océano, mientras que las más densas y frías se hunden. A su vez, la densidad del agua marina se relaciona directamente con la presión que ejerce la columna de agua sobre un cuerpo sumergido en el mar, y depende en gran medida de la cantidad de cloruros, sulfatos y carbonatos disueltos en el mar (salinidad). Pero la distribución de estos compuestos no es uniforme ni constante.

Se denomina presión absoluta a la suma de la columna de aire y de agua que están por encima del cuerpo sumergido y se calcula habitualmente añadiendo una atmósfera a la presión debida a la columna de agua (presión hidrostática).

## CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

---

En cuanto a la temperatura, para todos los océanos y a diferentes profundidades, se ha establecido una media de 4°C con valores que van desde -2°C hasta 32°C (Martínez, 2005). Sin embargo, para latitudes ecuatoriales, la superficie oceánica suele tener una temperatura promedio de 26°C, y en este caso la termoclina (región limítrofe entre aguas superficiales con temperaturas constantes y aguas profundas con rápido descenso de temperatura) que se halla a 150 m de profundidad tiene una temperatura de 15°C aproximadamente (Cifuentes, Torres y Frías, 1986).

La salinidad varía constantemente, vertical y horizontalmente, e incluso en un mismo punto del océano. Sin embargo, a partir de numerosas mediciones hechas en distintos puntos del océano, se ha fijado que 35 partes por mil es la salinidad media del agua marina, con leves variaciones de un océano a otro (Cifuentes et al., 1986).

La densidad del agua oceánica, en su superficie, es de aproximadamente 1027 kg/m<sup>3</sup>. Debido a que la densidad y la temperatura del agua marina están inversamente relacionadas, a medida que se desciende hacia el fondo del océano, la densidad aumenta cada vez más, pues la temperatura desciende con la profundidad (Bergman, 2001). En la Figura N° 2 puede apreciarse la relación aproximada entre la profundidad del océano y la densidad del agua marina para una latitud de 30-40° Sur:

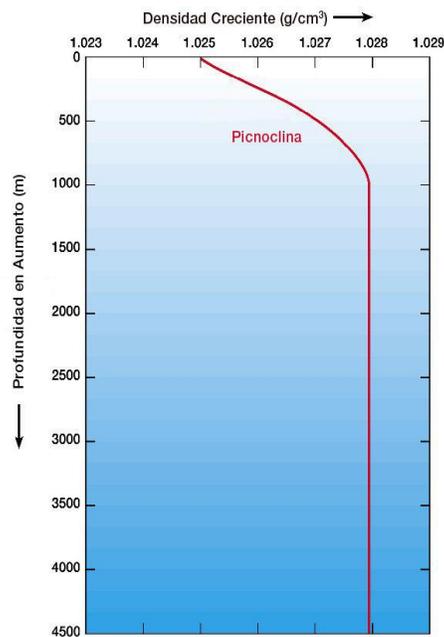


Figura N° 2: Curva de Profundidad vs Densidad en el océano a una latitud de 30-40° Sur (Bergman, 2001)

En esta curva puede verse que la variación máxima de la densidad del agua marina es de 0,29% entre 0 y 1000 m de profundidad, y luego permanece constante.

### **2.2.2.Barotraumas**

Para las disciplinas de apnea asistida, es decir, aquellas en las que se requiere la utilización de un trineo (peso variable y sin límites), la AIDA publicó en 2007 un documento titulado “*AIDA Guidelines and Protocol for Sled Diving*”, relacionado con los parámetros de seguridad que deben tomarse en cuenta para poder reducir los riesgos inherentes a la práctica de estas disciplinas; pues es en ellas en las que se alcanzan mayores profundidades y existen mayores peligros para la salud del apneista, derivados de las condiciones anormales a las que se somete el organismo al intentar alcanzar estos grandes niveles bajo el mar.

En este documento se exponen las anomalías orgánicas tales como barotraumas, narcosis de nitrógeno, descompresión, entre otras, que pueden ocurrirle al atleta durante la práctica de estas disciplinas. Se mencionan sus síntomas característicos y algunas posibles causas o factores directamente relacionados con ellos, como la profundidad a la que se llega, el tiempo de permanencia en dicha profundidad, las aceleraciones bruscas o velocidades que no puede soportar el atleta durante el descenso y el ascenso, entre otras. También se hace referencia a los protocolos de seguridad que deben seguirse a la hora de entrenar y de intentar establecer un récord en alguna de estas disciplinas.

En cuanto a la velocidad de descenso, se ha establecido que está involucrada con anomalías del organismo sometido a aumentos bruscos de presión: barotrauma de los oídos, de las cavidades sinusales y de los pulmones, etc. Para un buzo, la velocidad segura de descenso ronda los 0,4m/s (Blacio, 2009). Pero los apneistas de alto rendimiento han venido superando estas marcas, en parte gracias a que ellos no respiran aire comprimido durante sus desplazamientos bajo el mar.

En base a los tiempos que han alcanzado diversos apneistas durante el establecimiento de diferentes récords mundiales a lo largo de los años en las modalidades de peso constante y peso variable y que se muestran en la Tabla N° 1, el

## **CAPÍTULO II: MARCO TEORICO**

---

promedio de la velocidad segura de descenso para un apneista de alto desempeño puede estimarse alrededor de 1,5 m/s

*Tabla N° 1: Velocidad promedio de descenso en modalidades de apnea:  
Peso constante y peso variable*

<b>Modalidad</b>	<b>Atleta y año del evento</b>	<b>Profundidad alcanzada [m]</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Velocidad de descenso estimada [m/s]</b>
Peso constante	Umberto Pellizari / 1997	75	50'' (tiempo de descenso)	1,5
	William Trubridge / 2009	88	1'20'' (tiempo de descenso)	1,1
Peso variable	Gianluca Genoni / 2001	126	1'28'' (tiempo de descenso)	1,431
	Umberto Pellizari / 2001	131	1'06'' (tiempo de descenso)	1,984
	Carlos Coste / 2007	140	1'30'' (tiempo de descenso)	1,555
<b>Velocidad promedio de descenso [m/s]</b>				<b>1,514</b>

### **2.3.ERGONOMÍA**

Para el diseño de equipos ergonómicos, es fundamental conocer los principios básicos de la anatomía humana, en particular aquellos que estén directamente relacionados con el elemento a diseñar.

En relación con lo anterior, hay que conocer cuáles son las posturas óptimas que debe tener una persona para la realización de determinado trabajo. Estas posturas son aquellas en las que su sistema osteomuscular no está sometido a esfuerzos que no puede tolerar. Así, por ejemplo, deben evitarse posturas en las que las vértebras del individuo estén sometidas a torsión (Bernal, 2010).

Las normas de ergonomía se basan en principios universales, y por lo tanto son aplicables a todas las actividades humanas. Algunas de ellas se señalan en el Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en PYME (2003), del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España. Según este manual, las siguientes posturas, entre otras, se clasifican como no aceptables, ya sea si se mantienen estáticamente por más de un minuto, o si se

realizan de manera repetitiva (más de 2 veces por minuto), o si realizan frecuentemente a lo largo de toda una jornada:

- (a) Cabeza y cuello inclinados o girados en  $20^\circ$  o más
- (b) Tronco inclinado o girado en  $20^\circ$  o más
- (c) Brazo elevado a más de  $20^\circ$  y sin apoyar
- (d) Brazo en extensión hacia atrás
- (e) Muñeca y codos muy extendidos o muy flexionados
- (f) Sostener la vista por debajo de  $40^\circ$  de la horizontal, o por encima de la horizontal
- (g) Permanecer de pie sin desplazarse, con las rodillas flexionadas

### **2.4.FLUJOS EXTERNOS**

En los casos de flujos sumergidos incompresibles, la capa límite cerca del punto de estancamiento es laminar. Si el número de Reynolds es suficientemente grande hay una transición a capa límite turbulenta corriente abajo y puede separarse el flujo, en cuerpos romos, o simplemente dejar el cuerpo por el borde de salida, si es un cuerpo fluidodinámico (en estos casos puede haber también una región separada, es decir, de flujo recirculante, pero muy pequeña en comparación con la generada alrededor de cuerpos romos). También se forma una región creciente de defecto de velocidad denominada estela, que sigue al cuerpo (Potter y Wiggert, 2002).

Los límites de la estela, de la región separada y de la capa límite turbulenta dependen en gran medida del tiempo. La región separada con el tiempo se cierra; la estela se difunde hacia el flujo principal y luego desaparece, pues el fluido recupera su velocidad de corriente libre.

Si el flujo en la capa límite sobre un cuerpo fluidodinámico puede ser determinado, entonces también puede ser hallada la fuerza de arrastre, pues es el resultado del esfuerzo cortante y la fuerza de presión que actúan sobre la superficie del cuerpo.

#### **2.4.1.Cuerpos sumergidos**

La resistencia al avance de un cuerpo en inmersión profunda en un fluido ideal (no viscoso) es nula, pues los esfuerzos cortantes no están presentes en este tipo

de fluidos. Pero en los fluidos reales efectivamente se desarrolla una capa límite alrededor del cuerpo que genera fricción, la cual da lugar a una desigual distribución de presiones que se traduce en una resistencia al avance del cuerpo. Dicha resistencia puede llegar a ser considerable, y es una componente de la resistencia llamada “de formas” o de arrastre. En otras palabras, la fuerza de arrastre es una combinación de la resistencia de formas y la de fricción.

Este tipo de resistencia puede cuantificarse mediante la Ecuación (1):

**Ec. (1):** 
$$F_D = (A * C_D * V^2 * \rho) / 2$$

Donde: A es la superficie frontal de contacto [m<sup>2</sup>], C<sub>D</sub> es el coeficiente de forma o de arrastre [adimensional], V<sup>2</sup> es la velocidad del flujo elevada al cuadrado [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] y ρ es la densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>].

La resistencia por fricción aumenta con la capa límite turbulenta y disminuye con la laminar; en cambio la resistencia por presión estática alrededor del cuerpo disminuye con capa límite turbulenta (punto de despegue cerca del borde de fuga) y crece con capa límite laminar (el punto de despegue se acerca al borde de ataque).

La Ecuación 1 es válida para un objeto que mantiene una posición fija, sin variar su superficie frontal de contacto mientras es arrastrado mediante algún mecanismo.

Para el estudio de cuerpos sumergidos en movimiento vertical, es importante tomar en cuenta también el fenómeno de flotabilidad. La flotabilidad está relacionada con el volumen de fluido que el cuerpo desplaza. Este volumen de fluido genera una fuerza igual en magnitud a su peso que empuja al cuerpo inmerso hacia arriba (Mott, 1996). Esta fuerza de empuje ascendente puede ser descrita a través del principio de Arquímedes:

**Ec. (2):** 
$$F_B = \gamma_F V_D$$

Donde F<sub>B</sub> es la fuerza boyante o flotante [N], γ<sub>F</sub> es el peso específico del fluido [N/m<sup>3</sup>] y V<sub>D</sub> es el volumen desplazado de fluido [m<sup>3</sup>].

Cuando un cuerpo flota libremente, el peso del volumen de fluido que desplaza es equivalente al suyo propio. De esta manera, el análisis de un cuerpo en reposo en el fluido se haría calculando la sumatoria de fuerzas en la dirección vertical

e igualándolas a cero. Pero si se quiere que el cuerpo se desplace hacia abajo, entonces debe actuar una fuerza externa sobre el cuerpo en esta dirección. Ello puede lograrse vinculando una masa adicional externa al cuerpo.

### **2.4.2. Número de Reynolds**

El número de Reynolds permite caracterizar el régimen de flujo del fluido de trabajo y para flujos externos se calcula de acuerdo a la ecuación:

**Ec. (3):** 
$$\text{Re} = L \cdot V / \nu$$

Donde L es la longitud característica (por lo general es la distancia de punta a punta del cuerpo inmerso) [m] y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido [m<sup>2</sup>/s].

A medida que la magnitud de la velocidad sea mucho mayor a la viscosidad cinemática del fluido de trabajo, los efectos inerciales dominan y las fuerzas viscosas tienden a desaparecer. Mientras mayor sea el número de Reynolds en la corriente libre, mayor será la velocidad asociada al tamaño del cuerpo, sin embargo, la viscosidad cinemática del fluido puede variar muy poco. Este hecho hace presumir que el flujo a alta velocidad se comporta como fluido de baja viscosidad. Esto se debe a que los efectos viscosos quedan confinados a una pequeña región del fluido alrededor del cuerpo. Estas condiciones son caracterizadas por un número de Reynolds alto, lo cual se traduce en un régimen turbulento. El Re a partir del cual el régimen se considera totalmente turbulento es denominado Re crítico, y es diferente para cada geometría. Para una placa plana, por ejemplo, el Re crítico =  $3 \cdot 10^5$  (Potter y Wiggert, 2002). Pero para determinar el régimen de flujo se hace indispensable recurrir a la experimentación, ya que los valores críticos pueden variar considerablemente de una geometría a otra, e incluso para una misma geometría con rugosidad superficial diferente.

### **2.4.3. Ecuaciones de Navier-Stokes**

En mecánica de fluidos, las ecuaciones que solucionan el problema del caso viscoso son la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de la cantidad

de movimiento o ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son una expresión de la segunda ley de Newton cuando las fuerzas son debidas a las presiones y a esfuerzos viscosos. Los esfuerzos viscosos se relacionan con la velocidad de deformación. El modelo más simple posible de esta relación es una línea. Un fluido que sigue la proporcionalidad lineal se conoce como fluido newtoniano. A partir de un desarrollo completo de la relación esfuerzo-velocidad de deformación para un fluido newtoniano y desarrollando los términos para un fluido incompresible ( $\rho$  constante) y de viscosidad constante, se obtienen las 3 ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes. Para cada fluido, Estas expresiones quedan adimensionalizadas (Pérez, Souto y González, 2001):

$$\text{Ec. (4):} \quad \rho(\mathbf{Du}/Dt) = -\partial p/\partial x + \rho g_x + \mu(\partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2 + \partial^2 u/\partial z^2)$$

$$\text{Ec. (5):} \quad \rho(\mathbf{Dv}/Dt) = -\partial p/\partial y + \rho g_y + \mu(\partial^2 v/\partial x^2 + \partial^2 v/\partial y^2 + \partial^2 v/\partial z^2)$$

$$\text{Ec. (6):} \quad \rho(\mathbf{Dw}/Dt) = -\partial p/\partial z + \rho g_z + \mu(\partial^2 w/\partial x^2 + \partial^2 w/\partial y^2 + \partial^2 w/\partial z^2)$$

Donde:  $u, v, w$  son las componentes de la velocidad del fluido [m/s] en las direcciones de los ejes  $x, y, z$  respectivamente,  $p$  es la presión [Pa],  $g$  la gravedad [ $m/s^2$ ] y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido [kg/ms]

Con las Ecuaciones 4,5 y 6 y la ecuación diferencial de continuidad (Ec. 7) se tienen cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas ( $u, v, w$  y  $p$ ). Se supone que la viscosidad y la densidad del fluido se conocen.

$$\text{Ec. (7):} \quad \partial V_i/\partial x_i = 0$$

Este sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales solamente ha podido ser resuelto analíticamente para algunas geometrías simples. Para la resolución de geometrías complejas se recurre a los métodos iterativos asistidos por computador.

### 2.4.4. Capa límite

En el estudio del flujo externo con número de Reynolds alto se observó que los efectos viscosos quedan confinados a una delgada capa alrededor del cuerpo. Esta región se denomina capa límite, y su espesor suele definirse como el punto donde la velocidad del flujo alcanza un valor igual al 99% de la velocidad de corriente libre.

Para una superficie fluidodinámica, se obtiene una buena aproximación del arrastre integrando el esfuerzo cortante en la pared. Pero para ello es necesario conocer el gradiente de velocidad en la pared, y por lo tanto una solución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes (Potter y Wiggert, 2002).

La capa límite comienza en forma de flujo laminar con espesor finito en el punto de estancamiento de un objeto como o una superficie fluidodinámica; y luego de cierta distancia que depende de la velocidad de corriente libre, de la viscosidad del fluido, del gradiente de presión, de la rugosidad de la pared, del nivel de fluctuación de la corriente libre y la rigidez de la pared, el flujo laminar atraviesa un proceso de transición que produce luego un flujo turbulento. La región de transición es relativamente corta, por lo que suele despreciarse en los cálculos.

Mientras el espesor de la capa límite sea delgado, la variación de presión en la superficie del cuerpo es pequeña, lo cual controla la resistencia de forma. Cuando existe el despegue de la capa límite crece el esfuerzo de forma y también lo hace el de fricción. Si la capa límite es turbulenta antes de la separación, el punto de desprendimiento se retrasa hacia la parte posterior del cuerpo, generando un efecto de empuje sobre el cuerpo debido a la reducción del área de separación y por lo tanto del arrastre. Para una geometría dada, se requiere una mayor distancia para reducir la velocidad de la pared a cero, lo que origina el desplazamiento del punto de separación de la capa límite.

### **2.4.5. Perfiles fluidodinámicos**

Perfil fluidodinámico es el nombre que se le da a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través de un determinado fluido puede originar en su contorno una distribución de presiones que genere sustentación y reduzca el arrastre.

Sin embargo, todo objeto posee un perfil característico, cuya forma puede:

- (a) Presentar mayor o menor resistencia al avance en un fluido; es decir, una mayor o menor aptitud para el movimiento en del fluido.

- (b) Generar fuerzas dinámicas sobre el mismo, de mayor o menor intensidad en conjunción al desplazamiento del objeto en el fluido en el que se halla inmerso.

Los componentes principales de un perfil fluidodinámico se señalan en la Figura N° 3. Son de particular importancia: el borde de ataque (punto del primer contacto con el fluido), el borde de salida (punto en que las corrientes de fluido del extradós y del intradós confluyen y abandonan el perfil), extradós (parte superior del perfil, desde el borde de ataque al de salida), el intradós (parte inferior del perfil, desde el borde de ataque al borde de salida), cuerda (línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida), y espesor (máxima distancia entre el extradós y el intradós).



Figura N° 3: Nomenclatura de un perfil

El perfil fluidodinámico puede diseñarse para que genere fuerzas de sustentación y arrastre de magnitudes cercanas a las deseadas, según la aplicación para la que se requiera. Sin embargo, estos valores también dependen de la velocidad del fluido. Se definen las fuerzas de sustentación (FL) y de arrastre (FD) como las fuerzas que ejerce el flujo sobre el cuerpo en la dirección normal al flujo y en la misma dirección del flujo, respectivamente (Potter y Wiggert, 2002); y están asociadas a los coeficientes adimensionales CL (coeficiente de sustentación) y CD (coeficiente de arrastre), definidos por las Ecuaciones 8 y 9:

**Ec. (8):** 
$$CL = 2FL/\rho V^2 A$$

**Ec. (9):** 
$$CD = 2FD/\rho V^2 A$$

## CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

Donde  $A$  es el área proyectada del cuerpo fluidodinámico sobre un plano normal a la dirección del flujo, basada en la cuerda  $[m^2]$  y descrita por la Ecuación 10:

$$\text{Ec. (10):} \quad A = cL$$

Donde  $c$  es la cuerda  $[m]$  y  $L$  es la longitud de la superficie aerodinámica  $[m]$ .

Una relación entre el coeficiente de arrastre  $C_D$  y el número de Reynolds para cuerpos sumergidos (cilindro y esfera) puede verse en la Figura N° 4. Puede apreciarse que al perfilar el cuerpo, los valores de  $C_D$  disminuyen considerablemente para los mismos números de Reynolds.

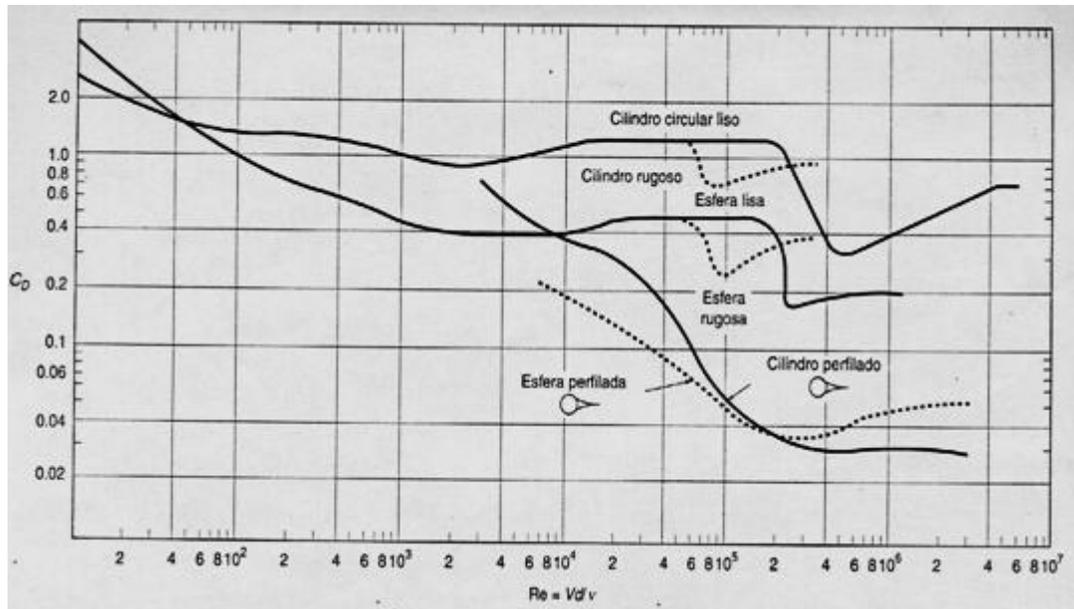


Figura N° 4: Coeficiente de arrastre para flujo alrededor de un cilindro largo y una esfera (Potter y Wiggert, 2002)

Un cuerpo con perfil aerodinámico suele tener un área superficial más grande que con otro tipo de perfil. Este incremento evita el desprendimiento de la capa límite y por lo tanto evita la reducción de la sustentación, pues elimina la mayor parte del arrastre por presión haciendo que el flujo lento cercano a la superficie llegue a la región posterior. Para ello, el ángulo del borde de salida no debe ser superior a los  $20^\circ$  (Potter y Wiggert, 2002). Por otra parte, el aumento del área superficial incrementa a su vez el arrastre por esfuerzo cortante en la superficie. En consecuencia, el cuerpo aerodinámico no puede ser tan grande; es por ello que debe optimizarse la relación de

espesor de cuerda según la aplicación. En un perfil aerodinámico convencional, el CL mínimo suele ser cercano a 0,2.

Para que el coeficiente de sustentación sea positivo aún con un ángulo de ataque cero, es necesario que el perfil aerodinámico sea asimétrico; pues si la distribución de presiones es simétrica alrededor del cuerpo entonces no hay sustentación. La sustentación es directamente proporcional al ángulo de ataque hasta que este último se aproxima a un valor de  $16^\circ$ , tal como se mencionó previamente. El coeficiente de arrastre también se incrementa linealmente hasta que  $\alpha$  alcanza un valor aproximado de  $5^\circ$  en un perfil aerodinámico convencional, y luego se incrementa de manera no lineal según el ángulo de ataque.

### **2.5.MECÁNICA DE MATERIALES**

La mecánica de materiales es una rama de la mecánica aplicada que permite conocer el comportamiento de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos de piezas sometidas a cargas para así conocer su resistencia y duración.

#### **2.5.1.Esfuerzo y deformación**

El esfuerzo  $\sigma$  [Pa] se puede definir como la fuerza  $F$  [N] que actúa por unidad de área transversal de un sólido  $A$  [m<sup>2</sup>], según la Ecuación 11:

**Ec. (11):** 
$$\sigma = F/A$$

Los esfuerzos pueden ser normales si las tensiones  $\sigma$  actúan perpendicularmente al área de estudio; o cortantes si los esfuerzos  $\tau$  actúan tangencialmente sobre el plano considerado.

Los esfuerzos normales pueden ser de compresión o de tensión. Un esfuerzo de compresión es aquel que tiende a acortar y aplastar un cuerpo ensanchándolo en las direcciones transversales. Un esfuerzo de tensión es aquel que tiende a estirar el miembro (se reduce la sección transversal), y romper el material (Mott, 1996).

## CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

Las cargas que se aplican sobre una pieza pueden producir deformación, ésta se obtiene, según la Ecuación 12, dividiendo el cambio de longitud  $\delta$  [m] entre la longitud original del cuerpo  $d$  [m] y se denota:

**Ec. (12):** 
$$\epsilon = \delta/d$$

En el diagrama esfuerzo vs deformación mostrado en la Figura N° 5 pueden distinguirse 3 secciones de la curva, denominadas zona elástica, zona plástica y zona de endurecimiento y fractura.

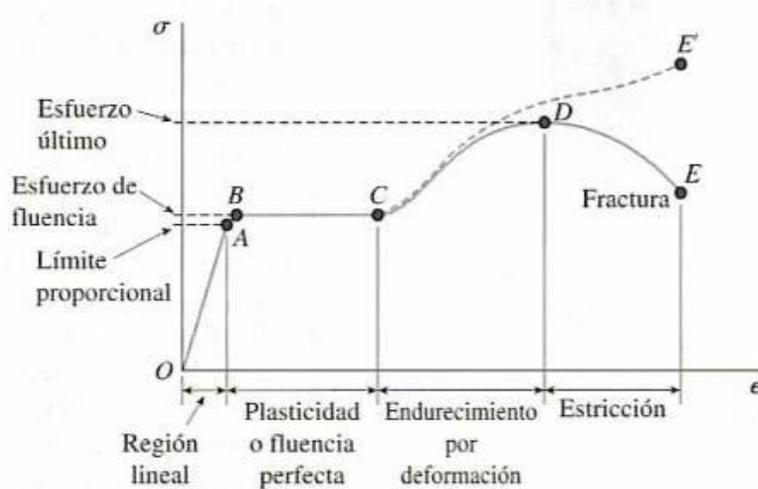


Figura N° 5: Diagrama esfuerzo deformación general (Gere, 2002)

**Zona elástica:** En esta región la relación entre el esfuerzo  $\sigma$  y la deformación unitaria  $e$  es lineal y proporcional. La pendiente de esta recta se conoce como módulo de elasticidad ó módulo de Young y se denota  $E$  (Ecuación 13) y mide el grado de rigidez de un material; hasta el punto  $A$  se cumple esta proporcionalidad, por eso se conoce como límite proporcionalidad. Al punto  $B$  se le llama límite de elasticidad y se caracteriza porque cuando se alcanza este valor, un material deformado por la aplicación de una carga recupera su longitud inicial cuando esta deja de actuar.

**Ec. (13):** 
$$E = \sigma / e$$

**Zona plástica:** Entre  $B$ - $C$  se define el régimen plástico y el material no recupera su longitud natural. Una vez arribado al límite de fluencia  $S_y$ , el material fluye, es decir, aumentan las deformaciones sin que exista aumento de tensión.

En la zona de endurecimiento y fractura el material experimenta cambios en su estructura cristalina, dando lugar al endurecimiento por deformación incrementándose la capacidad de resistencia pudiendo admitir cargas mayores. La tensión aumenta hasta alcanzar el valor máximo en D denominado esfuerzo último ( $S_u$ ), a partir del cual la tensión disminuye hasta que alcanza una determinada deformación de rotura y ocurre la fractura en el punto E.

Las cargas que se aplican sobre una pieza pueden llegar a producir fallas o roturas en las piezas si sobrepasan su capacidad para soportarlas. La ductilidad es el grado en el cual un material se deforma antes de su fractura final. Cuando se emplean materiales dúctiles en elementos estructurales se puede detectar fácilmente la inminente falla, y son muy raras las fallas repentinas. Los materiales dúctiles son mejores para resistir cargas repetidas que los materiales no dúctiles, a los cuales se les llama frágiles (Mott, 1996).

### **2.5.2. Teorías de fallas**

Los criterios usados para determinar los esfuerzos estáticos permisibles en estructuras son conocidos como teorías de fallas. Cada una utiliza diversas formulaciones, en función del tipo de material de la estructura: frágiles o dúctiles. Se consideran materiales frágiles aquellos que admiten muy poca deformación antes de romperse; mientras que los dúctiles son los que pueden deformarse considerablemente antes de llegar a rotura.

Para materiales dúctiles como el aluminio existen dos teorías principales: la teoría de la máxima tensión cortante y la teoría de la máxima energía de distorsión.

#### **2.5.2.1. Teoría de máxima tensión cortante**

La teoría de máxima tensión cortante o tangencial, fue propuesta a mediados del siglo XIX por Henri Tresca y establece que el sólido no fallará si el máximo esfuerzo cortante  $\tau_{\text{máx}}$  al que está sometida la pieza es inferior al máximo esfuerzo

cortante permisible ( $S_y$ ) que el material puede resistir sin sufrir deformaciones permanentes.

**Ec. (14):** 
$$\tau_{\text{máx}} \geq S_y/2$$

### **2.5.2.2. Teoría de la máxima energía de distorsión**

Esta teoría, también llamada criterio de Von Mises, puede considerarse un refinamiento del criterio de Tresca, y es la más usada para el caso de materiales dúctiles que sufren un esfuerzo de tracción. Un elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen sobrepasa un cierto umbral, que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción uniaxial: El sólido no falla si la máxima energía de distorsión presente es inferior a la máxima energía de distorsión permisible por el material.

**Ec. (15):** 
$$\text{DIST} \geq S_y/2E$$

Esta teoría surgió a partir de la observación de que materiales dúctiles, sometidos a esfuerzos hidrostáticos (de igual tensión o compresión), tenían valores de resistencia de fluencia muy superiores a los obtenidos por el ensayo a tensión simple. Por lo tanto, se postuló que la fluencia no era un fenómeno de tensión o de compresión simples, sino que estaba relacionada de alguna manera con la distorsión (deformación angular) del elemento esforzado.

## **2.6. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARA EL TRINEO**

### **2.6.1. Aluminio**

El aluminio es un metal que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no férreos. Mecánicamente es un material blando y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160-200 MPa. De alta resistencia a la corrosión y con un bajo punto de fusión (660 °C). Es buen conductor eléctrico (entre 35 y 38 m/Ω mm<sup>2</sup>) y térmico (80 a 230 W/mK). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Mediante aleaciones adecuadas se

puede aumentar su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa), lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material.

El proceso de mecanizado del aluminio y sus aleaciones se realiza en general, de forma fácil y rápida ya que se trata de un material blando y maleable.

Para soldar piezas de aluminio y sus aleaciones pueden realizarse diversos procesos de soldadura, siendo una de las más utilizadas la soldadura de arco de Tungsteno protegida por gas inerte (T.I.G. por sus siglas en inglés), pues este método permite una soldadura mecánicamente fuerte, dúctil y menos sensible a la corrosión que otros procedimientos.

### **2.6.2. Materiales compuestos**

Uno de los tipos de materiales que durante los últimos años ha presentado un crecimiento más acelerado en cuanto a uso y desarrollo son los denominados materiales compuestos. Estos pueden ser definidos como un sistema de materiales constituido por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí. Su alta utilización radica en la significativa mejora de propiedades que pueden obtenerse al mezclar materiales básicamente disímiles. De este modo se puede lograr que un material frágil y de baja resistencia se combine con otro dúctil y de moderada resistencia para obtener un material de ductilidad moderada y con buena resistencia

#### **Fibra de vidrio**

Las fibras de vidrio están constituidas fundamentalmente por sílice. La elevada resistencia que poseen las fibras de vidrio es producida por los enlaces covalentes entre el silicio y los radicales de oxígeno. Los átomos integran una relación tridimensional con estructura amorfa; es debido a esta razón que posean características isotrópicas. Este material es diseñado para uso en refuerzo plástico de

## **CAPÍTULO II: MARCO TEORICO**

---

resinas de poliéster, y comúnmente usado en los sectores de la industria náutica, construcción, automotriz y petroquímica.

Los tipos de fibra de vidrio son (Miravete, 2007):

- (a) El vidrio E (eléctrico) es el vidrio textil más comúnmente usado en materiales, tiene buenas propiedades de resistencia, rigidez, eléctricas y de desgaste.
- (b) Vidrio A (alcalino): posee buena resistencia al ataque de soluciones químicas y acidas, producto de los elevados porcentajes de alcalinos que contiene. Su resistencia y módulo son más bajos que el vidrio E
- (c) Vidrio AR (álcali resistente): puede combinarse con hormigón y cemento sin que la alcalinidad liberada en la hidratación lo afecte.
- (d) El vidrio C (Químico) tiene una alta resistencia a la corrosión química, pero con propiedades de resistencia inferiores.
- (e) El vidrio R o S (resistencia): tiene una resistencia a la tracción y módulo de Young mayor y es resistente a la temperatura, fatiga y humedad. Es costoso por lo que es usa en aeronáutica
- (f) Vidrio D (dieléctrico): se utilizan en componentes electrónicos y de telecomunicaciones debido a sus altas propiedades dieléctricas (perdidas eléctricas muy débiles)
- (g) Vidrio B (Boro): tiene buenas propiedades eléctricas y de es de gran durabilidad
- (h) Vidrio ECR: combinación de resistente química y propiedades eléctricas.
- (i) Vidrio X: transparente a los rayos X

Para estimar la resistencia a la rotura de la fibra de vidrio se utiliza la fuerza de rotura, que se define como la máxima longitud de una columna vertical del material (asumiendo una sección cruzada del tejido del mismo) que puede soportar su propio peso cuando solo se sostiene por el borde superior. Sus unidades son N/Tex, siendo Tex la unidad SI para la densidad de las fibras y se define como la masa en gramos por cada 1000 metros.

### **2.7. ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Para analizar deformaciones, tensiones y esfuerzos en estructuras simples, se emplean los métodos clásicos, esto es, la resolución manual de sus ecuaciones y sus condiciones de frontera; no obstante, cuando el sistema es mucho más complejo, la mejor opción es una solución obtenida por medio del método de los elementos finitos.

Ambos métodos difieren en cómo se analiza la estructura. En la forma tradicional, se considera la estructura como continua y su comportamiento se rige bajo ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias, mientras que en el método de elementos finitos, la estructura es considerada como el ensamble de un número finito de partículas pequeñas. Esto permite obtener el comportamiento de las partículas, y de toda la estructura, por medio de la formulación de un sistema algebraico de ecuaciones que puede ser resuelto de manera computacional. Las partículas de tamaño finito que conforman la estructura son denominadas elementos finitos, mientras que los puntos de interconexión entre estos, son conocidos como nodos, y el procedimiento de selección de nodos es llamado discretización.

Desde la perspectiva de la metodología del MEF, se consideran los siguientes pasos:

- (a) Creación de la geometría o modelo matemático
- (b) Construcción del modelo de elementos finitos
- (c) Resolución del modelo de elementos finitos
- (d) Análisis de los resultados

### **2.7.1. Construcción del modelo matemático (geometría)**

En primer lugar, se debe realizar un modelo tridimensional de la geometría a través de programas de diseño asistido por computadora también conocido por sus siglas en inglés como CAD (*computer-aided design*). Un modelo geométrico del problema simplificado es necesario para generar una malla de elementos finitos pequeños de gran calidad, a fin de obtener los resultados correctos de los datos de interés, tales como desplazamientos, tensiones, distribución de temperatura, etc.

Para que la geometría sea apta, en algunos casos, es necesario realizar la idealización y/o la limpieza en el modelo CAD, se aplica el borrado o supresión de operaciones del modelado geométrico como chaflanes, redondeos u otros detalles, que se consideran insignificantes para el análisis y que por el contrario consumen un mayor tiempo computacional y espacio de almacenamiento.

### **2.7.2.Construcción del mallado**

En este paso se aplica un proceso de individualización en el que la geometría o modelo matemático es dividido en un ensamble de elementos finitos (generación de malla). Al discretizar, se logra pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por un sistema de ecuaciones diferenciales cuya solución puede ser compleja, a un sistema con un número de grados de libertad finito, bastante simplificado. De esta forma, la solución es representada con un ensamblaje de funciones polinómicas simples definidas individualmente para los elementos (Moreno y Pérez, 2002).

### **2.7.3.Resolución del modelo de elementos finitos**

Una vez generada la malla, se emplea una aplicación de elementos finitos para producir el análisis deseado. Debido a que los distintos paquetes de *software* suelen disponer diferentes opciones según el algoritmo de cálculo, el usuario debe elegir en esta fase, dentro de la aplicación, el módulo de cálculo utilizado para la obtención de los resultados del estudio.

### **2.7.4.Análisis de resultados**

En esta etapa se analizan y evalúan los resultados obtenidos. El *software* post-procesador contiene rutinas sofisticadas para clasificar los resultados selectos de una solución. La aplicación de elementos finitos proporciona unos datos de resultados muy precisos, que se pueden presentar en diversos formatos según la finalidad del estudio.

Con estos programas es posible representar los esfuerzos de los elementos de acuerdo a su magnitud, visualizar la estructura deformada y los factores de seguridad a través de códigos de colores. También es posible observar el comportamiento del modelo en imágenes animadas y dinámicas.

### 2.7.5. Tipos de elementos finitos

En el proceso de individualización o generación de malla, el modelo continuo es dividido en elementos finitos. El tipo de elementos a utilizar depende del tipo de geometría. Por lo general, los paquetes de *software* comerciales que trabajan con la teoría de elementos finitos tienen una amplia variedad de elementos en sus librerías. Dependiendo la dimensión, los elementos básicos se pueden dividir en tres categorías: elemento de línea, área y volumen (Moreno y Pérez, 2002).

Los elementos de línea o *truss* son aquellos elementos unidimensionales que se caracterizan porque solo puede comportarse como un miembro sometido a dos fuerzas, estas cargas deben estar dirigidas a lo largo del eje longitudinal del elemento, por lo tanto, la única propiedad de la sección que se debe especificar es el área axial del elemento.

Los elementos bidimensionales o de área se utilizan en casos donde dicha sección transversal puede cambiar con la longitud, dependiendo el tipo del tipo de esfuerzo al que está sometido el elemento, este se debe modelar como esfuerzo plano o deformación unitaria plana. Los elementos básicos para realizar análisis bidimensionales son los triangulares y los cuadriláteros, mostrados en la Figura N° 6.

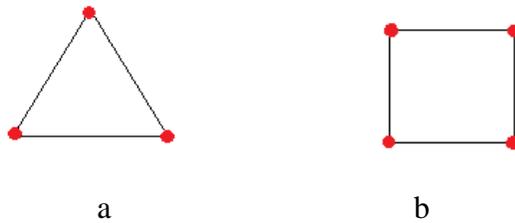


Figura N° 6: Elementos bidimensionales: a) Triangular, b) Cuadrilátero

Los elementos tridimensionales o de volumen se emplean para aquellos sistemas donde las propiedades y la configuración en general cambian en tres coordenadas. Los elementos básicos para realizar análisis tridimensionales son los hexaedros o tetraedros. Por lo general, estos elementos poseen solo tres grados de libertad por vértice (elementos de primer orden), y la precisión de estos elementos se

puede incrementar colocando nodos en la mitad de los lados (elementos de segundo orden).

En los elementos de primer orden (Figura N° 7), las aristas son rectas y las caras planas y así deben permanecer cuando se deformen por la aplicación de una fuerza. Esta es una gran limitante al modelar los campos de desplazamiento y tensión de un problema real. Otra desventaja es que los elementos de primer orden no se adaptan bien al modelado de geometrías curvas.



Figura N° 7: Elementos tridimensionales de primer orden: a) Tetraedro, b) Hexaedro

Los elementos sólidos de segundo orden no son más que elementos de primer orden con nodos en la mitad de sus lados, incrementándose la precisión computacional. En estos elementos, las aristas y caras de los elementos pueden sufrir deformaciones por la acción de una fuerza y asumir formas curvas (Figura N° 8), por esta razón son los que más se adaptan para el modelado de geometrías complejas.



Figura N° 8: Elementos tridimensionales de segundo orden: a) Tetraedro, b) Hexaedro

Los dos tipos aptos para ser usados en este estudio por la naturaleza de la geometría y el objetivo del análisis son los elementos tetraédricos sólidos de primer orden y los de segundo orden.

### **2.7.6. Paquete ANSYS CFX ®**

Uno de los paquetes de análisis y simulación ingenieriles más utilizados en el mundo es la desarrollada por la empresa norteamericana ANSYS, cuyo *software* está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y el Método de Volúmenes Finitos basado en Elementos para fluidos. Este último método permite el uso de mallas desestructuradas.

El ANSYS-CFX es un código CFD (dinámica de fluidos computacional, por sus siglas en inglés) de amplio espectro de aplicación. En las últimas versiones se han incluido diversas mejoras, como el tratamiento de la superficie libre, que facilitan su uso en el campo naval. Una de las grandes ventajas de este programa es la versatilidad y capacidad de adecuación al usuario mediante la posibilidad de programación de funciones por parte del propio usuario. No obstante, el código CFX pone a disposición multitud de funciones entre las que es posible elegir. Por ejemplo, hay disponibles más de 16 modelos de turbulencia, entre los que se incluyen los más comunes, como k- $\epsilon$ , k- $\omega$ , SMC, DES y LES.

Es de particular interés la inclusión del modelo “*Shear Stress Transport*” (SST) que, con requerimientos computacionales equivalentes al modelo k- $\epsilon$ , es mucho más preciso, fundamentalmente en situaciones en las que ocurre separación del fluido. Este modelo de turbulencia fue formulado en 1993 por Menter para aplicaciones ingenieriles. Consiste en un sistema de dos ecuaciones de viscosidad turbulenta que combina la formulación del modelo k- $\omega$  para las zonas internas de la capa límite y la formulación k- $\epsilon$  para la zona de corriente libre (Rumsey, 2013). De esta manera, el modelo SST puede ser utilizado como un modelo de turbulencia para bajos números de Reynolds en la zona interna de la capa límite hasta la pared sin necesidad de utilizar funciones adicionales de amortiguamiento; y por otra parte, el SST no es demasiado sensible a las propiedades de turbulencia de flujo libre en la entrada, a diferencia del modelo k- $\omega$  simple.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Al trabajar en el desarrollo de cualquier diseño, es de vital importancia tener de manera bien definida el problema que se necesita resolver, buscando y evaluando las diferentes alternativas para seleccionar la opción que satisfaga la mayor cantidad de necesidades. En un primer paso se realiza un estudio previo a fin de recopilar la información que permita definir el trineo

#### **3.1.ESTUDIO PREVIO PARA EL DISEÑO DEL TRINEO DE APNEA**

Según el reglamento oficial de la AIDA, el trineo utilizado para la práctica de la modalidad de apnea peso variable no puede disponer de elementos de propulsión tales como motores o propulsores. Asimismo, se prohíben también cualquier otro elemento que pudiera contribuir a una flotabilidad excesiva; y cualquier sistema que mantenga sujetos al apneista y al trineo; pues la vinculación debe permitir que el atleta se separe del trineo en cualquier momento.

##### **3.1.1.Consideraciones para el diseño del trineo**

- (a) El trineo debe deslizar en una cuerda guía.
- (b) Debe contar con un sistema de freno que permita al atleta realizar maniobras de compensación cuando lo requiera.
- (c) El trineo debe tener un lugar para acoplar una videocámara que registre el descenso.
- (d) Debe permitir el uso de una monoaleta en caso de que el apneista la requiera.
- (e) El lastre del trineo puede ser del tamaño, forma, número y peso que el atleta decida.
- (f) El dispositivo debe ser fácil de transportar.
- (g) Los materiales del trineo deben ser resistentes a la corrosión.
- (h) El diseño debe ser ergonómico para el atleta y brindar un descenso con las mínimas perturbaciones posibles.

### 3.2. PLANTEAMIENTO DE IDEAS

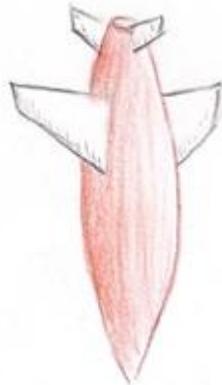
A continuación se detallará cada uno de los diseños extraídos de la tormenta de ideas realizada:

- (a) Idea N°1: Consta de un perfil y un manubrio. En este diseño el atleta descende de cabeza, el perfil adecua el agua y modifica las líneas de corriente para que pasen alrededor del atleta disminuyendo la resistencia. Es pequeño, el manubrio sirve de sujeción para el atleta y está contenido dentro del perfil al igual que los lastres (Figura N° 9).



*Figura N° 9: Idea N°1*

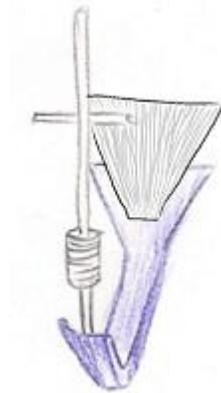
- (b) Idea N°2: Cápsula de forma hidrodinámica, de unas dimensiones adecuadas que permiten al apneista viajar en su interior. Ofrece baja resistencia al arrastre ya que su geometría protege al atleta y los lastres del contacto directo o choque con el agua (Figura N° 10).



*Figura N° 10: Idea N°2*

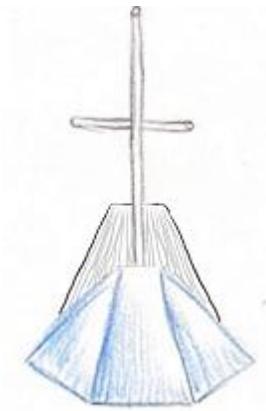
- (c) Idea N°3: Consta de una estructura tubular con un perfil en la parte inferior. La estructura permite la sujeción del atleta al trineo y en esta se acopla el lastre. Este descende con las rodillas flexionada, creando estas un ángulo

ataque agudo con el agua, por lo tanto la monoaleta queda en posición vertical minimizando el arrastre producida por esta (Figura N° 11).



*Figura N° 11: Idea N°3*

- (d) Idea N°4: Consta de una estructura tubular con un perfil en la parte inferior. La estructura permite la sujeción del atleta al trineo y en esta se acopla el lastre. Permite al atleta descender de pie, con una semi-flexión de las rodillas para mantener la monoaleta en posición vertical. Un perfil en V en la parte inferior permite cortar el agua y darle estabilidad a la monoaleta. (Figura N° 12).



*Figura N° 12: Idea N°4*

- (e) Idea N°5: Consta de una estructura tubular con un perfil en la parte inferior. La estructura permite la sujeción del atleta al trineo y en esta se acopla el lastre. Permite al atleta descender en una postura erguida y cómoda, posee un soporte para los pies que une la estructura tubular con el perfil. Este se asimila a la punta de una bala, por lo que adecua el agua y modifica las líneas de corriente para que pasen alrededor del atleta disminuyendo la resistencia (Figura N° 13).



*Figura N° 13: Idea N°5*

### **3.3.CRITERIOS DE SELECCIÓN**

Cada propuesta fue valorada según los criterios de selección con una ponderación entre 1 y 5 puntos, siendo 1 si no cumple el criterio y 5 si lo cumple. A los criterios de selección se les asignó un porcentaje que muestra el nivel de importancia de los requisitos establecidos, luego este se multiplicará por los valores obtenidos. Una vez ponderado cada diseño se suman las puntuaciones para obtener la total, la alternativa que obtenga el mayor puntaje será el mejor concepto-solución a desarrollar. Los criterios del diseño a evaluar son:

- (a) Ergonomía: como aquel que permita al atleta descender en una posición cómoda, con el fin de evitar que este pierda concentración y evitar lesiones musculares.
- (b) Hidrodinámica: el diseño debe presentar una geometría que permita al trineo desplazarse en el agua causando la mínima fuerza de arrastre y sustentación posibles.
- (c) Dimensiones: los componentes del diseño deben tener medidas que posibiliten un fácil traslado por medios de transporte terrestre, marítimo y aéreo.
- (d) Peso: los componentes del diseño deben ser livianos para garantizar su fácil traslado por medios de transporte terrestre, marítimo y aéreo.
- (e) Facilidad de fabricación: se refiere a la manufactura del equipo basado en la rapidez de construcción y con la utilización de pocos recursos materiales.

**3.3.1. Matriz Morfológica**

Aplicando los criterios para los parámetros de selección y ponderándolo de acuerdo a la escala de estimación anteriormente descrita, se evaluaron cada una de las opciones propuestas de una manera objetiva y lógica, con el fin de elegir el diseño que reuniera las características que mejor se ajustaran a las necesidades.

*Tabla N° 2: Matriz morfológica del diseño del trineo*

		PROPUESTAS									
CRITERIOS	%	OPCIÓN 1		OPCIÓN 2		OPCIÓN 3		OPCIÓN 4		OPCIÓN 5	
Ergonomía	25	1	0,25	5	1,25	3	0,75	4	1	4	1
Hidrodinámica	25	4	1	5	1,25	2	0,5	3	0,75	4	1
Dimensión	20	5	1	1	0,2	4	0,8	4	0,8	3	0,6
Peso	20	5	1	1	0,2	4	0,8	4	0,8	3	0,6
Construcción	10	4	0,4	1	0,1	2	0,2	5	0,5	3	0,3
<b>TOTAL</b>	100	19	3,65	13	3	15	3,05	<b>20</b>	<b>3,85</b>	17	3,5

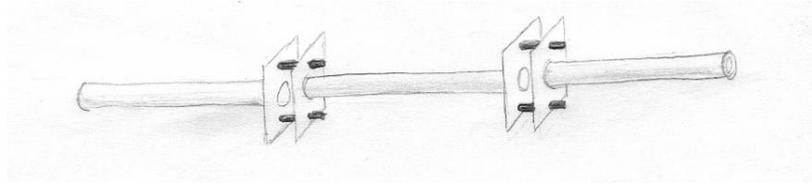
En la Tabla N° 2 se muestran los resultados obtenidos en la matriz morfológica utilizada. De los cinco diseños propuestos, el que obtuvo mayor puntuación es la **opción 4**, ya que es el que mejor se adaptó a los requerimientos del diseño y a las necesidades de los usuarios. Este trineo posee grandes cualidades como la ergonomía y facilidad de transporte y de fabricación.

**3.3.2 Selección del diseño de la estructura**

Como esta opción contempla una estructura principal tubular, de aproximadamente 2,5 m de largo (altura del atleta más la altura de la monoaleta), se debe plantear una solución a fin de cumplir el objetivo de que los componentes no midan más de 1 m de largo y de esta forma garantizar el fácil traslado del equipo.

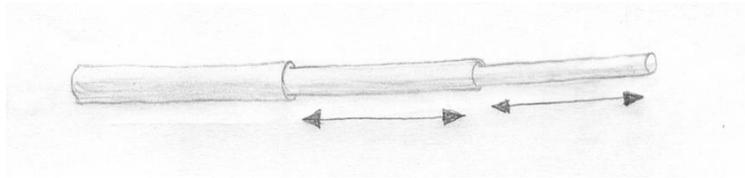
Las ideas que surgen para hacer a la estructura compacta son:

- a) Sistema ensamblable, estructura tubular dividida en tres partes y que cada una tenga en sus extremos una placa que permita apertarla a la del siguiente tubo (Figura N° 14)



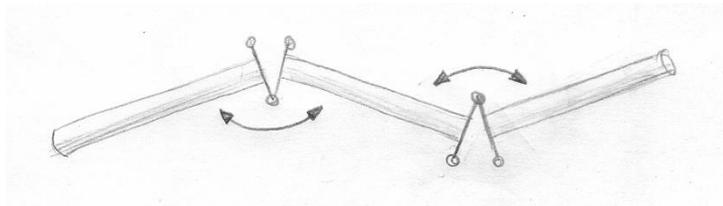
*Figura N° 14: Estructura ensamblable*

- b) Sistema telescópico, estructura tubular dividida en tres partes, el diámetro externo de un tubo desliza sobre el diámetro interno de otro tubo (Figura N° 15).



*Figura N° 15: Estructura telescópica*

- c) Sistema de bisagra, estructura tubular dividida en tres partes, cada una conectada con la siguiente a través de una bisagra (Figura N° 16).



*Figura N° 16: Estructura plegable*

La opción elegida es el sistema de bisagra ya que ofrece la ventaja de que el sistema sea plegable para su traslado, sin necesidad de separar los componentes por completo, se puede volver a armar rápidamente y una vez que se trabe, la estructura puede llegar a ser sólida si se diseña adecuadamente.

Los lastres deben ser fáciles de acoplar y desacoplar de la estructura principal, una vez colocados se debe garantizar su sujeción a fin de evitar que puedan caer y golpear al atleta o algún otro componente frágil como el perfil y perderlos en el mar. Por lo que para el diseño se tomó como referencia los discos de pesos que emplean las distintas máquinas de fricción y desgaste, cuya geometría permite que sean apilables a la vez que garantizan la sujeción al elemento principal siempre y cuando

se inserten rotadas entre ellas. En la Figura N° 17 puede verse un ejemplo de estas pesas.



*Figura N° 17: Pesas de máquina de fricción y desgaste*

#### **3.3.3. Selección del material para el perfil del trineo**

Debido a que el perfil hidrodinámico es la pieza con mayor volumen de los componentes que integran el trineo de apnea, se descarta el utilizar aleaciones metálicas, como por ejemplo láminas de aluminio para su elaboración por el peso considerable que este representa (en función de las dimensiones del diseño), además de que el perfil presenta una geometría difícil de recrear en este material.

Por lo que las opciones a considerar son el uso de polímeros plásticos, fibra de vidrio o fibra de carbono. Si bien, el plástico es uno de los materiales más utilizados en la actualidad para la elaboración de numerosos objetos utilizados en el día a día, su empleo para elaborar el perfil es equívoco ya que se debe construir una matriz o molde metálico y contar con un máquina de inyección de plástico, por lo que el costo será elevado y es solo factible para una producción en masa.

Por otro lado, las piezas elaboradas en fibra de vidrio y de carbono suponen procesos muy similares, se debe elaborar un molde que puede ser muy primitivo o muy elaborado según la cantidad de piezas que se requiera reproducir, se puede o no utilizar una bomba de vacío para la extracción del aire y dispersión uniforme de la resina. Sin embargo, el costo de la fibra de carbono es mucho más elevado y podrá

necesitarse de un horno autoclave para alcanzar los valores óptimos de resistencia para el material. Por esta razón, el material seleccionado para la elaboración del perfil es la fibra de vidrio.

#### **3.3.4. Selección del material para la estructura principal del trineo**

La selección los materiales de los componentes que constituyen el trineo se hizo tomando en cuenta aspectos como: (a) El desempeño con respecto a los requerimientos físicos y mecánicos; (b) su resistencia al ambiente marino; (c) disponibilidad en el mercado

Las piezas y componentes del trineo estarán sometidos a diversas sollicitaciones mecánicas durante su uso, por lo que el dimensionamiento de los elementos y la selección de los materiales es importante para garantizar la resistencia e integridad del trineo.

En principio las cargas a las cual va a estar sometida la parte estructural del trineo será el peso del atleta, el lastre, y el peso de la estructura misma, estimando las magnitudes de estas cargas en 76 kg para el atleta, un peso máximo en lastre de unos 25 kg y teniendo en cuenta la consideración de que la estructura no deberá pesar más de 10 kg, se tiene que a lo sumo, la carga máxima será de unos 111 kg, por otro lado, el perfil soportará las fuerzas de arrastre producidas por el choque del agua. Las magnitudes calculadas de estas fuerzas se muestran en el Capítulo IV.

El trineo para la práctica de apnea operará en un ambiente altamente corrosivo por estar en contacto directo con el agua marina, por esta razón, sus componentes deben tener propiedades anticorrosivas.

Para el material de los componentes estructurales del trineo de apnea, se ha seleccionado el aluminio. Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en este proyecto de ingeniería, tales como su baja densidad (pesa casi tres veces menos que el acero ordinario) y su alta resistencia a la corrosión. Es blando y maleable, por lo cual se mecaniza con facilidad. El aluminio 6063 O es una de las aleaciones de aluminio con menor límite elástico (50 MPa), aun así, las cargas

presentes en la operación del trineo son de magnitudes tolerables para este material siempre y cuando su dimensionamiento sea el correcto.

### **3.3.5. Selección de la tornillería para el trineo**

La tornillería a emplear es de acero inoxidable. Si bien, la unión entre dos metales disimiles crea una corrosión galvánica por contacto, en donde resulta la disolución del electrodo anódico (aluminio), mientras que el cátodo permanece inalterable (acero), no se contempla el uso de tornillos de aluminio debido a la ductilidad que presentan los mismos.

Un pequeño ánodo con un cátodo grande produce una corriente de elevada densidad y acelera la corrosión en el ánodo, como el caso presente es el contrario, la corrosión se dará de forma menos desfavorable.

### **3.3.6. Selección del sistema de freno para el trineo**

Para garantizar mayor seguridad al atleta que practique esta disciplina es necesario que el trineo cuente con un sistema de frenado confiable. En su descenso el atleta necesita reducir su velocidad para poder realizar maniobras de compensación o incluso la detención total del equipo en situaciones de emergencia.

Es necesario que el mecanismo de frenado sea intuitivo y de fácil accionamiento, este sistema debe tener un tiempo de repuesta breve y bajo ninguna circunstancia de su uso debe fallar ya que pone en riesgo la vida y la salud del atleta, particularmente debido a la narcosis que pueden desarrollar los apneistas cuando alcanzan profundidades muy grandes.

Los sistemas de freno más comunes utilizados en trineos para la práctica de apnea son los accionados por perilla y los activados por palanca, ambos son de accionamiento mecánico y reduce la velocidad del trineo mediante la fricción de una mordaza con la cuerda.

Según la experiencia del atleta Carlos Coste (entrevista personal, noviembre 2012), el mecanismo de perilla demanda mayor concentración del atleta y su tiempo

### CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

de repuesta suele ser lento, mientras que el mecanismo de palanca se activa con un solo movimiento y la frenada puede ser gradual según la fuerza que se aplique.

Debido a los pocos recursos disponibles y al corto lapso de tiempo con que se cuenta para el desarrollo de este trabajo, se realizó una extensa evaluación sobre mecanismos de frenos existentes en el mercado y admisibles para el trineo, y se tomó la decisión de emplear frenos para cuerdas de embarcaciones y veleros, ya que estos cumplen con las características requeridas para el trineo: por ser de palanca es fácil de accionar y la frenada es gradual, está diseñado para trabajar en ambientes marinos y el sistema es confiable y de buen desempeño ya que es fabricado por empresas especializada en el ramo.

La empresa SPINLOCK, cuenta con más de treinta años de experiencia en diseño y fabricación de equipos náuticos relacionados con cabos para embarcaciones, y en sistemas de frenos para sogas ofrece una variedad de modelos que se adaptan según los diámetros de la cuerda y la carga que esta debe soportar. Teniendo en cuenta que la línea de descenso a utilizar en el trineo tiene un diámetro de 11 mm y que el peso máximo sistema es de 111 kg, a través de la gráfica proporcionada por el fabricante (Figura N° 18), obtenemos que el modelo XAS0612 es la opción que mejor se ajusta a los requerimientos del trineo.

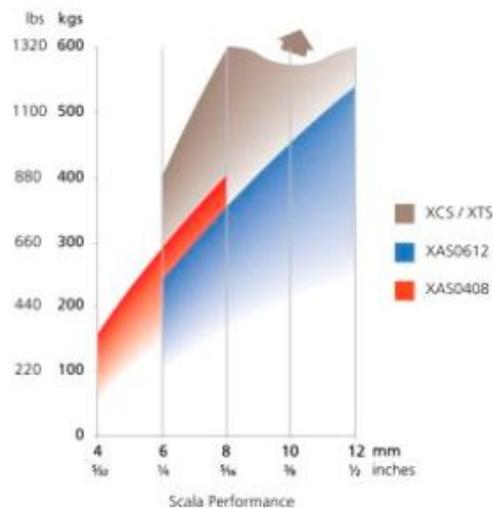


Figura N° 18: Curva de carga vs diámetro de cuerda que soporta el freno (SPINLOCK)

### 3.3.7. Selección del diámetro del tubo de la estructura

El diámetro del tubo se selecciona en función del diámetro de la cuerda guía a utilizar que es de 11 mm. Las dimensiones comerciales para tubos de aluminio se muestra en la tabla N°3.

*Tabla N° 3: Dimensiones comerciales de tubos de aluminio*

<b>D<sub>ext</sub> (pulg)</b>	<b>D<sub>ext</sub> (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>D<sub>int</sub> (pulg)</b>
3/8	9,525	1,3	6,925
1/2	12,7	1,3	10,1
5/8	15,875	2	11,875
3/4	19,05	2	15,05
7/8	22,225	2,6	17,025
1	25,4	2,6	20,2

Los tubos de 5/8 hasta de 3/4 pulg tiene un diámetro interno mayor al diámetro de la cuerda pero con poca holgura para que esta se deslice en su interior, el tubo con diámetro de 7/8 pulg (22,225mm) deja aproximadamente una holgura de 3 mm a cada lado de la cuerda garantizando un libre deslizamiento. Por esta razón se seleccionó este tubo como primera opción para los análisis.

La selección de la barra o tocho de aluminio se realizó en base a las dimensiones del mecanismo de freno, teniendo este último un ancho de 39 mm (Ver anexo 1), se seleccionó un tocho de sección cuadrada de 50,8 mm x 50,8 mm (medida comercial 2 pulg x 2 pulg). Este mismo tocho se empleó también para el resto de los componentes, tales como las bisagras, a fin de estandarizar las dimensiones.

### 3.4. MODELADO GEOMÉTRICO

Se empleó un programa CAD para realizar el modelado geométrico del diseño según la idea ganadora del Capítulo III.

#### 3.4.1. Modelado de la estructura principal del trineo

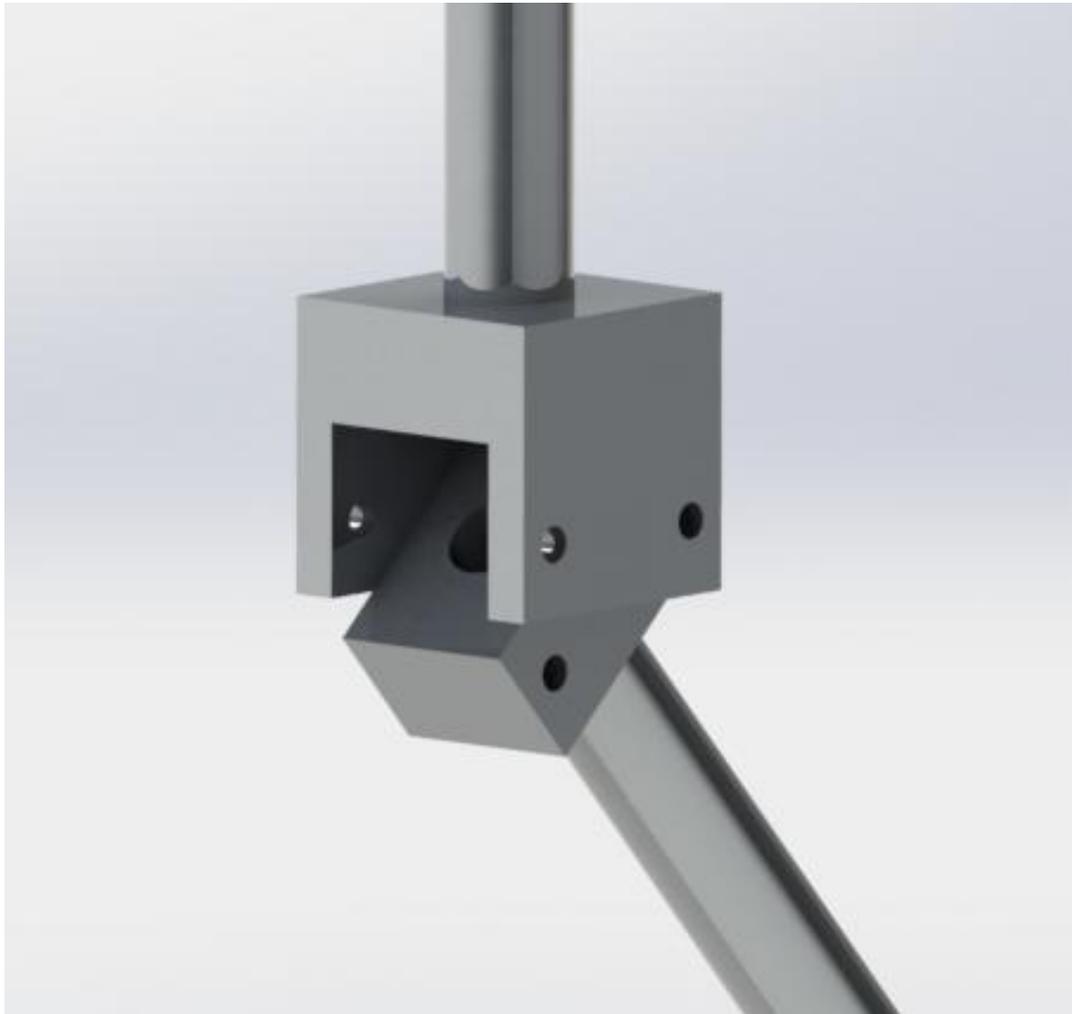
La estructura principal es de forma tubular, esta debe permitir el acople del sistema de freno, la sujeción del atleta, de los lastres y del perfil y de la cámara, además ser plegable para cumplir con los objetivos del diseño. Como es necesario insertar el sistema de freno en un tramo de la estructura principal, se diseñó un

alojamiento para el mecanismo de frenado y que sirve además para colocar uno de los sistemas de bisagra en este punto de unión. El modelado de la estructura se realizó con medidas de tubos y tochos de aluminio seleccionados previamente y puede verse en la Figura N° 19.



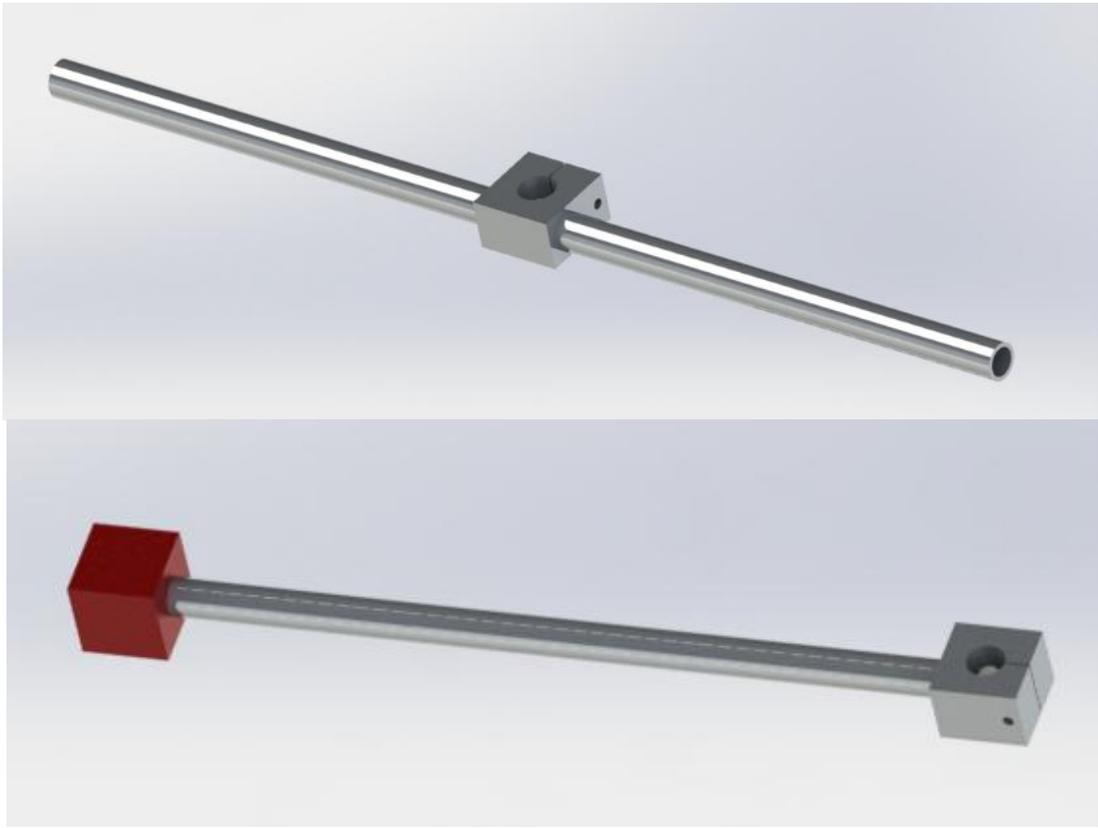
*Figura N° 19: Modelado geométrico del alojamiento del freno*

De igual forma se procedió para el diseño del otro sistema de bisagra, ubicándolo a una distancia que garantice un amplio rango de ajuste de posicionamiento de los componentes del trineo y que a su vez cumpla con el requerimiento de los componentes no excedan 1m de longitud cuando la estructura esté plegada. En la Figura N° 20 puede verse el modelado geométrico del sistema de bisagra inferior.



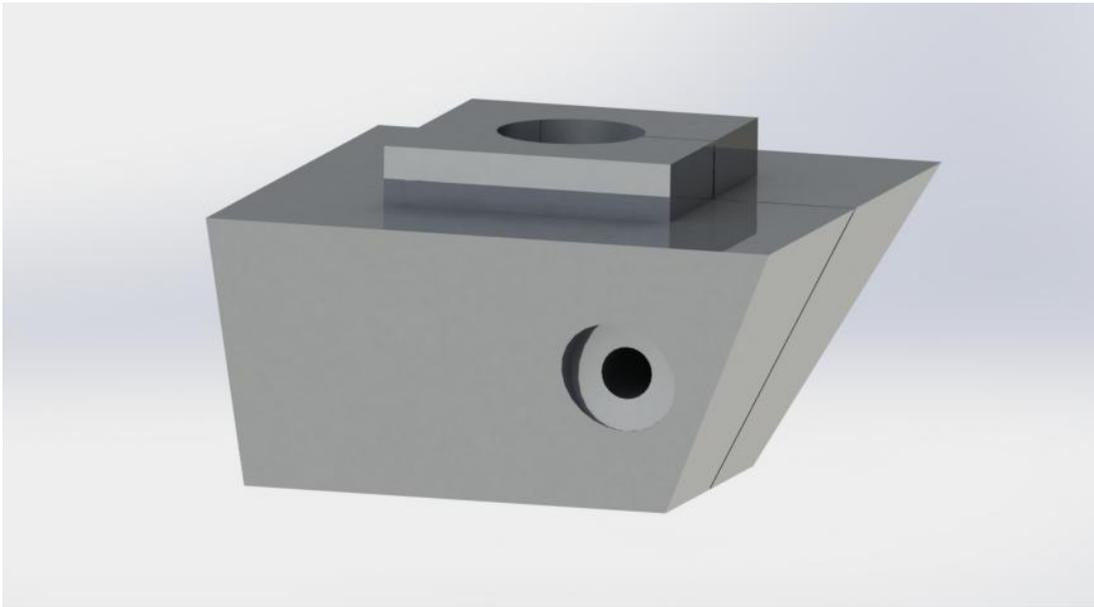
*Figura N° 20: Modelado geométrico del sistema de bisagra inferior*

Para la sujeción del atleta se dispone de una barra perpendicular a la estructura principal y que su altura puede ajustarse a través de un sistema de abrazadera para permitir diversas formas de agarre. De igual manera se procedió para el diseño del agarre de la cámara. En la Figura N° 21 se aprecia el modelado de estos 2 componentes.



*Figura N° 21: Modelado geométrico del agarre lateral y del brazo de la cámara*

Para anclar el perfil a la estructura principal se requiere de una pieza auxiliar, por lo que se diseñó un agarre de perfil que, además de ser ajustable en altura mediante un sistema de abrazadera, sirva de soporte a los lastres. Tiene forma de pirámide truncada invertida a fin de seguir el principio hidrodinámico modificando las líneas de corriente alrededor de los lastres. En la Figura N° 22 se muestra el modelado geométrico de esta pieza.

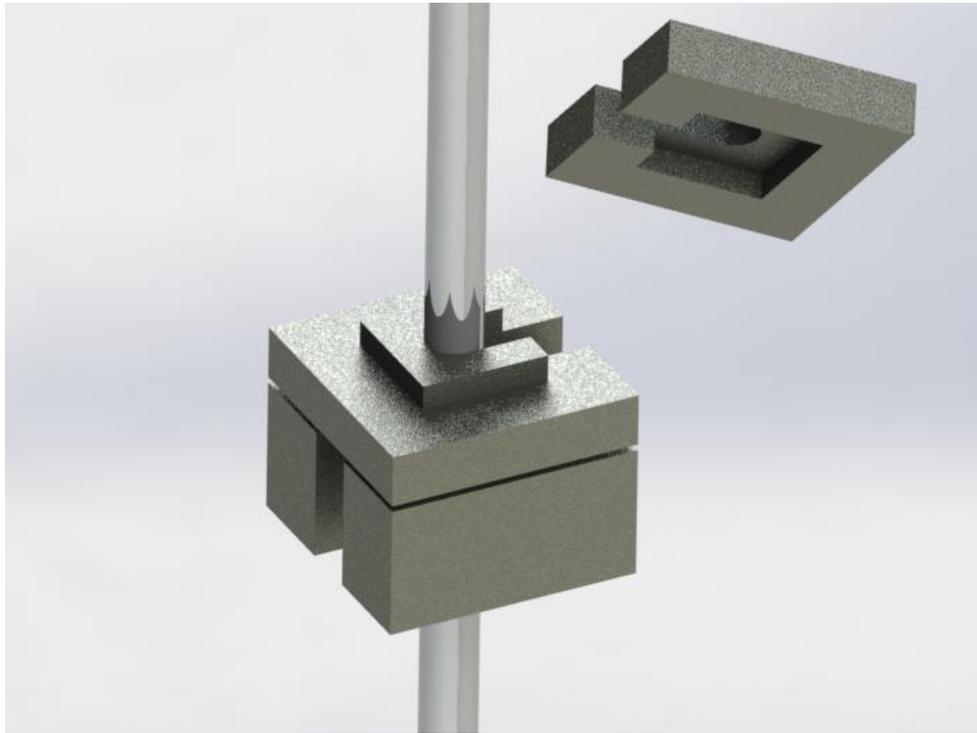


*Figura N° 22: Modelado geométrico del anclaje del perfil*

#### **3.4.2. Modelado de los lastres**

Para el diseño se tomó como referencia los pesos que emplean las distintas máquinas de fricción y desgaste, pero con geometría cuadrada ya que esta se adapta al soporte de lastre previamente diseñado, además de permitir su colocación sobre otras secciones del trineo como las bisagras en caso de requerir distribuir la carga. El material a utilizar es el plomo por su elevada densidad, y para que pueda ser manipulado con facilidad se tomó en cuenta que la masa no sobrepase los 5 kg, pudiendo ajustar con también con valores menores.

Cuentan con una guía que permite deslizarlo sobre el tubo principal, una cavidad en la parte inferior y una saliente en la cara superior que permite que el sistema sea apilable, y para asegurar la sujeción a la estructura los mismo deben ser colocados rotados 90°, 180° o 270° con respecto al anterior. En la Figura N° 23 se aprecia el modelado geométrico de los lastres acoplados a la estructura principal.

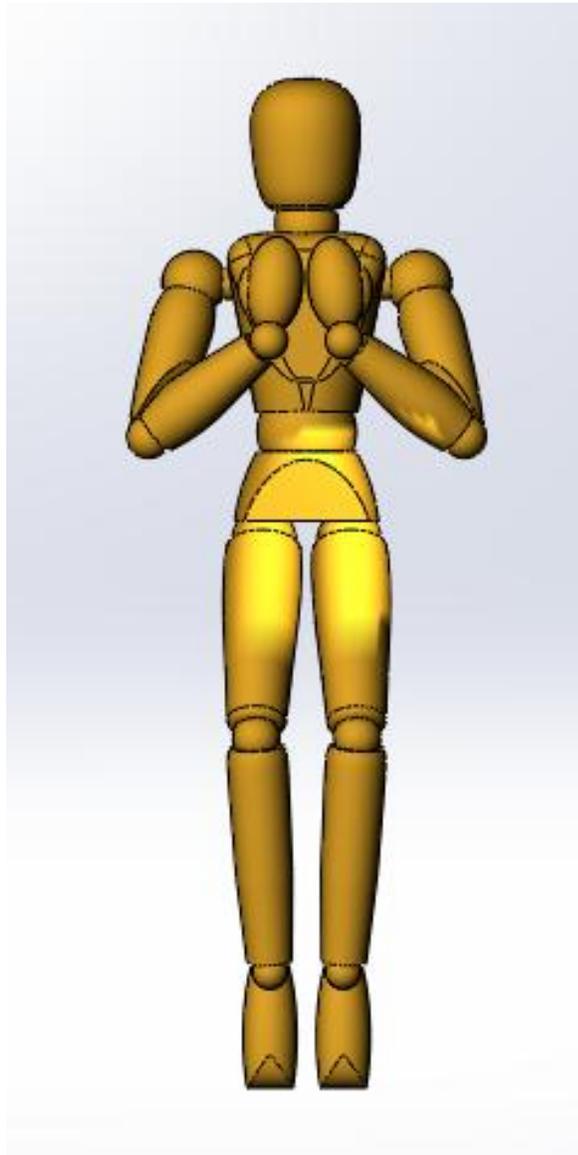


*Figura N° 23: Modelado geométrico de los lastres apilables*

#### **3.4.3. Modelado del cuerpo humano**

El atleta desciende sujetado a la zona posterior de la estructura metálica del trineo en una posición erguida, con las rodillas ligeramente flexionadas, manteniendo la monoaleta en posición vertical. Esta posición permite reducir tanto el ángulo interno del perfil como el área frontal de choque de todo el conjunto con el agua y reducir así el arrastre. Por otra parte también permite mantener el centro de masa cercano y en una línea paralela al cabo guía de descenso, para no generar grandes momentos en los planos XY, YZ.

Para el modelado del cuerpo humano se trabajó con la dimensiones de una persona promedio, tratando de mantener las proporciones de todo el cuerpo pero simplificando la geometría, es decir, suprimiendo aquellos detalles del cuerpo que no aporten información en la simulación y que puedan consumir un mayor tiempo computacional en la etapa de mallado y análisis. El modelo utilizado puede verse en la Figura N° 24.



*Figura N° 24: Modelado del cuerpo humano*

#### **3.4.4. Modelado de la monoaleta y perfil del trineo**

Para la geometría de la monoaleta se tomó como referencia las medidas del modelo Glide para apnea, fabricada por la empresa de equipos para deportes acuáticos WATERWAY, con las simplificaciones de aquellos detalles que no son significativos para la simulación fluidodinámica. El modelado de la monoaleta y la monoaleta real pueden verse en la Figura N° 25.

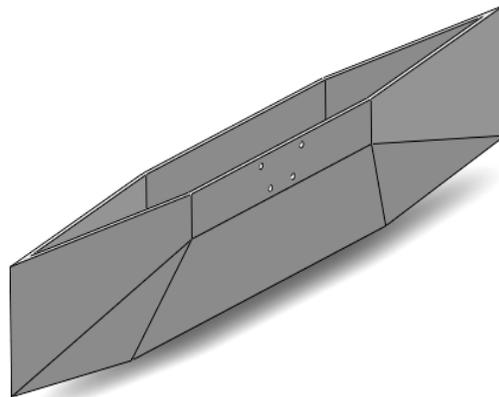


*Figura N° 22: Modelado de monoaleta (izquierda) y monoaleta real (derecha)*

#### **3.4.5. Modelado de los perfiles**

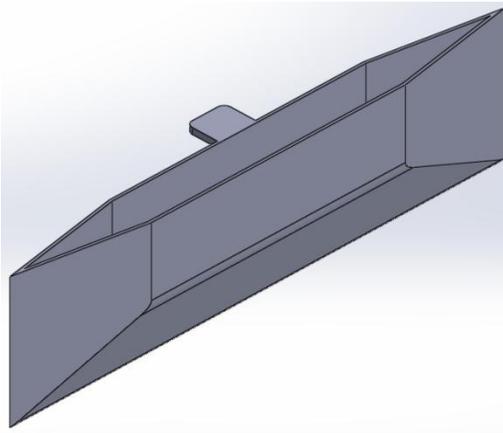
Se modelaron 5 geometrías distintas del perfil para realizar comparaciones fluidodinámicas, El diseño se realizó teniendo en cuenta que la monoaleta pueda entrar y salir del mismo sin ninguna dificultad y siguiendo el concepto de la idea ganadora. En las Figuras N° 23, 24, 25, 26, 27 y 28 pueden verse estos modelados.

- (a) Perfil A de caras planas de  $33^\circ$  entre el intradós y el extradós. 17,5 cm de altura. Aristas redondeadas. Área frontal de contacto (del perfil solo):  $0,14 \text{ m}^2$ .



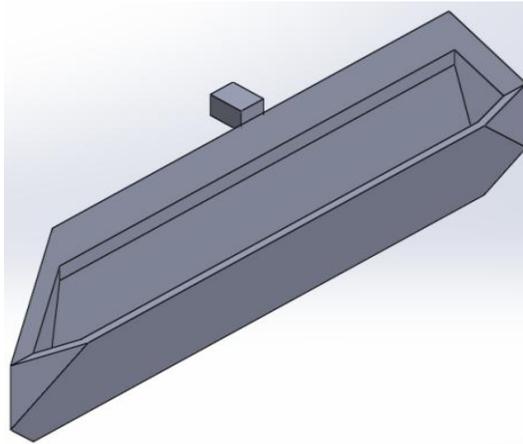
*Figura N° 23: Modelado del perfil A*

- (b) Perfil B de caras planas de  $30^\circ$  entre el intradós y el extradós. 22 cm de altura. Aristas redondeadas. Área frontal de contacto del perfil:  $0,1042 \text{ m}^2$ .



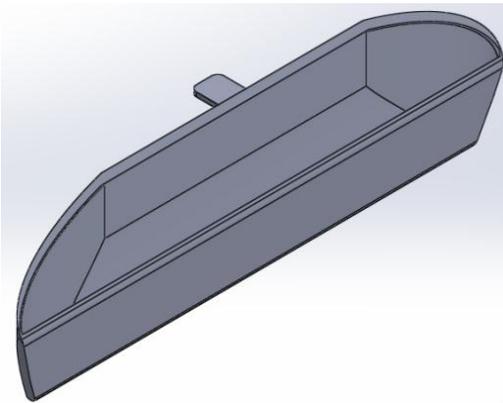
*Figura N° 24: Modelado del perfil B*

- (c) Perfil C de caras planas de  $20^\circ$  entre el intradós y el extradós. Altura asimétrica (29 cm en la cara frontal y 14 cm en la posterior). Aristas filosas. Área frontal de contacto del perfil:  $0,2407 \text{ m}^2$ .



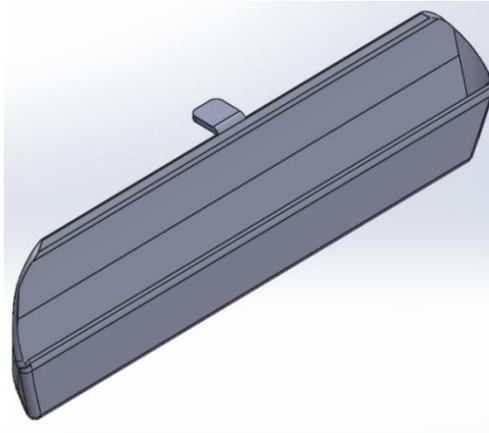
*Figura N° 25: Modelado del perfil C*

- (d) Perfil D de caras planas y curvas de  $18^\circ$  entre el intradós y el extradós. Altura asimétrica (27 cm en la cara frontal y 12 cm en la posterior). Aristas redondeadas. Área frontal de contacto del perfil:  $0,1623 \text{ m}^2$ .

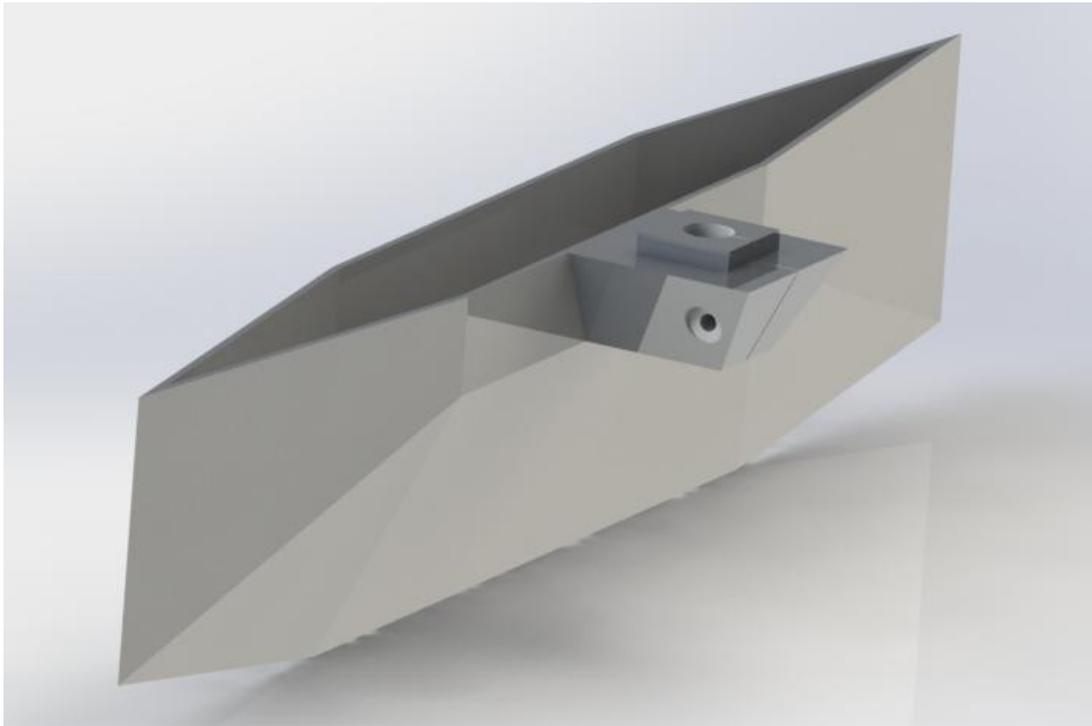


*Figura N° 26: Modelado del perfil D*

- (e) Perfil E de caras planas y curvas de  $13^\circ$  entre el intradós y el extradós. Altura asimétrica (21 cm en la cara frontal y 9 cm en la posterior). Aristas redondeadas. Área frontal de contacto del perfil:  $0,2185 \text{ m}^2$ .



*Figura N° 27: Modelado del perfil E*



*Figura N° 28: Ensamble del perfil A con su soporte*

El modelado del ensamble completo puede apreciarse en la Figura N° 29



*Figura N° 29: Ensamble del modelo geométrico (vista frontal y lateral)*

### 3.5. SIMULACIONES COMPUTACIONALES

#### 3.5.1 Simplificaciones realizadas para las simulaciones computacionales

A lo largo de todo el estudio realizado en este proyecto se establecieron algunas simplificaciones que reducen significativamente la complejidad del problema sin afectar a ninguno de los resultados del estudio:

- (a) Se asume que el fluido de trabajo es incompresible, es decir, que incluso bajo la presencia de presión la cantidad de volumen y la cantidad de masa de una partícula de fluido permanecerán constantes a medida que ella se desplaza. Se

puede considerar un flujo incompresible si su velocidad es menor a aproximadamente la tercera parte de la velocidad del sonido, cuyo valor medio para agua salada es de 1500 m/s (García, Nava y Sánchez, 2011). Este criterio está basado en el número de Mach,  $M$ , descrito por la Ecuación 17:

**Ec. (17):** 
$$M = V/c$$

Donde  $V$  es la velocidad del flujo en el fluido y  $c$  es la velocidad del sonido en el fluido. Si  $M < 0,3$  el flujo se considera incompresible (Potter y Wiggert, 2002). En el caso de estudio de este proyecto, se cumple esta consideración puesto que  $V$  oscila entre 1 y 2 m/s, por lo que  $M \approx 0,001 \ll 0,3$ .

- (b) La viscosidad cinemática del fluido es la correspondiente al agua salada y se ha considerado de valor constante ya que la variación de la cantidad de sal no es suficientemente significativa para alterar el valor de la viscosidad.
- (c) Se supone el fluido incidente como estacionario (permanente), con lo que se asume que la velocidad en un punto del flujo es constante con el tiempo. Ello significa que se trabajó con un perfil de velocidades plano. Este aspecto no es influyente porque el modelo de turbulencia seleccionado valida cualquier perfil de velocidades.
- (d) Se simularon el trineo, el perfil y el cuerpo humano como cuerpos rígidos, debido a las características del programa de simulación empleado.
- (e) El fluido en el que trabajará el trineo es agua. Concretamente agua de mar, y en latitudes tropicales.
- (f) Tal como se dijo en el Capítulo II, para latitudes tropicales, la temperatura del agua submarina se puede estimar en 25°C desde la superficie hasta una profundidad de 150 m, donde aparece la termoclina de 15°C. Por lo tanto, durante la mayor parte del tiempo de uso del trineo la temperatura media del ambiente circundante puede considerarse estable alrededor de 25°C.
- (g) La viscosidad cinemática depende de la temperatura y de la cantidad de sal que contenga el agua de mar. Para una salinidad media de 35 gramos por kilogramo de agua y una temperatura de 25°C, se asume un valor de  $9,3 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s para la viscosidad cinemática (Anadón y Fernández, s.f.). Este es el valor seleccionado en este estudio.
- (h) El valor de la densidad del agua marina se relaciona de manera inversamente proporcional con la temperatura; y directamente proporcional con la salinidad. Para este estudio se considera una densidad constante  $\rho = 1,027$  Kg/m<sup>3</sup>
- (i) Para calcular los números de Reynolds se utilizó como longitud característica el área proyectada del conjunto (atleta y trineo) sobre un plano normal a la dirección del flujo entre el perímetro mojado. El área proyectada se simplificó como un rectángulo de  $0,35 \cdot 0,75$  m<sup>2</sup>, y el perímetro mojado ( $0,35 \cdot 2$  m +  $0,75 \cdot 2$  m) todo el perímetro del rectángulo, por tratarse de un cuerpo inmerso. Este parámetro se asume de esta manera haciendo una analogía con el radio hidráulico usado en el cálculo de flujo en canales naturales, para los cuales se hace difícil definir una longitud característica debido a su sección transversal irregular. De modo similar, para el cálculo del coeficiente de sustentación se

asumió el área proyectada sobre un plano paralelo a la dirección del flujo como un rectángulo de  $2 \times 0,5 \text{ m}^2$ .

### **3.5.2. Simulaciones fluidodinámicas**

Las simulaciones fluidodinámicas fueron realizadas con el paquete ANSYS 14.0 ®, utilizando el *Solver CFX* ® (ANSYS Academic Research, licensed to UCV: Central University of Venezuela). Se realizaron diversos análisis, variando algunos parámetros en la geometría de los perfiles con el fin de comparar los comportamientos hidrodinámicos de cada uno para luego determinar la geometría que mejor se ajusta al resto de los criterios del diseño.

La región de fluido analizado se modeló como un cilindro de radio 5 m, altura 25 m por encima del conjunto (atleta, trineo y perfil) y 5 m por debajo. Estas medidas se tomaron en base a las recomendaciones de la guía de referencia oficial de ANSYS CFX ®(2012) de modelar el volumen de control con las dimensiones aproximadas de 5h de ancho, 10h aguas arriba del objeto de estudio y 2h aguas abajo, donde h es la dimensión (anchura, altura o longitud) de mayor valor del cuerpo de estudio. En el caso de este estudio es la altura del conjunto la dimensión de mayor valor, con aproximadamente 2,5 m.

#### **3.5.2.1. Mallado en ANSYS *Meshing* ®**

El tipo de elementos que utiliza ANSYS *Meshing* ® por defecto para los análisis de CFX ® es el tetraédrico. No se recomienda utilizar elementos hexaédricos por considerarse que la distancia entre nodos y la forma en este tipo de elementos no permite una adaptación adecuada sobre la geometría.

Se procedió a optimizar las mallas tetraédricas aplicando métodos de refinamiento manual (*Refinement*) en las zonas de interés, y así cumplieron plenamente con los criterios de convergencia.

Se utilizó un centro de relevancia fino con relevancia máxima (100), lo cual aumenta la densidad del mallado en el volumen, mejorando la convergencia de las ecuaciones. Para definir el rango de tamaños de elementos y las tasas de crecimiento

### CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

se activó la opción *Sizing* utilizando el método *Proximity and Curvature*, el cual permite la adaptación de los elementos para las cercanías de los bordes de la geometría con ángulos rectos y también con curvas. El tamaño mínimo de cara de los elementos utilizado fue de 0,005 m en las mallas más refinadas. El ángulo de separación entre elementos se redujo a 5° para estas mallas. En las demás mallas, se usó el valor por defecto de estos parámetros.

En las mallas tetraédricas se activó la opción *Inflation*, utilizando el método *First layer thickness* (espesor de la primera capa). Este método permite reducir el espesor o distancia de las paredes del objeto (en este caso el perfil del trineo) al centro del elemento finito adyacente, con el fin de obtener mejores resultados para el análisis de la capa límite en las zonas de interés. Se utilizó un espesor de 0,004 m.

El tiempo promedio de mallado para las mallas tetraédricas fue de 1 hora aproximadamente. En la Figura N° 30 se pueden observar las características de la malla.

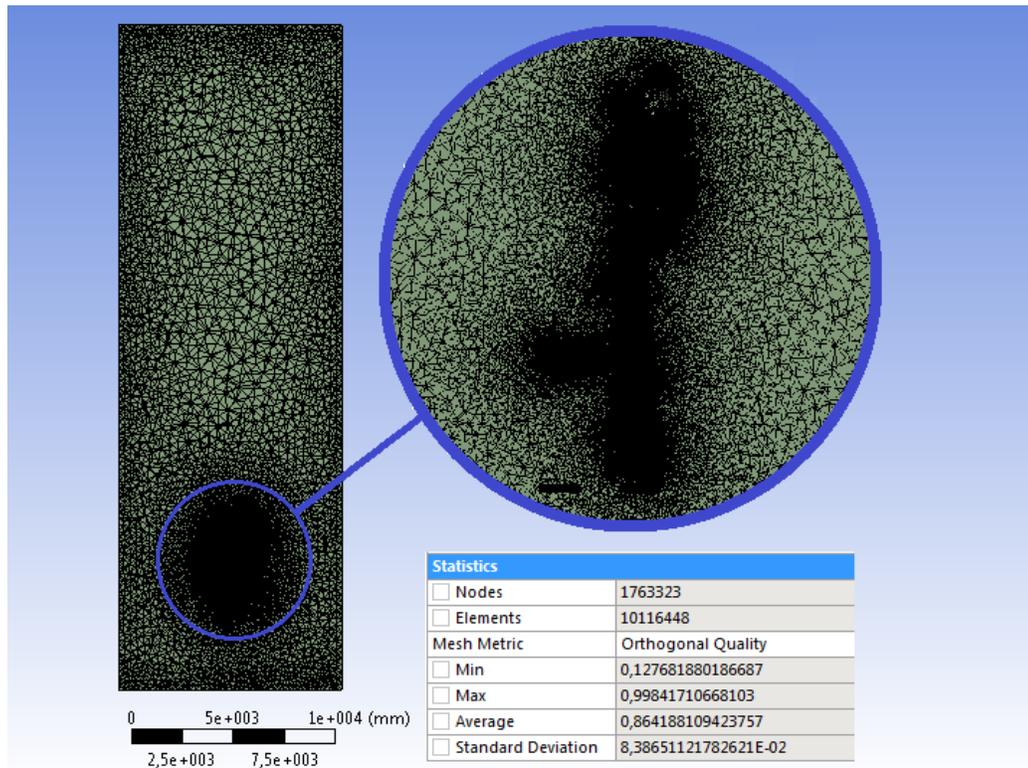
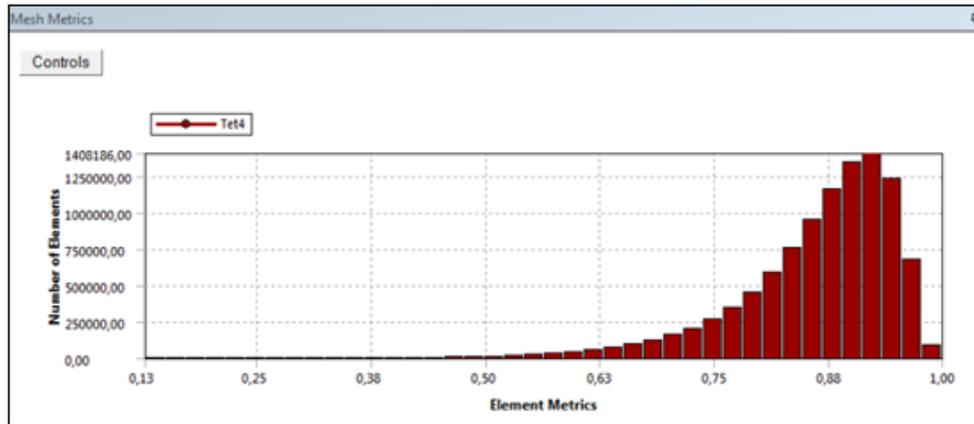


Figura N° 30: Información de la malla y refinamiento alrededor de la geometría

Se empleó el criterio de evaluación de la malla de “calidad ortogonal” que incluye el software para la validación de la misma. Según la guía oficial de ANSYS *Meshing*®, a medida que la calidad ortogonal promedio se acerca al valor unitario la confiabilidad de la malla se incrementa notablemente. En las Figuras N° 31 puede apreciarse que la malla empleada tiene una calidad ortogonal promedio cercano a la unidad (0,86), lo cual implica una confiabilidad buena de los resultados.



Calidad Ortogonal de la malla					
Inaceptable	Mala	Aceptable	Buena	Muy Buena	Excelente
0-0,001	0,001-0,14	0,15-0,20	0,20-0,69	0,7-0,95	0,95-1,00

Figura N° 31: Estadísticas de calidad ortogonal de la malla

### 3.5.2.2. Condiciones de contorno en ANSYS CFX Setup®

Se establecieron como data la velocidad de entrada (*Inlet*) y la presión a la salida (*Outlet*). La velocidad normal de entrada fue fijada en 1,5 m/s para la mayoría de las simulaciones, exceptuando aquellas en las que se quería hallar el valor de la fuerza de arrastre a otras velocidades. El promedio de la presión estática a la salida como el producto de la densidad del agua marina por la profundidad por la gravedad. El valor de la gravedad está predeterminado como 9,8 m/s<sup>2</sup> en el programa, mientras que el valor de la densidad del agua salada se tomó como 1027 kg/m<sup>3</sup> y el de la profundidad como 150 m para la mayoría de las simulaciones, a excepción de aquellas en las cuales se quería calcularlas fuerzas sobre el cuerpo a 80 m. Al valor del producto de la densidad por la profundidad por la gravedad se le suma

automáticamente el valor de la presión referencial (1 atm) para obtener la presión absoluta. También se fijó como data la temperatura del fluido en 25°C.

Las paredes del volumen de control se fijaron como paredes con resbalamiento libre, mientras que las paredes del objeto de estudio (atleta, trineo y perfil) se fijaron como paredes sin resbalamiento. El resbalamiento libre define que las paredes no son rugosas, es decir, el mismo fluido continúa alrededor del volumen simulado. Las paredes sin resbalamiento mantienen la velocidad establecida en las paredes del objeto.

El modelo de turbulencia seleccionado es el de *Shear Stress Transport*, pues resuelve de manera eficiente las condiciones de turbulencia en zonas cercanas a las paredes y también en la región de flujo desarrollado, como se explicó previamente.

Para alcanzar la convergencia se estableció que los resultados válidos de cada ecuación serían aquellos donde la raíz media cuadrática del error entre dos iteraciones sucesivas fuese igual o inferior a  $1 \cdot 10^{-3}$ . Por otra parte, el número de iteraciones se fijó en 150, en caso de no alcanzar la convergencia.

Puede apreciarse en la Figura N° 32, que la convergencia se alcanza rápidamente, y los valores se estabilizan ya alrededor de las 40 iteraciones.

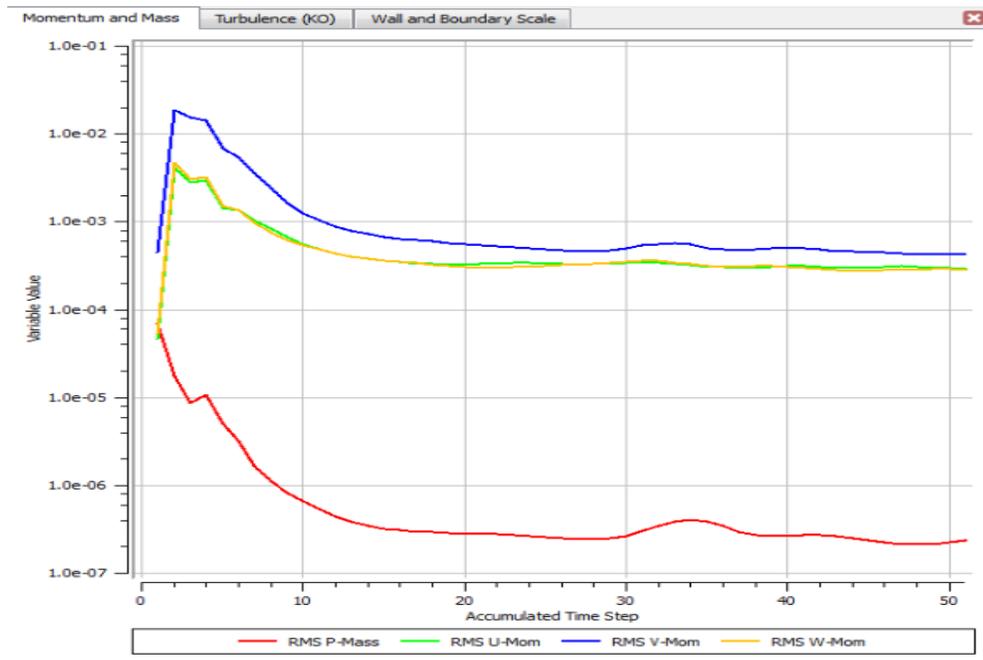


Figura N° 32: Convergencia de la malla

### **3.6.2.3. Resultados en ANSYS CFX *Results* ®**

Los resultados para cada geometría analizada en ANSYS CFX ® pueden visualizarse gráfica o numéricamente o de ambas maneras según como lo permita la variable de interés. Las variables vectoriales que actúan sobre el cuerpo pueden visualizarse mediante una escala de colores en la superficie del mismo, y también puede visualizarse numéricamente el valor promedio de esas variables calculado por el programa. Pueden visualizarse también las líneas de corriente que inciden sobre el objeto de estudio, lo que permite detectar zonas de posible recirculación del flujo de fluido. Estos resultados se muestran en el Capítulo IV.

**CAPÍTULO IV**

**CÁLCULOS Y RESULTADOS**

**4.1.PRESIÓN MÁXIMA**

Debido a que se estima que el trineo será usado hasta una profundidad máxima de 150 m, es conveniente calcular la presión máxima absoluta a la que se vería sometido en esta condición (Ecuación 16).

**Ec. (16):** 
$$P = P_{atm} + \gamma x h$$

Donde P es la presión absoluta [Pa],  $P_{atm}$  la presión atmosférica [Pa],  $\gamma$  es el peso específico del fluido, calculado como la relación entre su peso y su volumen o el producto de su densidad por la gravedad [ $N/m^3$ ] y h la altura del fluido [m].

Para la profundidad de 150 m bajo la superficie del mar se tiene:

$$P[150m] = 1,013 \cdot 10^5 \text{ [kg/ms}^2\text{]} + 1027[\text{kg/m}^3] \cdot 9,8[\text{m/s}^2] \cdot 150[\text{m}] = 1610,9 \text{ kPa}$$

**4.2.RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES FLUIDODINÁMICAS**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones fluidodinámicas realizadas sobre el conjunto (atleta, estructura metálica y perfil), utilizando diversas geometrías para el perfil según el concepto de la idea ganadora.

En las Figuras N° 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32 se muestran los resultados de las simulaciones fluidodinámicas para la geometría del perfil A.

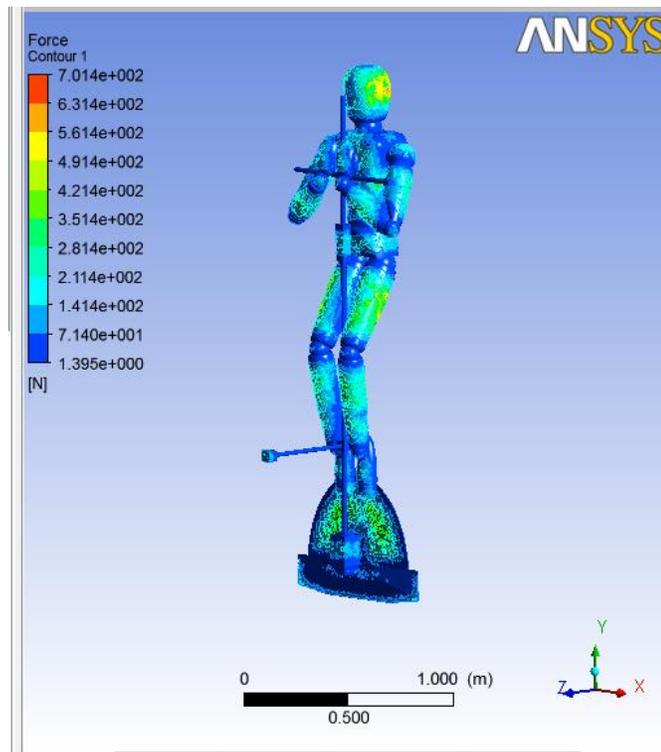


Figura N° 33: Perfil de fuerzas totales sobre la geometría a 150 m de profundidad

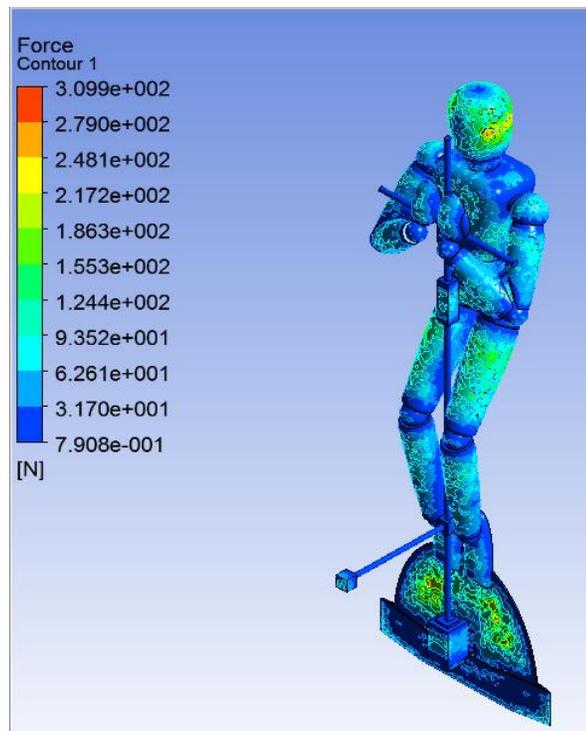


Figura N° 34: Perfil de fuerzas totales sobre la geometría a 80 m de profundidad

## **CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS**

Tal como se mencionó en capítulos previos, la mayoría de los apneistas no llega a profundidades mayores de 80 m en mar abierto. Por otra parte, los que son capaces de superar esa marca no lo hacen en cada entrenamiento. Por lo tanto las fuerzas a las que se vería sometido con mayor frecuencia el trineo serían menores que las obtenidas para la profundidad de 150 m. Por esta razón es conveniente la comparación con los resultados para 80 m de profundidad, distancia a la cual se llegaría con mayor frecuencia.

En las Figuras N° 33 y 34 puede verse que las fuerzas totales máximas que actúan sobre la geometría a 150 m son aproximadamente 701,4 N, mientras que a 80 m alcanzan un valor máximo de 309,9 N. Esta diferencia es lógica pues las fuerzas de presión aumentan de manera proporcional a la profundidad. Puede verse que sobre el trineo (perfil, estructura metálica y lastres) no actúan fuerzas mayores a 211,4 N (a 150 m), y que estos valores se ubican sobre el alojamiento del freno y sobre los lastres, así como en los bordes inferiores del perfil. En los bordes inferiores del perfil es lógico esperar fuerzas más altas que en el resto de sus superficie, pues es sabido que las fuerzas de presión sobre una cuerpo inmerso son máximas en los puntos de estancamiento, y en este caso cabe esperar que los bordes inferiores del perfil sean zonas de estancamiento pues es la región enfrentada al flujo.

Puede observarse en la Figura N° 35 que para una velocidad terminal de 1,5 m/s la fuerza de arrastre que actuaría sobre el conjunto sería de 106,215 N tanto para 150 m y 80 m, esto permite corroborar que la fuerza de arrastre es función de la velocidad y no depende de la profundidad. Este resultado es de gran relevancia para este estudio, pues permite conocer el valor de la fuerza que, además de la del empuje, debe ser vencida por el conjunto (trineo y atleta de volumen promedio) para alcanzar la velocidad terminal de 1,5 m/s que es la velocidad promedio de uso estimada para el trineo. Por lo tanto esta fuerza permite hallar las demás cargas actuantes sobre el trineo y el coeficiente de arrastre de la geometría. Por todo lo anterior este valor es muy usado posteriormente en este Capítulo.

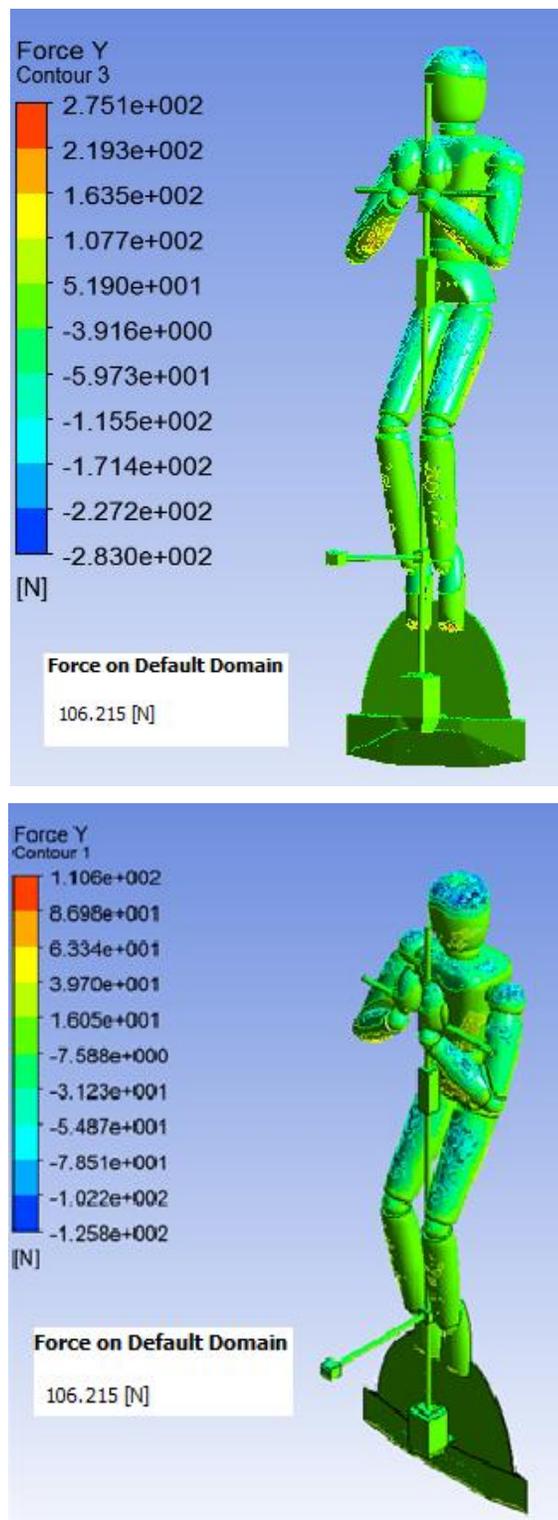


Figura N° 35: Perfil de fuerza de arrastre (eje Y) a una profundidad de 150 m (arriba) y 80 m (abajo)

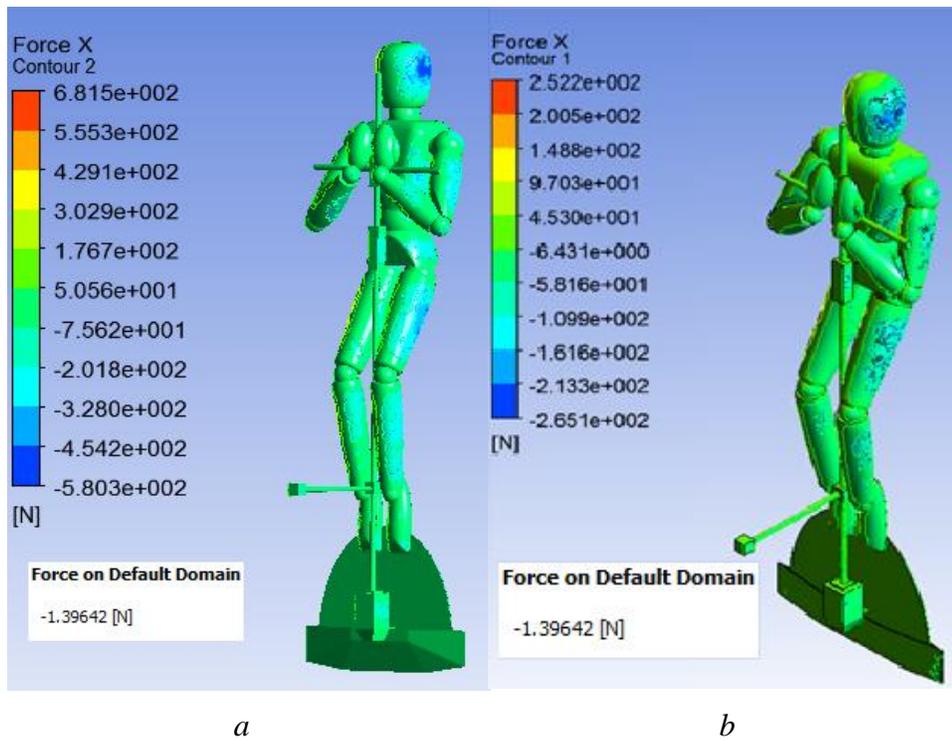


Figura N° 36: Perfil de fuerzas en la dirección del eje X a una profundidad de: a) 150 m b) 80 m

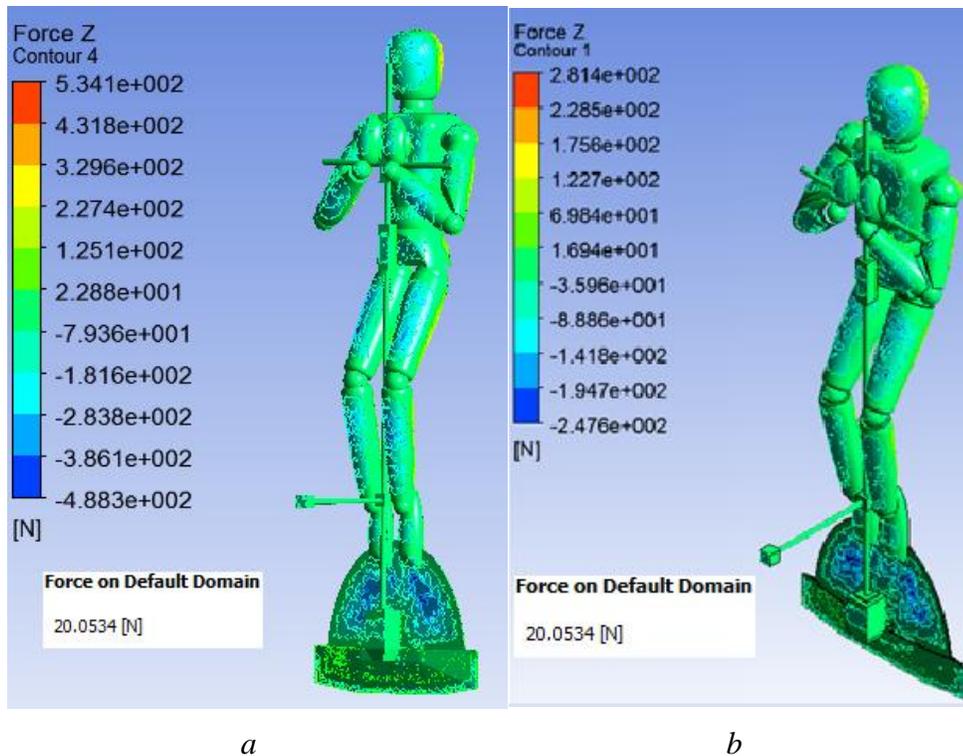


Figura N° 37: Perfil de fuerzas en la dirección del eje Z a una profundidad de: a) 150 m y b) 80 m

## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

En las Figuras N° 36 y 37 puede observarse que las fuerzas actuantes en las direcciones de los ejes X, Z son -1,39 N y 20,05 N respectivamente. Tomando como área proyectada del conjunto (atleta y trineo) sobre un plano paralelo a la dirección del flujo la simplificación descrita en la condición de trabajo del fluido (f); y partiendo de la Ecuación 8 y de los resultados observados en estas imágenes, se tiene que el CL máximo = 0,01735367. El CL mínimo de un perfil aerodinámico convencional es cerca de 11 veces mayor que este valor, según se explicó en el Capítulo II. Por lo tanto, el descenso del atleta con el trineo genera fuerzas despreciables en el plano XZ.

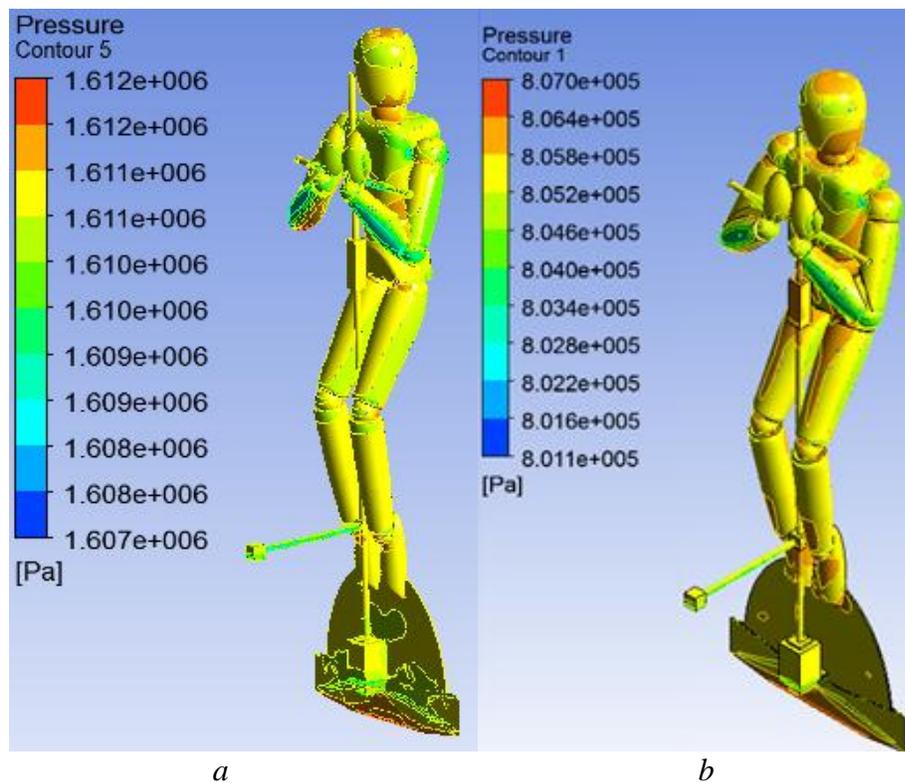


Figura N° 38: Presión absoluta sobre la geometría a: a) 150 m y b) 80 m)

En la Figura N° 38 se observa que la presión absoluta sobre la geometría adquiere los valores esperados para cada profundidad (alrededor de 1600 kPa y 800 kPa para 150 m y 80 m respectivamente), lo cual es una medida sencilla de verificar el adecuado comportamiento del simulador.

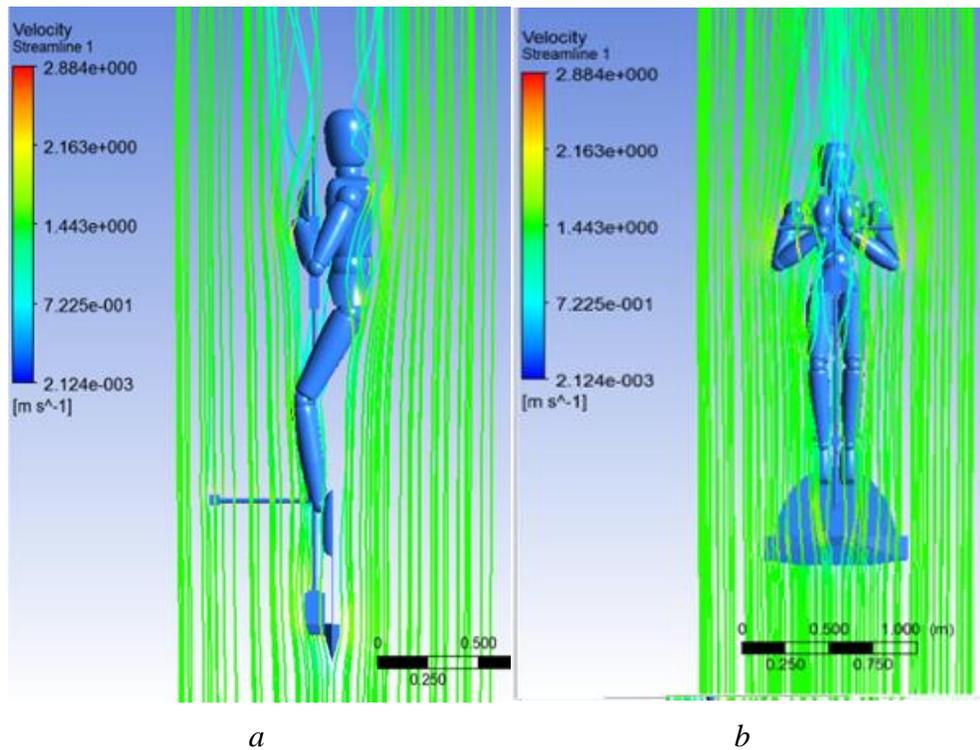


Figura N° 39: Líneas de corriente alrededor del cuerpo: a) vista lateral y b) vista frontal

En la Figura N° 39 se aprecia que el comportamiento del flujo es laminar, tal como se esperaba. Se observa también que las velocidades mínimas se encuentran en los bordes inferiores tanto del perfil como de los brazos y piernas del atleta (velocidades entre 0,002 m/s y 0,7 m/s). Estos valores pueden deberse a un error de aproximación del *software* pues es sabido que los puntos de estancamiento deben tener velocidad nula. No obstante, las regiones de mínima velocidad sí son las que cabía esperar.

Las fuerzas de arrastre que actúan sobre todo el conjunto (atleta y trineo) obtenidas de las simulaciones fluidodinámicas utilizando los perfiles B, C, D y E (ver Figuras N° 24, 25, 26 y 27) se muestran en la Tabla N° 4:

## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

---

Tabla N° 4: Fuerzas de arrastre sobre el conjunto (atleta y trineo) usando diferentes perfiles

Perfil	FD [N]
A	106,215
B	134,814
C	114,399
D	129,794
E	111

De los resultados mostrados en la Tabla N° 4 se observa que el perfil A es el que genera menor fuerza de arrastre sobre el conjunto.

El perfil B genera una mayor fuerza de arrastre que el perfil A, a pesar de poseer una menor área de contacto frontal: 134,814 N. La diferencia porcentual es de 26,41%. El perfil B también es más alto que el A por 4,5 cm, lo cual implica una menor facilidad de transporte. Por lo tanto este perfil queda descartado.

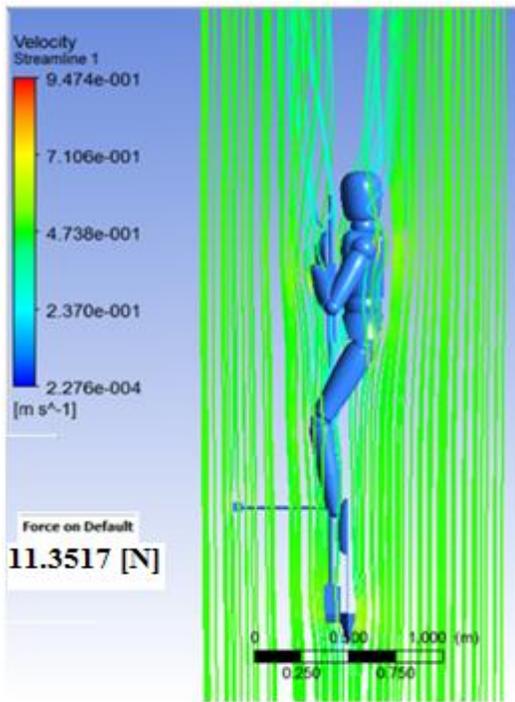
El perfil C también genera una mayor fuerza de arrastre que el perfil A: 114 N sobre el conjunto. La diferencia porcentual es de 7,54%. También se observa que las fuerzas sobre el perfil son mayores en el borde filoso de choque, como cabe esperar debido al cambio abrupto de geometría. Por lo tanto se descartó este perfil y tampoco se analizaron más perfiles con bordes filosos de choque.

El perfil D también fue descartado, ya que genera una fuerza de arrastre mayor a la del perfil A: 129,794 N. La diferencia porcentual es de 22,45%. El área de choque también es mayor en un 15,92%.

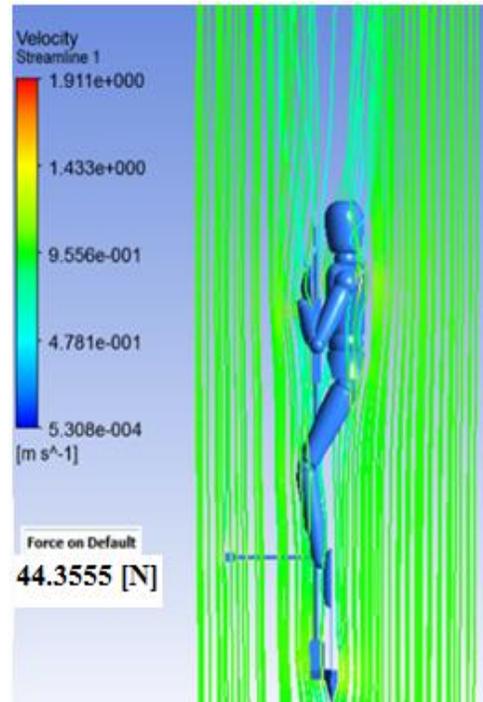
El perfil E genera una fuerza de arrastre 4,7% mayor (111 N) que el perfil A. Comportamientos análogos se observaron para otros perfiles analizados, cuyas diferencias radicaron en el ángulo entre el intradós y el extradós. No obstante, estas geometrías se descartaron posteriormente por consideraciones de diseño: el espacio disponible para introducir la monoaleta era muy reducido (3 cm) y por lo tanto incómodo para su uso.

Por todo lo anterior, el perfil seleccionado es el **perfil A**.

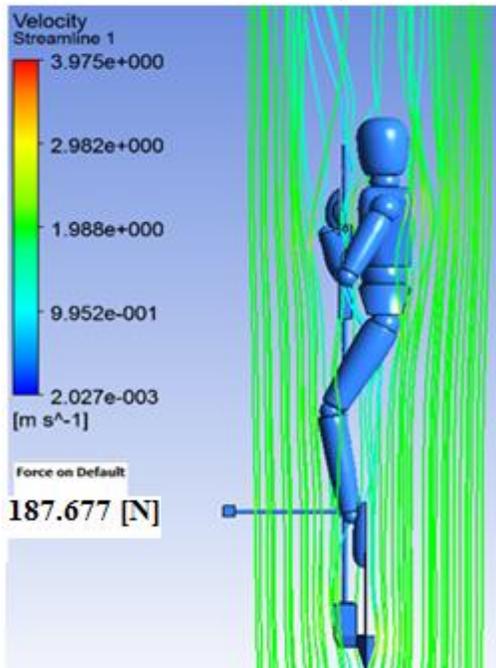
A continuación se presentan los resultados obtenidos para otras velocidades analizadas a 80 m de profundidad, utilizando el perfil A:



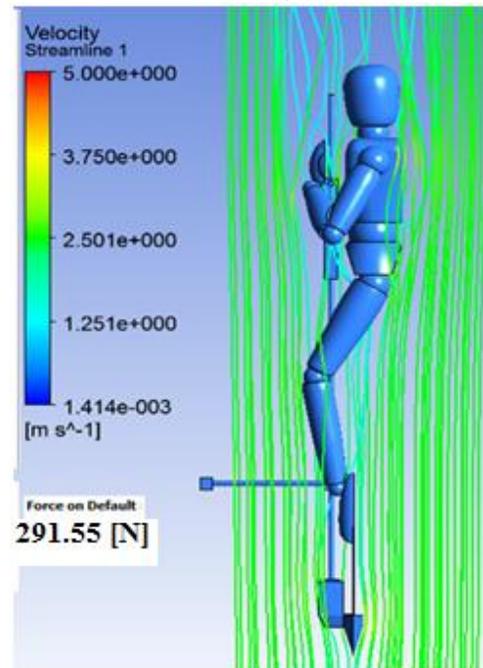
a)



b)



c)



d)

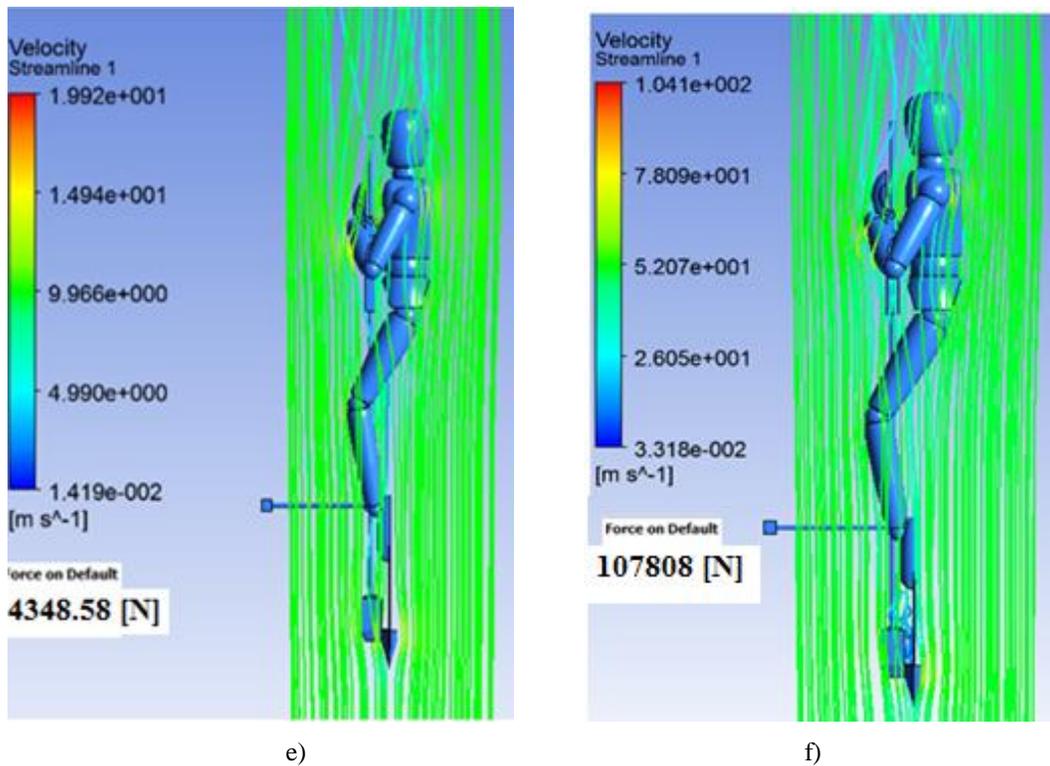


Figura N° 40: Líneas de corriente sobre la geometría y fuerzas de arrastre a diferentes velocidades: a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s, d) 2, m/s, e) 10 m/s f) 50 m/s

En las Figuras N° 39 y 40 se observa que la estela del cuerpo continúa una corta distancia luego de haber sobrepasado la altura total del conjunto para las velocidades entre 0,5 y 2,5 m/s. Ya para la velocidad de 10 m/s las líneas de corriente empiezan a cruzar sus trayectorias alrededor del cuerpo (inicio de estela turbulenta) y para la velocidad de 50 m/s aparece una región considerable de flujo recirculante sobre el perfil. Este hecho revela que para un  $Re = 6,4 \cdot 10^6$  habría un régimen de turbulencia en esta zona de la geometría. Sin embargo, los resultados analíticos de flujos turbulentos siempre son meramente teóricos y requieren la validación experimental.

Tomando como área proyectada del conjunto (atleta y trineo) sobre un plano perpendicular a la dirección del flujo y como longitud característica del Re los parámetros descritos en la simplificación (i); y partiendo de las Ecuaciones 3 y 9, y de las simulaciones para el rango de velocidad establecido (Figuras N° 39 y 40), se hallan los valores reflejados en la Tabla N° 5.

## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

Tabla N° 5: Valores de Re, FD y CD para diversas velocidades del conjunto atleta y trineo

V [m/s]	Re	FD [N]	CD
0,5	65387	11,351	0,327
1	130775	44,355	0,319
1,5	196163	106,215	0,340
2	261551	187,677	0,338
2,5	326939	291,55	0,336
10	1307759	4348	0,313
50	6538796	107808	0,311
<b>Promedio</b>			<b>0,326</b>

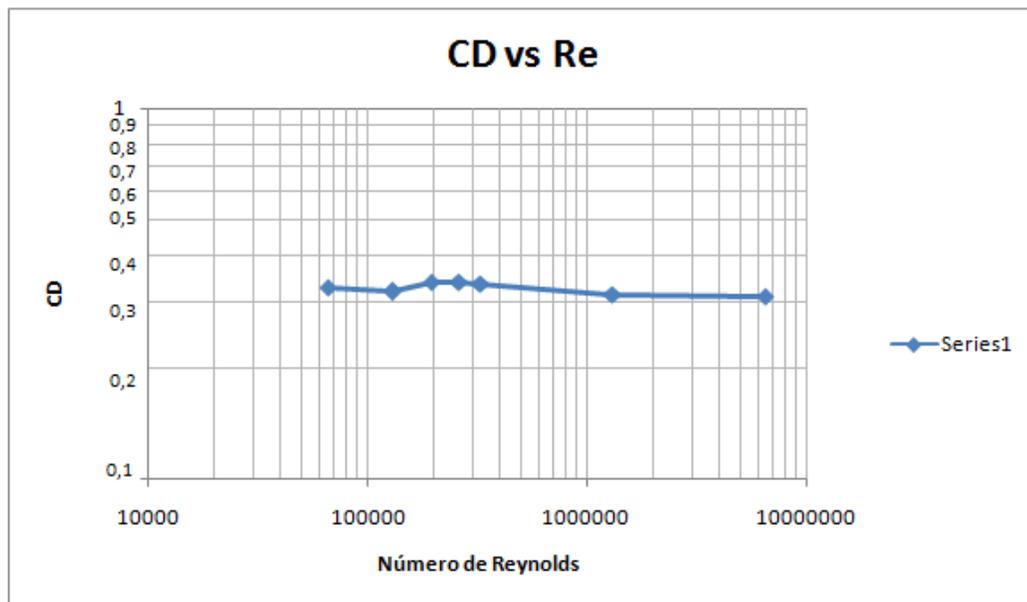


Figura N° 41: Curva de CD vs Re para la geometría seleccionada

A partir de los valores de FD mostrados en la Figura N° 35 y en la Tabla N° 4 se calculó el CD de cada velocidad terminal. Estos valores se muestran en la Tabla N° 5. Luego los CD se graficaron en función del número de Reynolds para cada caso, obteniéndose la curva mostrada en la Figura N° 41. De estos resultados se desprende que el CD promedio de la geometría para un rango de Re comprendido entre  $6,4 \cdot 10^4$  y  $6,4 \cdot 10^6$  es igual a 0,32 con una desviación estándar de 0,012, lo cual implica que el CD se mantiene casi constante en este rango de Re. Al compararse con geometrías conocidas, puede verse que la curva tiene un comportamiento más fluidodinámico

que una esfera lisa para un rango de  $Re$  entre  $6 \cdot 10^4$  y  $2 \cdot 10^5$  (ver Figura N° 5). A partir de este valor de  $Re$  la analogía se pierde pues la esfera disminuye sustancialmente su  $CD$  mientras que el conjunto del atleta con el trineo lo mantiene, llegando a intersectarse ambas curvas antes de  $Re = 3 \cdot 10^5$ .

### 4.3.DISEÑO DE COMPONENTES DEL TRINEO

Para diseñar los componentes del trineo se tomaron como referencia los resultados de las fuerzas de las simulaciones para una velocidad de descenso de 1,5 m/s para un atleta con peso promedio de 76 kg.

#### 4.3.1.Diseño del Perfil

En base a los resultados de la simulación fluidodinámica realizada con ANSYS CFX ® (Figura N° 42) se calculó el dimensionamiento del perfil, exportando las fuerzas obtenidas a otro programa que mediante la teoría de elementos finitos permite calcular esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad de la pieza.

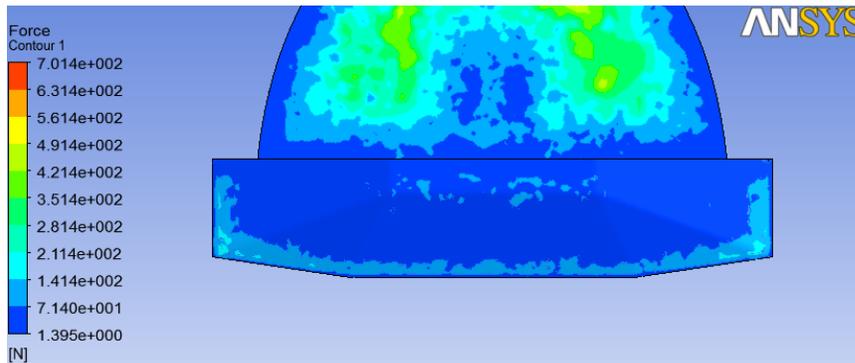


Figura N° 42: Distribución de fuerzas sobre el perfil

Para la simulación se utilizaron las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio (Tabla N° 6) ofrecidas por la empresa constructora de lanchas PROMARINE.

Tabla N° 6: Propiedades de la fibra de vidrio

Propiedades	Valor
Módulo de elasticidad [GPa]	72
Módulo Cortante [GPa]	33
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	2540
Límite de Tracción [GPa]	3,1

### 4.3.1.1. Simulación para un espesor de 4 mm

En las Figuras N° 43, 43 y 45 se muestran los resultados de la simulación para el perfil de 4 mm de espesor.

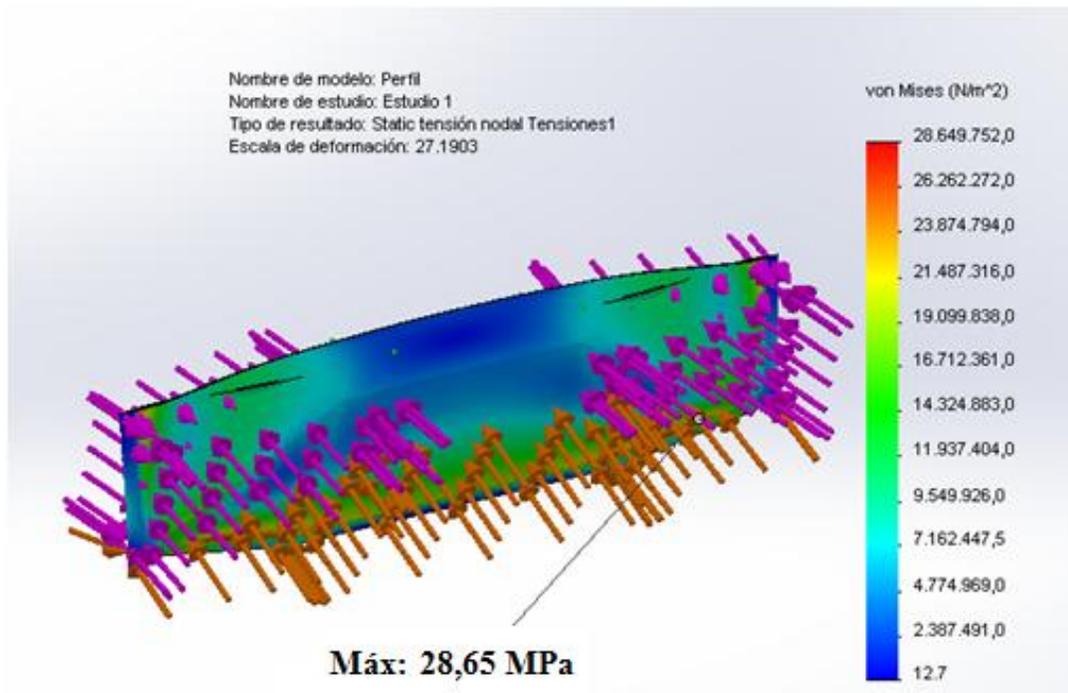


Figura N° 43: Esfuerzo de Von Mises sobre la pieza (4mm)

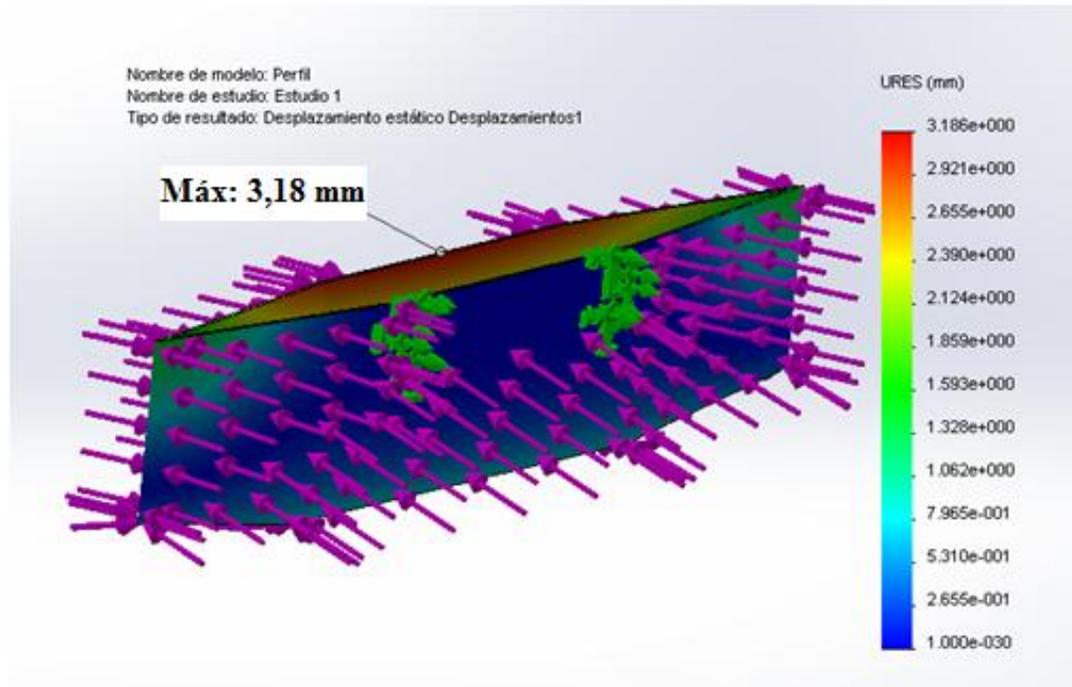


Figura N° 44: Deformación de la pieza (4mm)

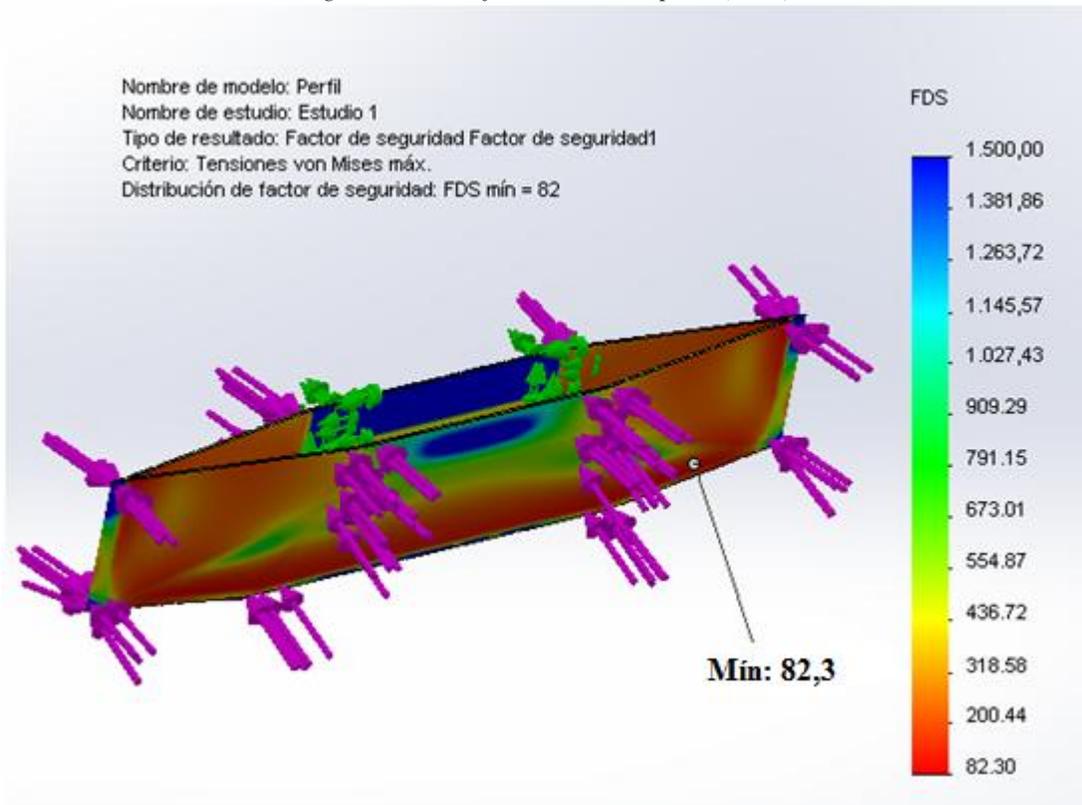
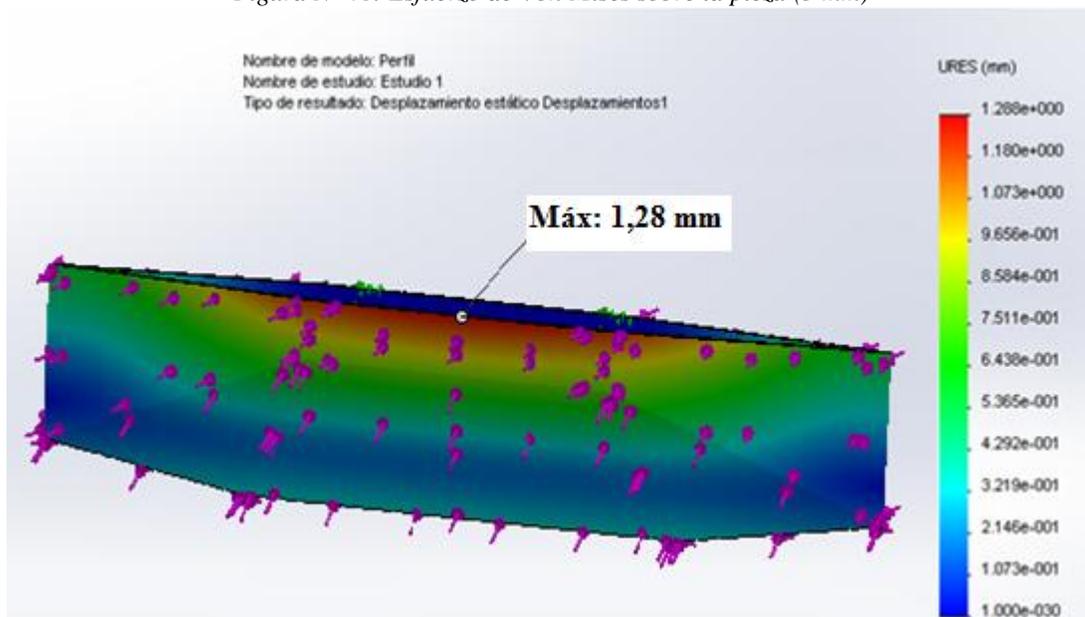
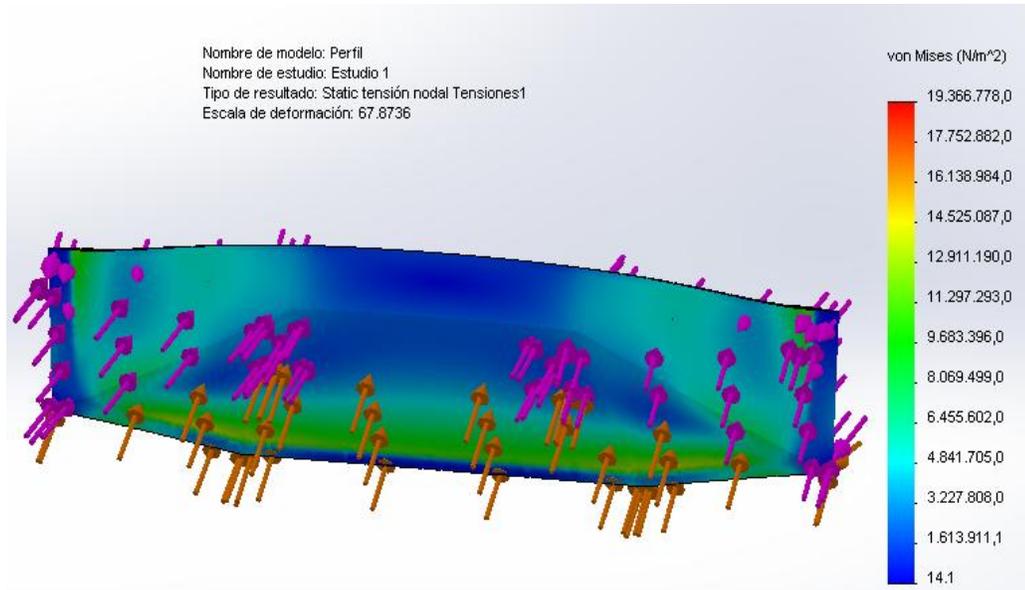


Figura N° 45: Factor de seguridad del perfil (4mm)

## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

Si bien los esfuerzos presentes sobre el perfil no son lo suficientemente altos para generar el fallo de la pieza, se puede observar en la Figura N° 44 que se produce una deformación considerable de 3 mm, por lo que se procedió a aumentar el espesor de la pieza a 5 mm para reducir las deformaciones.

### 4.3.1.2. Simulación para un espesor de 5 mm



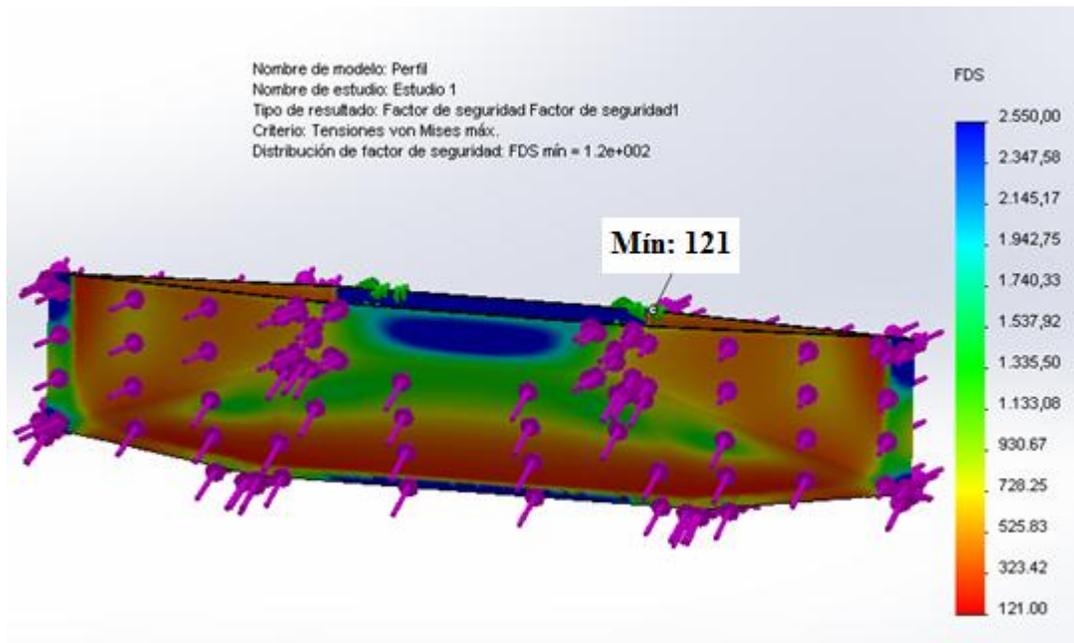


Figura N° 48: Factor de Seguridad de la pieza (5 mm)

Para un espesor del perfil de 5 mm la deformación máxima que sufre la pieza bajo carga es de 1,2 mm (Figura N° 47), este es un valor más aceptable en comparación con el análisis anterior. Los esfuerzos presentes nunca sobrepasan al permisible por el material (Figura N° 46), por lo tanto no hay fallo de la pieza (Figura N° 48). Se estimó que para lograr un espesor de 5 mm serían necesarias 6 capas de fibra, siendo el espesor de cada paño impregnado de resina de aproximadamente 0,84 mm. Conociendo la densidad de la fibra de vidrio (Tabla N° 6), la masa del perfil puede calcularse a través del programa, resultando 2,5 kg.

### 4.3.2. Peso de los componentes del trineo

Conociendo el área  $A$  de la sección transversal de los tubos (ver Ecuación 23), su longitud  $L$  y la densidad  $\rho$  del material ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ), se puede hallar la masa  $m$  [kg] de cada uno de los tubos al sustituir la Ecuación 18 en la Ecuación 19. La masa de las otras piezas de aluminio con geometría más compleja puede obtenerse del

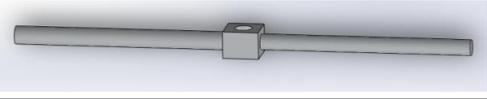
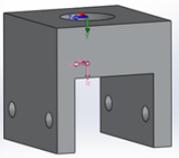
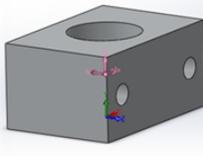
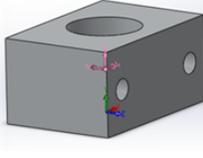
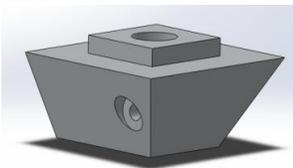
## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

programa de modelado geométrico asistido por computador empleado. En la tabla N° 7 se muestran las masas de cada pieza que conforma el trineo.

**Ec. (18):**  $V = A * L$

**Ec. (19):**  $m = \rho * V$

Tabla N° 7: Masa de los componentes de aluminio calculada por el programa (3,493 kg en total)

Pieza	Longitud [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Masa [Kg]
Tubo Superior	0,5	0,0001656	0,224
Tubo Medio	0,68	0,0001656	0,304
Tubo Inferior	0,88	0,0001656	0,393
Tubo Agarre			0,470
Tubo Cámara			0,450
Alojamiento del Freno			0,413
Bisagra Externa			0,185
Bisagra Interna Superior			0,089
Bisagra Interna Inferior			0,089
Soporte Perfil			0,875
Masa total de componentes de Aluminio			3,493

### 4.3.3. Cálculo de lastre necesario

Una vez realizado el diseño de cada una de las piezas, se procedió a los cálculos de los esfuerzos y de las fuerzas que actúan sobre ellas. Lo principal que se determinó fue el grupo de fuerzas que intervienen en el proceso. Estas fuerzas se estimaron realizando diagramas de cuerpo libre en cada una de las piezas. También se utilizaron simulaciones asistidas por computador para el cálculo de las fuerzas sobre las geometrías más complejas

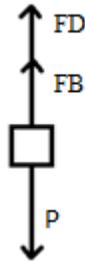


Figura N° 49: DCL del conjunto (atleta y trineo) durante el descenso

En la Figura N° 49 del diagrama de cuerpo libre se pueden apreciar las fuerzas presentes en el trineo durante su operación en descenso. Haciendo sumatoria de fuerzas igual a cero (para un descenso a velocidad constante, cuyo valor sería el de la velocidad terminal puesto que el cuerpo parte del reposo) se tiene la Ecuación 20:

**Ec. (20):** 
$$P = FB + FD$$

Donde P es la sumatoria del peso del trineo, del peso del atleta y el peso del lastre (Ecuación 21), FB es el empuje y FD la fuerza de arrastre [N].

**Ec. (21):** 
$$P = P_{\text{trineo}} + P_{\text{atleta}} + P_{\text{lastre}}$$
$$FB = FB_{\text{trineo}} + FB_{\text{atleta}}$$

Debido a que el empuje depende del volumen de fluido desplazado (Ecuación 2), y la fuerza de arrastre es función de la velocidad del cuerpo (Ecuación 1), el lastre que requiere el trineo depende de la velocidad de descenso deseada y de la masa y volumen del apneista.

Se ha establecido que la densidad promedio del cuerpo humano es de 950 kg/m<sup>3</sup> (Acero, 2013). Aplicando esta propiedad al modelado geométrico del cuerpo humano, se verifica en el *software* que el modelo tiene una masa de 76,037 kg (Figura N° 50), lo cual guarda relación con el peso aproximado de una persona

## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

promedio. El programa también indica el volumen del cuerpo por lo que se puede calcular el empuje o flotabilidad del mismo aplicando la Ecuación 1.

$$FB_{\text{atleta}} = 1027[\text{kg}/\text{m}^3] * 9,81[\text{m}/\text{s}^2] * 0,076[\text{m}^3] = 765,69 \text{ N}$$

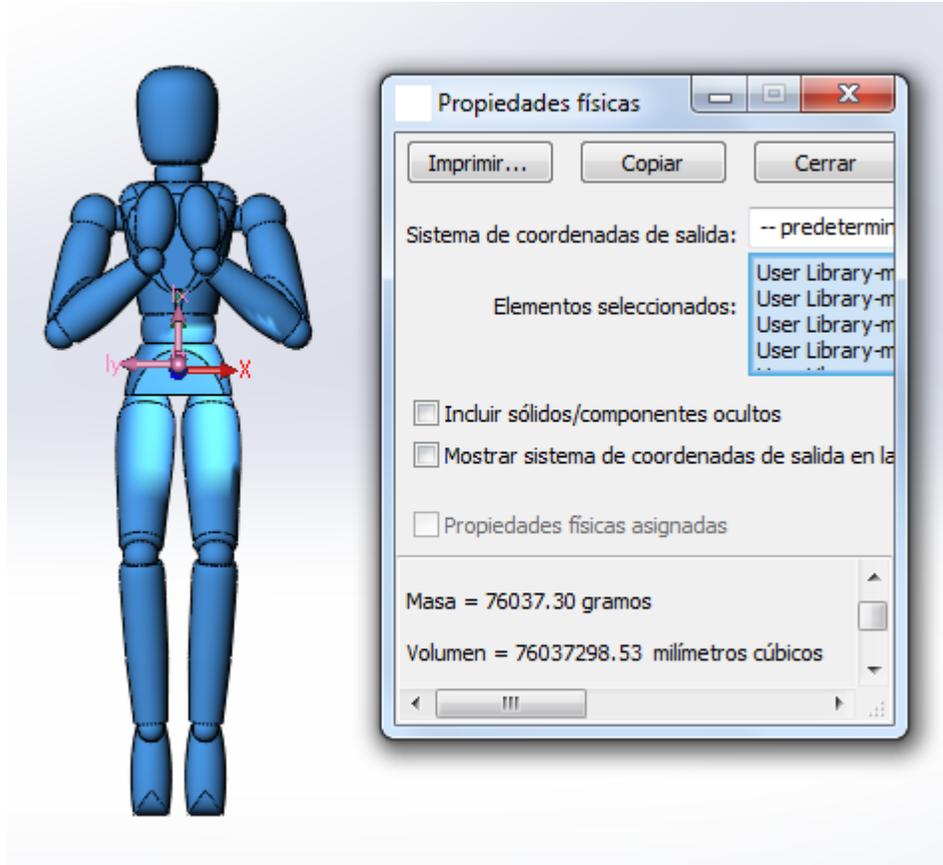


Figura N° 50: Cálculo de la masa de atleta a través del programa (76,037 kg)

De igual forma se procedió para calcular el volumen de todo el conjunto (atleta, trineo y lastre) siendo este volumen igual al del fluido desplazado correspondiente a  $0,0828 \text{ m}^3$  (Figura N° 51).

Sustituyendo los datos en la Ecuación 1 se tiene la fuerza de empuje:

$$FB = 1027[\text{kg}/\text{m}^3] * 9,81[\text{m}/\text{s}^2] * 0,083[\text{m}^3] = 836,214 \text{ N}$$

Sustituyendo este valor, y el de la fuerza de arrastre obtenida de la simulación que puede apreciarse en la Figura N° 26 (106,215 N) y la Ecuación 23 en la Ecuación 22, y despejando, se halla el peso de lastre requerido para el atleta promedio.

$$P_{\text{lastre}} = 836,214[\text{N}] + 106,215[\text{N}] - (76,037[\text{kg}] * 9,81[\text{m/s}^2]) - ((3,5 + 2,5)[\text{kg}] * 9,81[\text{m/s}^2]) = 137,656 \text{ N}$$

Por lo tanto se requiere una masa del lastre de al menos 14 kg.

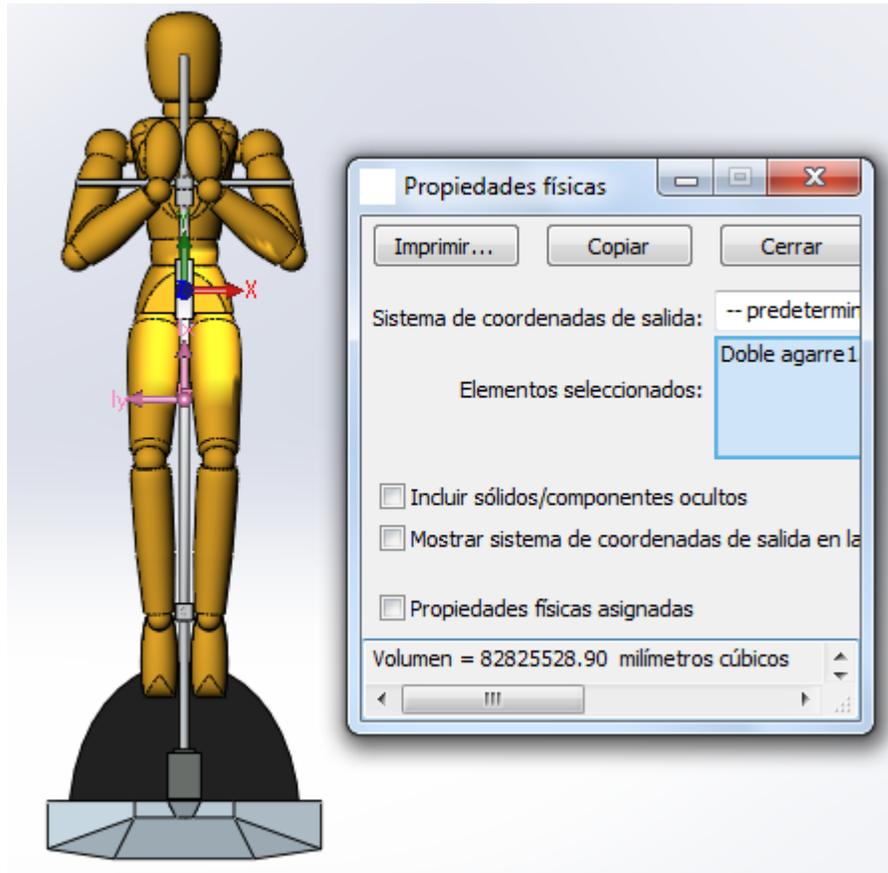


Figura N° 51: Cálculo del volumen desplazado a través del programa

### 4.4. CÁLCULO DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS EN LOS COMPONENTES DEL TRINEO

A fin de que el diseño sea ajustable a los requerimientos del atleta y pueda variar la velocidad de descenso ajustando el lastre, para efectos de cálculos de la estructura y sus componentes se tomó un lastre máximo de 25 Kg.

### 4.4.1. Resistencia a la tracción del tubo

Se estudió el caso más desfavorable, este es el tubo de la sección media de la estructura que al estar accionado el freno ( $F_D = 0$ ) debe soportar el peso de todos los componentes que estén por debajo de este. Debido a que el cuerpo humano tiene flotabilidad positiva (fuerza de empuje mayor que el peso), para efectos de cálculo, no se tomó en cuenta la reacción que el mismo produce sobre el trineo.

$$\text{Ec. (22):} \quad P = (m_{\text{bisagraexterna}} + m_{\text{bisagrainterna}} + m_{\text{tubo inferior}} + m_{\text{soporte perfil}} + m_{\text{perfil}} + m_{\text{lastremáx}}) * g$$

$$P = (0,185[\text{kg}] + 0,089[\text{kg}] + 0,393[\text{kg}] + 0,875[\text{kg}] + 2,5[\text{kg}] + 25[\text{kg}]) * 9,81[\text{m/s}^2] = 284,902 \text{ N}$$

Por ser un tubo de cilíndrico hueco, el área de la sección transversal es:

$$\text{Ec. (23):} \quad A = \pi(d_e^2 - d_i^2)/4$$

Donde  $d_e$  es el diámetro externo y  $d_i$  el diámetro interno [m]

Para un tubo de 7/8 de pulgada (0,022225 m) de diámetro externo con 0,0026 m de espesor de pared se tiene:

$$A = \pi * (0,022225^2[\text{m}^2] - 0,017^2[\text{m}^2])/4 = 1,61 * 10^{-4} [\text{m}^2]$$

Sustituyendo en la Ecuación 11:

$$\sigma = 284,902 \text{ N} / 1,61 * 10^{-4} [\text{m}^2] = 1,77 \text{ MPa}$$

Como el material para el tubo es aluminio 6063 T5 con un esfuerzo de fluencia  $S_y = 147,15 \text{ MPa}$ , el factor de seguridad es:

$$\text{Ec. (24):} \quad F_s = S_y / \sigma$$

$$F_s = 147,15[\text{MPa}] / 177 [\text{MPa}] = 83,14 \text{ No falla}$$

### 4.4.2. Cálculo de las bisagras

La bisagra más solicitada es la inferior, ya que debe soportar el peso del lastre así como del perfil y demás elementos del trineo que estén por debajo de ella, tal como se puede apreciar en la Figura N° 52:

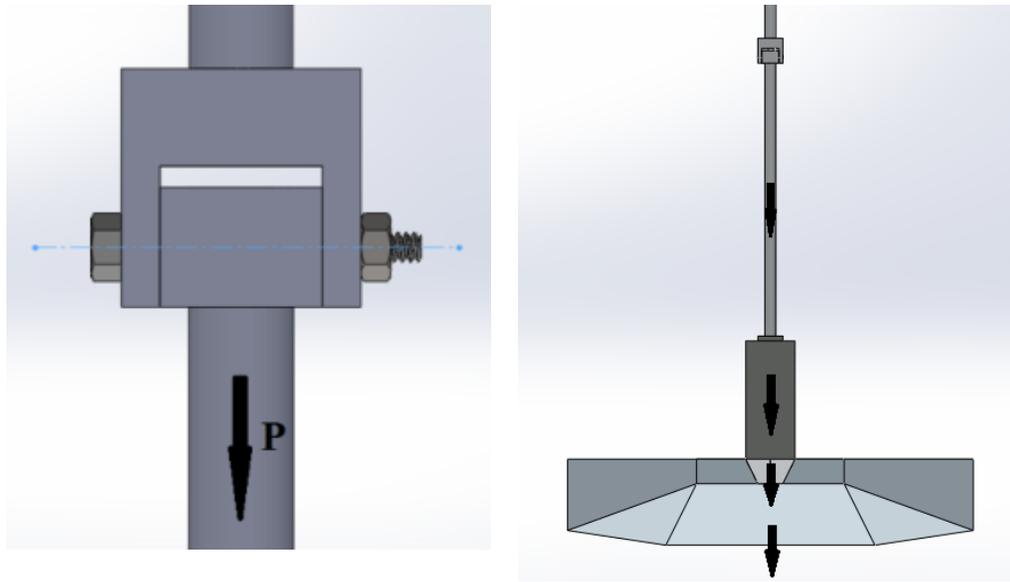


Figura N° 52: Carga sobre la bisagra inferior

**Ec. (25):**  $P = (m_{\text{tubo inferior}} + m_{\text{soporte perfil}} + m_{\text{perfil}} + m_{\text{lastremáx}}) * g$

Sustituyendo los valores y suponiendo un lastre de 25 kg:

$P = (0,393[\text{kg}] + 0,875[\text{kg}] + 2,5[\text{kg}] + 25[\text{kg}]) * 9,81[\text{m/s}^2] = 282,214 \text{ N}$

#### 4.4.2.1. Bisagra interior

La fuerza P es transmitida a la bisagra interior a través de dos pernos en 2 puntos de apoyo, con un espesor de 0,035 m como se aprecia en la Figura N° 53:

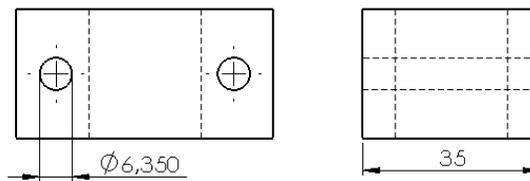


Figura N° 53: Dimensiones de la bisagra interna

**Ec. (26):**  $A = 2 * (\emptyset_{\text{perno}} * t)$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 11 queda:

$\sigma = 282,214[\text{N}] / (2 * 0,00635[\text{m}] * 0,035[\text{m}]) = 0,635 \text{ MPa}$

El factor de seguridad queda:

$F_s = 50[\text{MPa}] / 0,635 [\text{MPa}] = 78,75$       **No falla**

### 4.4.2.2. Bisagra exterior

La fuerza P es transmitida a la bisagra exterior a través de los dos pernos en 4 puntos de contactos de espesor 0,0079 m como se muestra en la Figura N° 54:

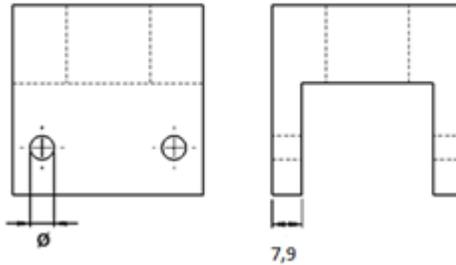


Figura N° 54: Dimensiones de la bisagra externa

Sustituyendo los valores en la Ecuación 11 queda:

$$\sigma = 282,214[\text{N}] / (4 * 0,00635[\text{m}] * 0,0079[\text{m}]) = 1,406 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad queda:

$$F_s = 50[\text{MPa}] / 1,406 [\text{MPa}] = 35,56 \quad \text{No falla}$$

### 4.4.3. Cálculo del alojamiento del freno

Para realizar las simulaciones estructurales de las piezas del trineo, el primer paso es asignar el material a la geometría. Para las estructuras de aluminio se seleccionaron las propiedades del tipo 6063-O. Una vez seleccionado el material, debe fijarse una cara de acople de la pieza a la adyacentes, para simplificar los complejos problemas del análisis por elementos finitos relacionados con la unión entre sólidos. Luego se asigna el valor y ubicación de las fuerzas actuantes. En el caso del alojamiento del freno se asignó la sumatoria de los pesos de las piezas inferiores del trineo y de los lastres. Posteriormente se genera una malla sólida con elementos tetraédricos sobre toda la geometría. En la Figura N° 55 puede observarse que la malla del alojamiento del freno consta de 55820 elementos cuadráticos de alto orden con relación de aspecto inferior a 3 (óptima calidad de la malla).

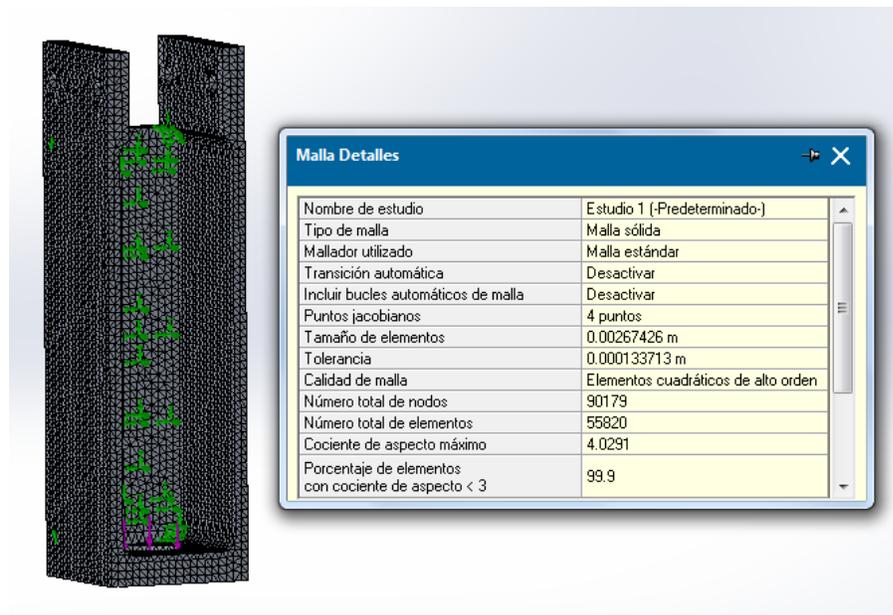


Figura N° 55: Información de la malla

Los resultados de tensión, deformación y factor de seguridad del alojamiento del freno se muestran en las Figuras N° 56, 57 y 58:

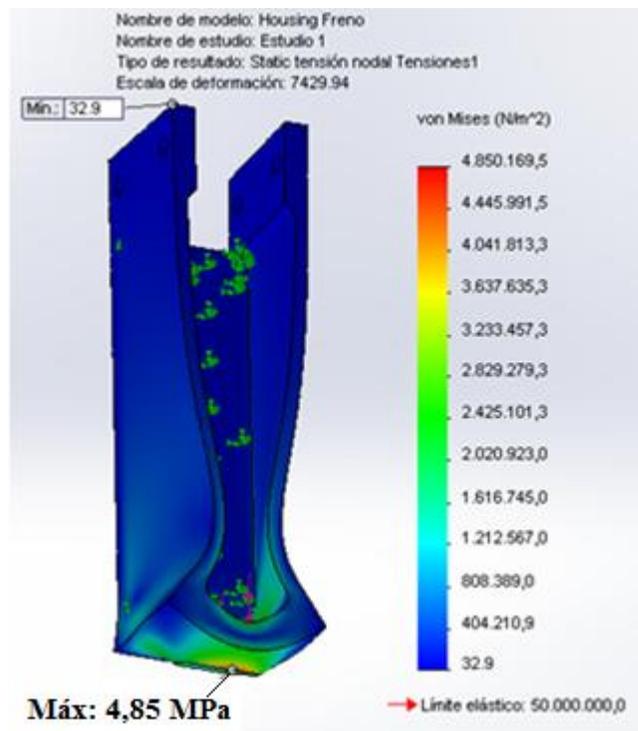


Figura N° 56: Esfuerzo de Von Mises sobre el alojamiento del freno aplicando una carga de 287,88 N

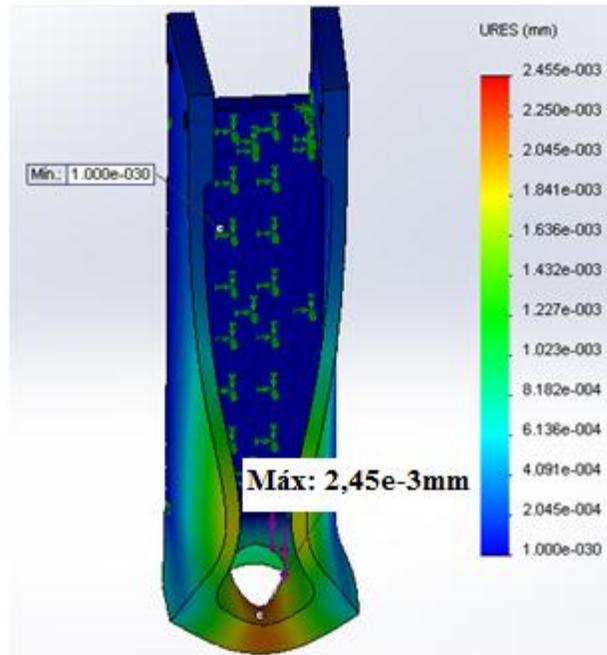


Figura N° 57: Deformación del alojamiento del freno

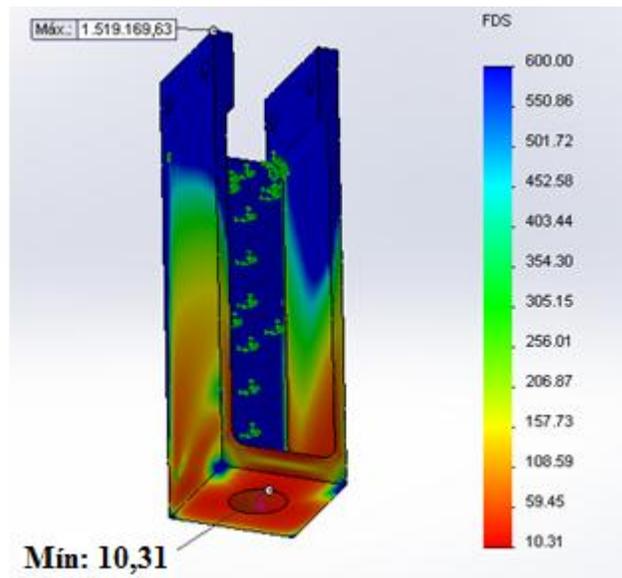


Figura N° 58: Factor de seguridad del alojamiento del freno

Se observa que la sección más solicitada del alojamiento del freno es la cara inferior. En esta región se tienen el esfuerzo y la deformación máximas (4,85MPa y  $2,4 \cdot 10^{-3}$  m respectivamente). El esfuerzo admisible del aluminio 6063-O es 50MPa, y

la deformación máxima es despreciable. Y el factor de seguridad mínimo es de 10,31 y en las demás zonas de la pieza es muy elevado. Por lo tanto la pieza no falla.

### 4.4.4. Cálculo del agarre para el atleta

Esta estructura sirve de vínculo entre el atleta y el trineo, por lo que las fuerzas resultantes sobre el mismo son las producidas por el peso y empuje del atleta, y la fuerza de arrastre, si bien esta última fuerza la genera todo el conjunto, para efectos de este cálculo se consideró su aplicación neta sobre el cuerpo ya que la proporción del área proyectada es mucho mayor a la del trineo. Se analizó el caso más crítico, cuando la mitad de la sumatoria de estas fuerzas es aplicada en cada uno de los extremos de los tubos.

$$\text{Ec. (27):} \quad F = F_D + F_{B_{\text{atleta}}} - P_{\text{atleta}} = 0$$

$$F = 106,215\text{N} + 765,69\text{N} - 745,56\text{N} = 126,345\text{N}$$

$$F/2 = 63,173\text{ N}$$

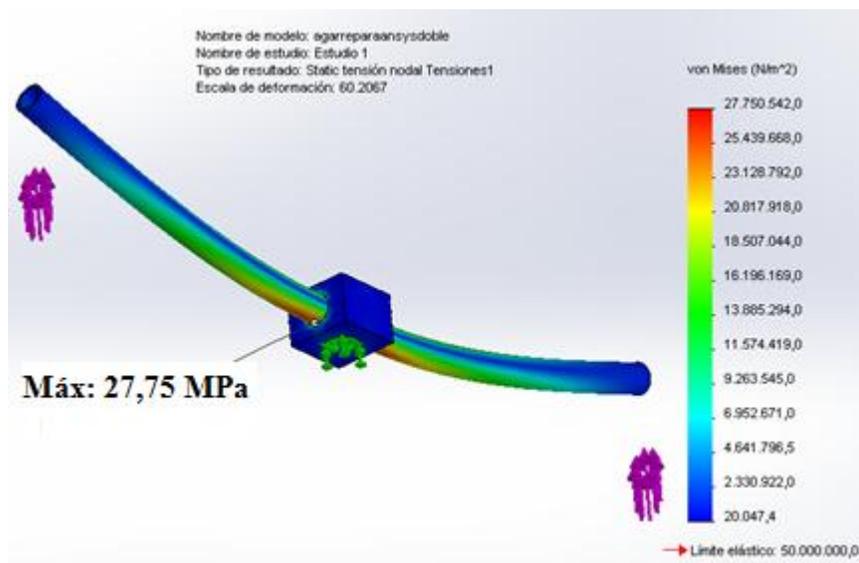
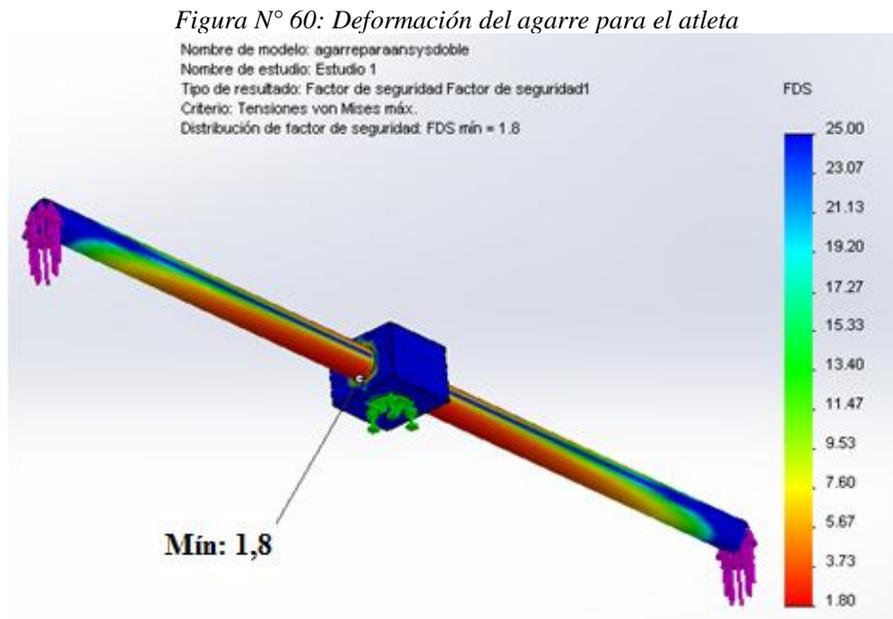
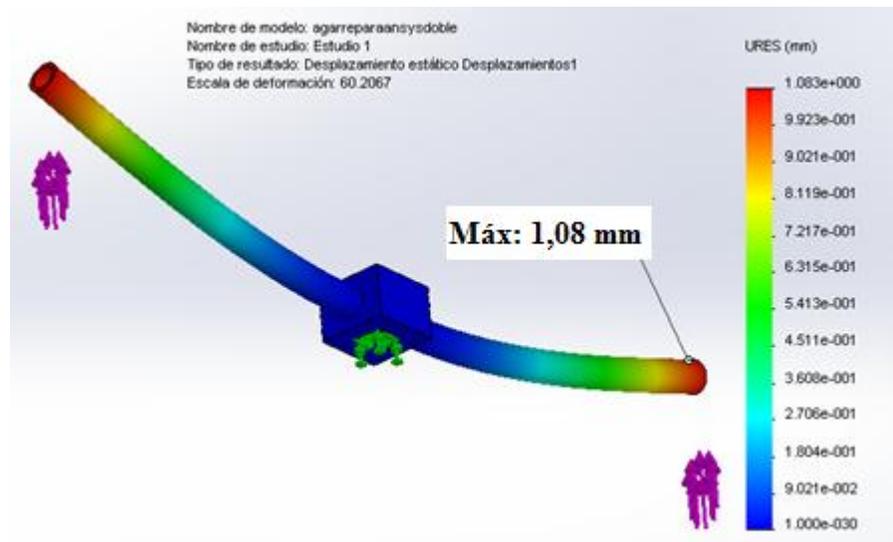


Figura N° 59: Esfuerzo sobre el agarre para el atleta aplicando una carga de 63,173 N en cada extremo



En las Figuras N° 59, 60 y 61 pueden apreciarse los resultados de las simulaciones del agarre del atleta. Se observa que la región más solicitada es el borde inferior de los tubos, en las zonas adyacentes al soporte (27,75MPa). Las zonas que sufren mayor deformación son los extremos de cada tubo (1,08 mm). A pesar de que los valores de esfuerzo y deformación son elevados, el factor de seguridad mínimo (en las zonas más solicitadas) es de 1,8. Por lo tanto la pieza no falla.

### 4.4.5. Cálculo del soporte del perfil

Esta pieza cumple la función de soporte de los lastres además de ser el medio de fijación para el perfil. Para el cálculo del soporte del perfil se empleó el mismo programa de simulación utilizado para el alojamiento del freno. Una vez asignado el material con sus respectivas propiedades, se procede a fijar la cara central (acople a la estructura principal) y la cara posterior (acople al perfil) para obviar los problemas de contacto entre los sólidos, y se asignan las fuerzas generadas por el peso del lastre máximo (cara superior) y el peso del perfil (cara posterior) para proceder con la generación de la malla (Figura N° 62):

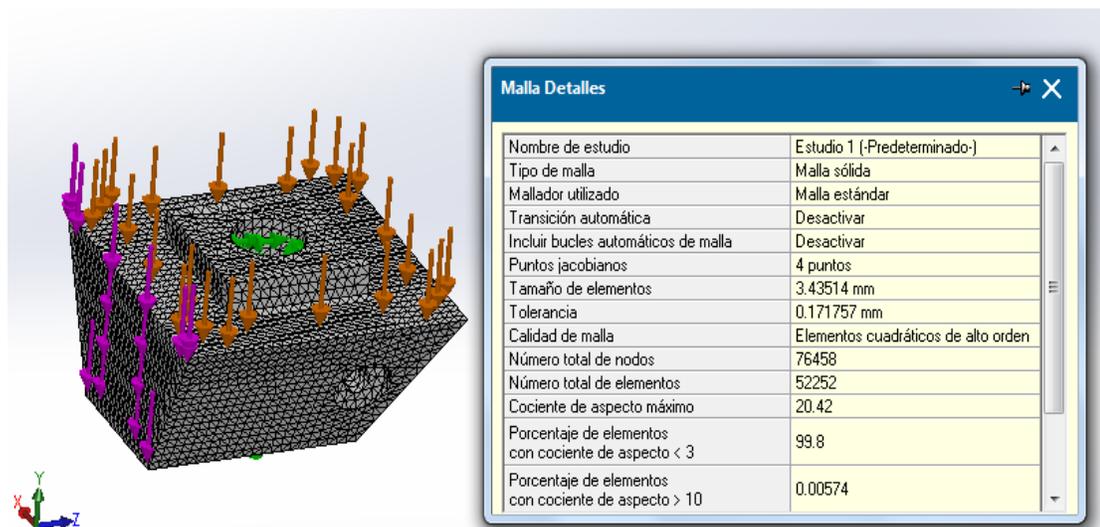


Figura N° 62: Asignación de las fuerzas y generación de la malla

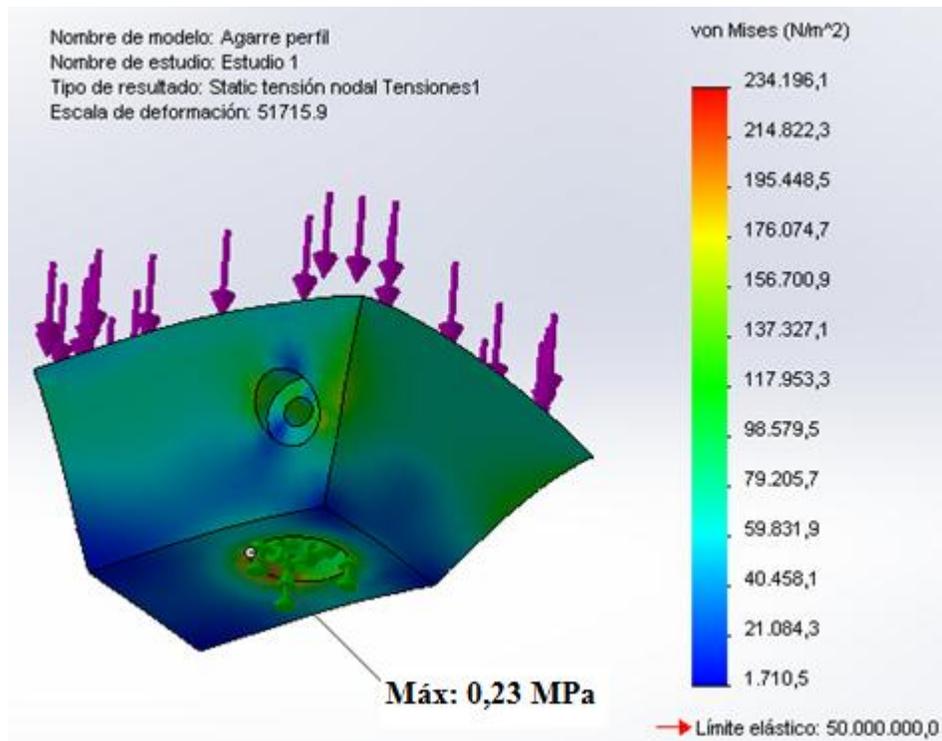


Figura N° 63: Esfuerzo de Von Mises sobre el anclaje del perfil aplicando una carga de 245,25N en la cara superior y una carga de 24,52N en la cara posterior

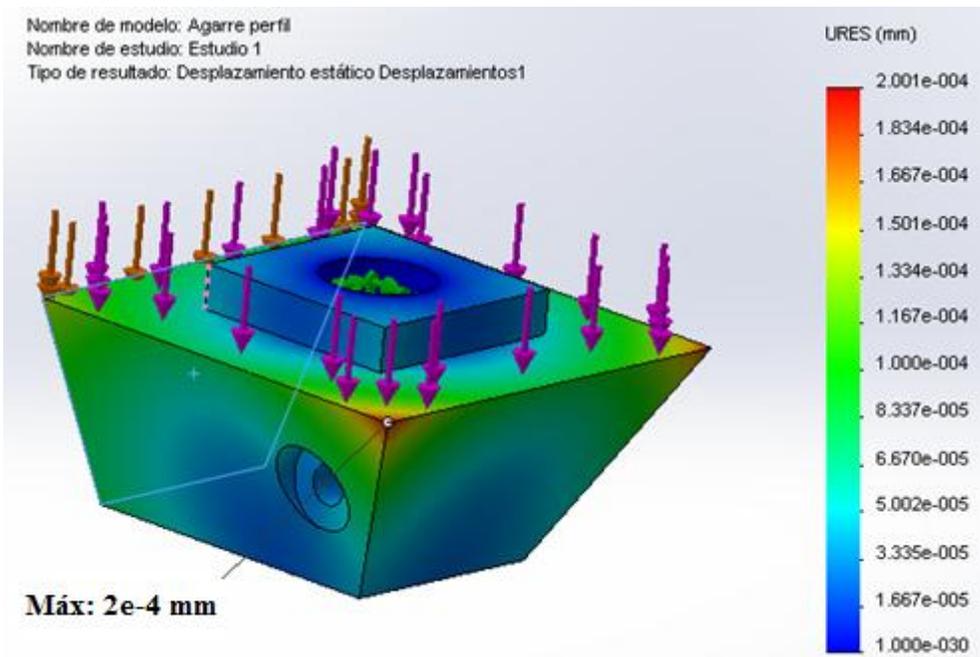


Figura N° 64: Deformación del anclaje del perfil

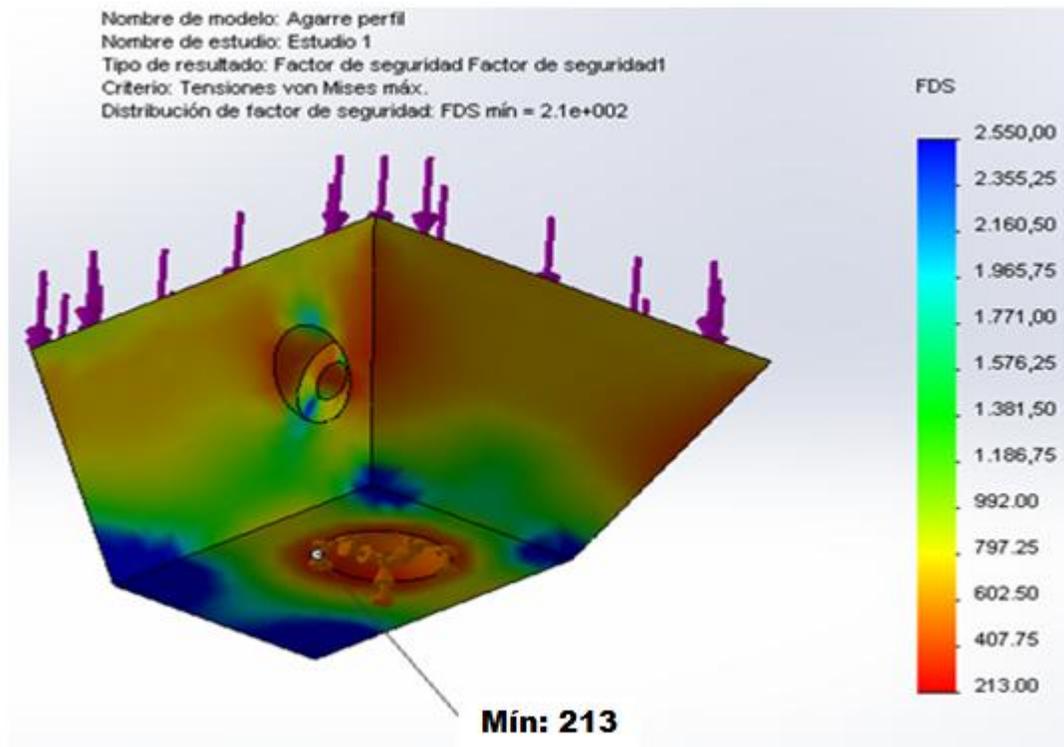


Figura N° 65: Factor de seguridad del anclaje del perfil

Los resultados de tensión, deformación y factor de seguridad del anclaje del perfil se muestran en las Figuras N° 63, 64 y 65: se observa que las secciones más solicitadas de la pieza son los bordes externos del orificio principal. En esta región se tiene el esfuerzo máximo (0,234MPa). Este resultado es de esperarse pues en estos puntos concurren la fuerza de presión con el tubo principal y el concentrador de esfuerzos por el cambio abrupto de geometría. Sin embargo donde ocurren las mayores deformaciones es en las esquinas exteriores de la pieza ( $2 \cdot 10^{-4}$ mm), pero su magnitud es despreciable. El factor de seguridad mínimo es de 213 lo cual es bastante elevado, por lo tanto la pieza no falla.

#### 4.4.6.Cálculo de los tornillos

Para los siguientes cálculos se utilizó la Teoría de Esfuerzos Cortantes Máximos. El esfuerzo de fluencia del material de los tornillos seleccionados (acero inoxidable AISI 304) es de 206,807 MPa.

Se estudió el caso más desfavorable, el cual ocurre cuando el freno está activado, la unión plegable inferior debe soportar el peso de los lastres, del perfil y el tubo inferior. El peso  $P$  ejercido en el tubo inferior se transmite a la sección media a través de los pernos que enlazan las dos partes. Por tratarse de dos pernos, la carga que actúa sobre cada uno de ellos es  $P/2$ , tal como se aprecia en la Figura N° 66. El diámetro de los tornillos de acero inoxidable es de 0,00635 m

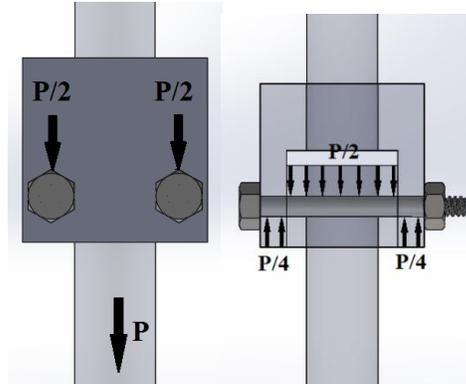


Figura N° 66: Fuerzas cortantes sobre los tornillos

El área total del tornillo sometida a esfuerzo cortante es igual al doble del área de la sección transversal del tornillo. El peso  $P$  es igual a 282,214 [N]. Al sustituir en la Ecuación 11 queda:

$$\sigma = (282,214/2) \text{ [N]} / 2 * \pi * (0,00635^2/4) \text{ [m}^2\text{]} = 2,228 \text{ MPa}$$

Y el factor de seguridad:

$$\text{Ec. (26):} \quad F_s = S_y / \sigma$$

Entonces para los tornillos queda:

$$F_s = 206,807 \text{ [MPa]} / 2,228 \text{ [MPa]} = 92,83 \quad \text{No fallan.}$$

### 4.4.7. Cálculo de soldadura

En la Figura N° 72 se muestran las dimensiones a tener en cuenta para el cálculo del área de soldadura. Esta área  $A$  es equivalente al producto de la garganta  $t$  por la longitud  $L$  del cordón de soldadura:

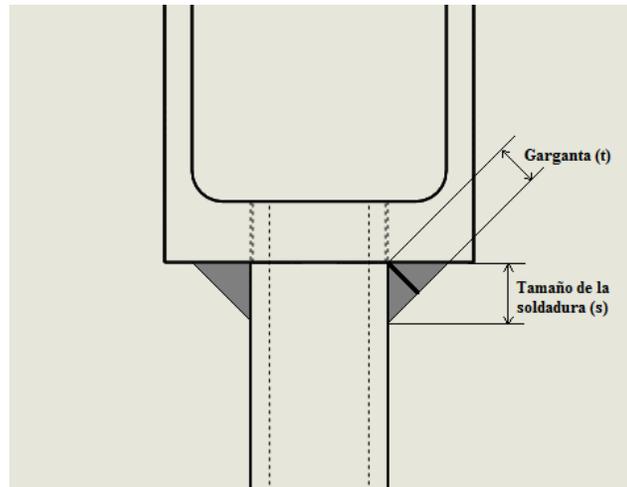


Figura N° 67: Dimensiones de la soldadura

En este caso  $L$  es equivalente al perímetro del tubo. Se tomó el tamaño de la soldadura  $s = 4\text{mm}$  por ser el tamaño aproximado de la soldadura que se obtiene en una sola pasada con el sistema T.I.G. El material de aporte es aluminio 6063-O ( $S_y = 50\text{ MPa}$ ), el mismo material de los componentes a unir. Sustituyendo estos valores y el de la fuerza  $F = 287,896\text{ N}$  en la Ecuación 11 queda:

$$\sigma = 287,896\text{ [N]} / (0,004\text{ [m]} * 0,707 * \pi * 0,022225\text{ [m]}) = 1,45\text{ MPa}$$

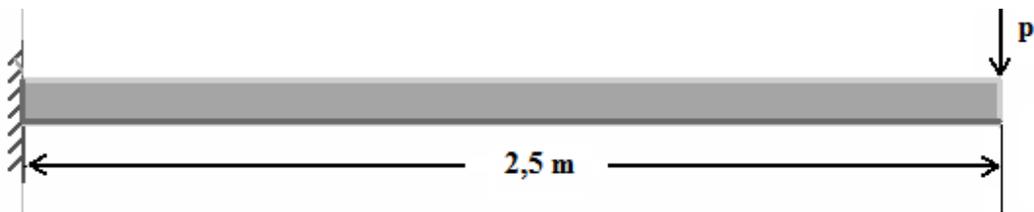
Entonces el factor de seguridad es:

$$F_s = 50\text{ [MPa]} / 1,458\text{ [MPa]} = 34,29\text{ No falla}$$

### 4.4.8. Cálculos de momento flector sobre el trineo

#### 4.4.8.1. Momento flector sobre el tubo principal del trineo

A fin de simular la manipulación del equipo en la embarcación, se estudió el caso más desfavorable, el de una viga empotrada en uno de sus extremos (extremo superior de la estructura) mientras que el peso de sus componentes se aplica sobre el otro extremo, sabiendo que el peso más significativo para este estudio es el del perfil y su soporte ( $33,109\text{ N}$ ) se obvió el peso de la estructura tubular.



*Figura N° 68: Representación del trineo como viga empotrada en un extremo*

Aplicando la primera ley de Newton

**Ec. (27):**  $\Sigma F \uparrow = 0$

$\Sigma F \uparrow = R_0 - P = 0$        $R_0 = P = 33,109 \text{ N}$

Y para el cálculo de Momentos

**Ec. (28):**  $\Sigma M = 0$

$\Sigma M = M_0 - P \cdot x = 0$

$M_0 = P \cdot x = 33,109 \text{ [N]} \cdot 2,5 \text{ [m]} = 82,773 \text{ Nm}$

Se procede a calcular el módulo de sección para el tubo utilizado aplicando la Ecuación 29:

**Ec. (29):**  $Z = \pi \cdot (d_e^4 - d_i^4) / 32 \cdot d_e$

$Z = \pi \cdot (0,022225^4 \text{ [m}^4\text{]} - 0,017^4 \text{ [m}^4\text{)}) / 32 \cdot 0,022225 \text{ [m]} = 7,088 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$

Para calcular el esfuerzo máximo por flexión se emplea la Ecuación 30:

**Ec. (30):**  $\sigma_{\text{máx}} = M_{\text{máx}} / Z$

$\sigma_{\text{máx}} = 82,773 \text{ [Nm]} / 7,088 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^3\text{]} = 116,774 \text{ MPa}$

El esfuerzo de fluencia para el material del tubo aluminio 6063 T5 es de 147,15 MPa. Entonces el factor de seguridad es

**$F_s = 147,15 \text{ [MPa]} / 116,774 \text{ [MPa]} = 1,26$  No falla**

Aunque el factor de seguridad calculado es cercano a la unidad, la manipulación del equipo por una sola persona requiere su sujeción sobre la parte central de la estructura por lo que este caso es analíticamente el más crítico y nunca debe suceder. Se recomienda realizar esta maniobra entre dos personas.

Por otra parte se realizó el cálculo bajo las mismas condiciones agregando el peso del lastre para un peso total de 278,359 N. Hay que aclarar que bajo ninguna circunstancia de uso el sistema está sometido a la situación descrita.

Aplicando la Ecuación 26:

$$\Sigma F \uparrow = R_0 - P = 0 \quad R_0 = P = 278,359 \text{ N}$$

Y para el cálculo de momentos:

$$\Sigma M = M_0 - P * x = 0 \quad M_0 = P * x = 278,359 \text{ [N]} * 2,5 \text{ [m]} = 695,9 \text{ Nm}$$

Aplicando la Ecuación 30 se calcula el esfuerzo máximo por flexión para el tubo con módulo de sección  $Z = 7,088 * 10^{-7} \text{ m}^3$

$$\sigma_{\text{máx}} = 695,9 \text{ [Nm]} / 7,088 * 10^{-7} \text{ [m}^3\text{]} = 981,8 \text{ MPa}$$

Entonces el factor de seguridad es:

$$F_s = 147,15 \text{ [MPa]} / 981,8 \text{ [MPa]} = 0,15 \text{ Falla}$$

Bajo esta situación se produce la falla del equipo, es por ello que nunca se recomienda manipular el trineo para apnea en posición horizontal con los lastres incorporados, solo deben colocarse una vez el sistema este fijado a la línea de descenso en posición vertical para que la estructura trabaje a tracción.

Para garantizar la integridad de la estructura bajo estas sollicitaciones se debe cumplir que el esfuerzo máximo sea igual al de fluencia del material, sustituyendo y despejando de la Ecuación 29 se tiene que el módulo de sección del tubo debe ser mínimo:

$$Z = M_{\text{máx}} / \sigma_{\text{máx}} = 695,9 \text{ [Nm]} / 147,15 * 10^6 \text{ [Pa]} = 4,729 * 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

Si se mantiene el diámetro interno, despejando de la Ecuación 29 se tiene que el diámetro externo del tubo debe ser de 37,1 mm. Para fines prácticos de este trabajo es imposible el uso de un tubo de estas dimensiones, ya que solamente el peso de la estructura y sus componentes asciende a 9 kg y al agregar el peso del perfil será imposible cumplir el objetivo de que el diseño no exceda los 10 Kg.

### 4.4.8.2. Pernos y bisagra

Se procede a estudiar cómo afecta a la bisagra el sistema de cargas anteriormente descrito.

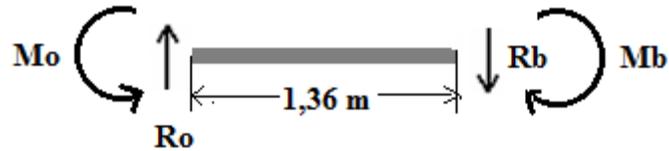


Figura N° 69: DCL de trineo sometido a flexión

Aplicando la Ecuación 26:

$$\Sigma F \uparrow = R_o - P = 0 \quad R_o = P = 278,359 \text{ N}$$

Y para el cálculo de momentos:

$$\Sigma M = M_o - P \cdot x = 0 \quad M_o = P \cdot x = 278,359 \text{ [N]} \cdot 1,36 \text{ [m]} = 378,568 \text{ Nm}$$

Esta fuerza se distribuye equitativamente sobre la bisagra, y el momento también causa reacciones sobre ella, como se puede observar en la Figura 70.

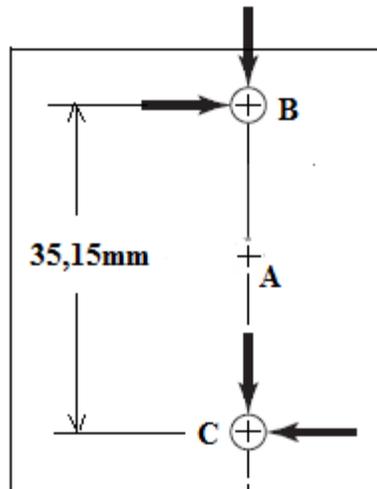


Figura N° 70: DCL reacciones sobre la bisagra

Por lo tanto se tiene que:

$$R_{B_y} = R_{C_y} = 139,18 \text{ N}$$

Despejando de la ecuación 11 se tiene que las fuerzas son:

$$F_{B_x} = F_{C_x} = 378,568 \text{ [Nm]} / 0,03515 \text{ [m]} = 10770,071 \text{ N}$$

Los módulos de las reacciones son:

$$F_A = F_B = \sqrt{(139,18^2 + 10770,071^2)} = 10770,97 \text{ N}$$

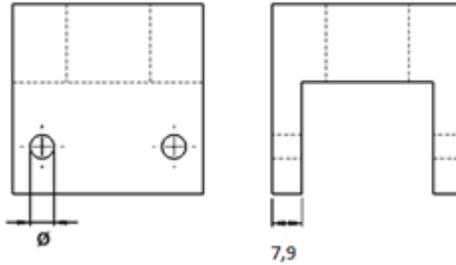


Figura N° 71: Bisagra externa

Los **pernos** están solicitados a cortante, sustituyendo los valores en la Ecuación 11, se tiene:

$$\tau = (10770,97) \text{ [N]} / (2 * \pi * 0,00635^2 \text{ [m}^2\text{)}) / 4 = 170,05 \text{ MPa}$$

Como el esfuerzo de fluencia del acero inoxidable es de 206,807 MPa, el factor de seguridad queda:

$$F_s = 206,807 \text{ [MPa]} / 170,05 \text{ [MPa]} = 1,22 \quad \text{No falla}$$

Por otro lado se calcula también para la **bisagra externa**:

$$\sigma = 170,05 \text{ [N]} / (2 * 0,00635 \text{ [m]} * 0,0079 \text{ [m]}) = 107,355 \text{ MPa}$$

Como el esfuerzo de fluencia del aluminio 6063-O es de 50 MPa, El factor de seguridad queda:

$$F_s = 50 \text{ [MPa]} / 107,355 \text{ [MPa]} = 0,46 \text{ Falla}$$

Por esta razón se recalca que bajo ninguna circunstancia el trineo debe ser manipulado horizontalmente con los lastres puestos.

## **CAPÍTULO V**

### **MANUFACTURA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

#### **5.1.PERFIL HIDRODINÁMICO**

Como se mencionó previamente, el material seleccionado para la manufactura del perfil hidrodinámico es fibra de vidrio, pues con este compuesto pueden fabricarse piezas resistentes a la corrosión por agua, de alta resistencia mecánica y a la vez livianos, y además con un acabado superficial sumamente liso en sus caras externas, ideal para el descenso del perfil en su recorrido submarino.

Para poder realizar el perfil se elaboró primero un pre-molde del mismo, a partir del cual se fabricó el molde y finalmente la pieza.

##### **5.1.1.Pre-molde del perfil**

Para realizar el pre-molde se dibujaron los patrones de cada sección del perfil en planchas de MDF, se cortaron y se ensamblaron con pegamento vinílico, ajustando la abertura del perfil mediante unos soportes internos de MDF.

Luego de secado el ensamble, se pegaron en las caras externas los patrones previamente cortados en láminas de fórmica para obtener una superficie lisa. Estos procesos, incluyendo los tiempos de espera por el secado, tomaron un tiempo total de cinco horas.

Una vez seco el pre-molde se suavizó los desniveles que quedaron en la superficie del ensamble con masilla plástica. Una vez seca la masilla, se lijó para suavizar su superficie.

Por otra parte se realizó una pestaña de MDF que rodea al pre-molde por sus bordes laterales e inferiores y se adhirió a éste con la masilla plástica. El objeto de esta pestaña es asegurar un borde de unión entre las dos caras del molde y

posteriormente de la pieza final. En la Figura N° 74 se muestra el pre-molde terminado.



*Figura N° 72: Pre-molde finalizado*

### **5.1.2. Molde del perfil**

Ya finalizado el pre-molde, se procedió a realizar el molde de fibra de vidrio a partir de las caras externas de fórmica del pre-molde. De esta manera, serían las caras internas del molde las que quedarían con un acabado liso.

En primer lugar se impregnó de cera desmoldante toda la superficie de una de las caras del pre-molde y de la pestaña. Se retiró el exceso con una estopa limpia, y volvió a cubrirse de cera. Se dejó secar durante 3 minutos y se repitió este procedimiento por 5 veces. Posteriormente se cubrieron las mismas superficies con pintura de poliuretano presurizada de color rojo y se dejó secar un par de horas. Luego se impregnaron las superficies con resina de gelcoat e inmediatamente se cubrieron con un velo de fibra de vidrio de aproximadamente 300 micrones de espesor cuyo propósito es obtener un acabado superficial de alta calidad, reproduciendo las características superficiales del pre-molde. Luego de colocar el

velo, se aplanó con un rodillo para evitar posibles burbujas de aire que podrían dañar la superficie del molde.

Al velo también se le cubrió de resina e inmediatamente se cubrió con dos láminas de fibra de vidrio tipo Mat 300 y una capa de resina sobre cada una, como se muestra en la Figura 75. Estas primeras capas se dejaron secar por 2 horas para luego colocar 4 capas más de Mat 300 con sus respectivas capas de resina. A cada capa de fibra se le aplicó el rodillo. Todos estos procedimientos se repitieron luego para la cara opuesta del pre-molde. Así, el molde final sería de dos tapas.



*Figura N° 73: Producción del molde en fibra de vidrio*

Ya secas las dos caras del molde, se perforó la pestaña en diversos lugares con el fin de poder ubicar tornillos guías al momento de realizar la pieza para evitar deslizamientos del molde.

El siguiente paso fue retirar las caras del molde con una espátula teniendo cuidado de no dañar la superficie interna del mismo. A continuación se lijaron los restos de masilla adheridos a las caras internas, con lijas 360, 400, 600 y 1200.

### **5.1.3. Prototipo del perfil**

Para realizar la pieza se impregnó primero la superficie interna del molde con cera desmoldante, realizando el mismo procedimiento descrito para el molde y añadiendo 8 recubrimientos adicionales. Una vez secas las superficies, se cubrieron con una capa de pintura de poliuretano presurizada de color blanco y con gel-coat, se colocó el velo y 2 capas alternadas de resina y fibra de vidrio tipo E Mat 300 (cuya fuerza de rotura es de 120 N/Tex) para amoldarse mejor a la superficie y se les pasó el rodillo a cada capa. Antes de que secan completamente las primeras capas se recortaron los bordes adheridos a la pestaña para evitar posibles roturas de la pieza posteriormente.

Luego se procedió a colocar otras 2 capas, pero esta vez de fibra de vidrio tipo E Mat 450 para obtener una mayor rigidez estructural en la pieza (su fuerza de rotura es superior a 150 N/Tex). Luego, en la cara interna de la que sería la tapa frontal del perfil, se colocó una pletina de aluminio de 10 cm de largo por 2 cm de ancho en el lugar donde se perforaría luego para sujetar el anclaje del perfil con la estructura metálica del trineo. Luego se colocaron 2 capas más de resina y fibra y se aplicó el rodillo a cada una.

Inmediatamente se juntaron las dos tapas del molde y se atornillaron con las capas de la pieza en su interior. De esta manera, los bordes sobrantes de cada cara se solaparían, y el exceso de resina llenaría los filos de unión. Así se eliminan estos filos que hubieran podido fallar bajo presión.

Se dejó secar la pieza durante una hora al sol, y se retiraron las tapas del molde. Luego se esmeriló el borde sobrante de la pestaña, y se procedió a retocar las pequeñas irregularidades que quedaron con una mezcla de talco micronizado y gel-coat, protegiendo el resto de la superficie con láminas de papel transfer. Seca la mezcla, se pintaron estas zonas.

Finalmente, se lijaron todas las aristas con papeles 360, 600 y 1200; y se realizó el pulido de la pieza utilizando cera de pulir y sellador. En la Figura N° 76 se aprecia el acabado final de la pieza terminada.



*Figura N° 74: El perfil terminado*

## **5.2. ESTRUCTURA PRINCIPAL DEL TRINEO**

Los componentes de la estructura se fabricaron a partir de tubos de sección circular huecos de diámetro 7/8 pulg (22,225 mm) y barras de aluminio de sección cuadrada de 2 pulg x 2 pulg (50,8mm x 50,8 mm). Fueron cortados a las medidas requeridas y se aplicaron los procesos de mecanizado necesarios para formar la geometría final de las piezas. Estos procesos fueron el refrentado en torno para alisar las caras, fresado para las cavidades del alojamiento del freno y de las bisagras, taladrado para las guías de los tubos y orificios de los pernos, etc. Las partes fueron vinculadas mediante soldadura T.I.G. en unas zonas y mediante pernos en otras uniones. Ver hojas de procesos para cada pieza (Apéndice 2).

En las Figuras N° 77, 78, 79, 80 y 81 pueden apreciarse los diversos procesos de fabricación empleados en la estructura metálica del trineo.



*Figura N° 75: Refrentado en torno*



*Figura N° 76: Fresado*



*Figura N° 77: Taladrado*



*Figura N° 78: Mecanizado en CNC*



*Figura N° 79: Soldadura T.I.G.*

### **5.3.ENSAMBLE DEL TRINEO**

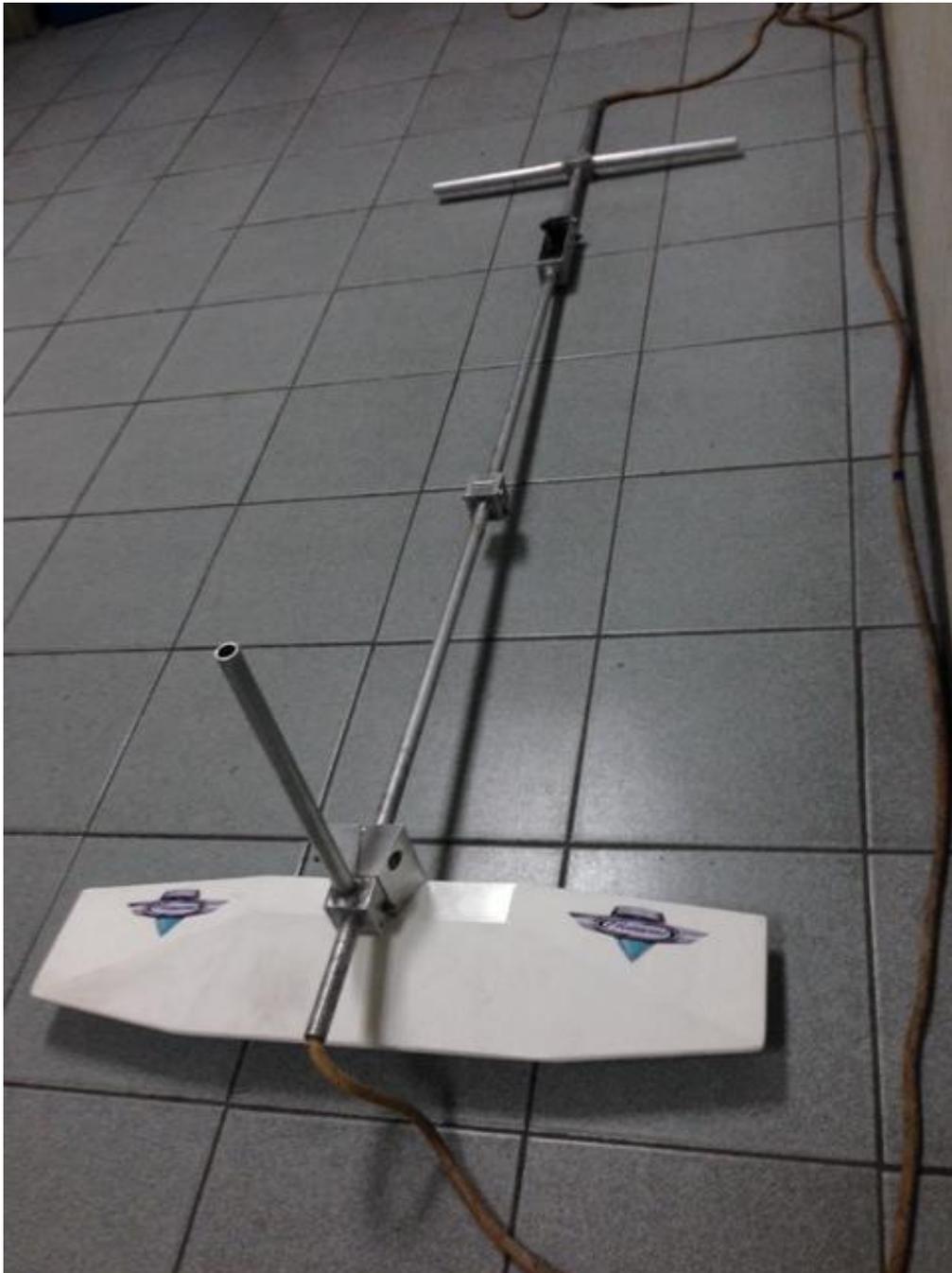
En la Figura N°80 se observa el ensamble del freno en su alojamiento, en la Figura N° 81 el contraste entre las dimensiones de la estructura principal plegada y extendida y en la Figura N° 82 el ensamble de todo el trineo.



*Figura N° 80: Ensamble del sistema de freno*



*Figura N° 81: Ensamble de estructura: a) plegada y b) extendida*



*Figura N° 82: Ensamble completo del trineo*

### **5.4.VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

Los resultados analíticos fueron validados con una prueba del prototipo en condiciones reales. El prototipo fue probado por el apneista venezolano Carlos Coste. La prueba se realizó en mar abierto a una profundidad de 30 m, con un lastre de 14 kg. A pesar de que las condiciones del mar no eran óptimas, el trineo descendió sin perturbaciones durante 20 s, con una velocidad terminal de 1,5 m/s, aún cuando la línea no estaba totalmente tensa debido a las fuertes corrientes marinas presentes.

Debido a que al momento de realizar la prueba no se disponía de los lastres apilables, se tuvo que sujetar un lingote de plomo del peso deseado a la estructura principal antes de colocar el trineo en el mar. Posteriormente, debido a lo agitado que estaba el mar, no se pudo manipular el trineo con el debido cuidado al momento de suspenderlo en la línea guía, y se vio sometido a flexión con la carga del lastre y el peso del perfil. Esta carga ocasionó un doblez en el tubo superior, tal como se esperaba por el cálculo de flexión realizado. Sin embargo, este doblez no influyó en el funcionamiento del trineo durante la prueba.

La prueba también reveló que puede hacerse difícil para el atleta introducir la monoaleta en el perfil cuando hay corrientes marinas fuertes. Sin embargo, una vez introducida, estas corrientes no generaron vibraciones sobre la monoaleta, debido a la protección brindada por el perfil hidrodinámico.

Durante la prueba, Coste comprobó también que el sistema de freno seleccionado se adaptó a la carga y su accionamiento fue inmediato, tanto al activarlo como al soltar la cuerda.

La prueba también sirvió para comprobar que el trineo es de fácil traslado y su montaje es sencillo y rápido (se necesitaron aproximadamente 15 minutos para prepararlo entre 2 personas).

En la Figura N° 83 se puede apreciar el atleta posicionándose en el trineo, así mismo, las Figuras N° 84 y 85 muestran tomas del trineo en descensos desde diferentes ángulos.



*Figura N° 83: Posicionamiento del atleta en trineo*



*Figura N° 84: Trineo en descenso (cámara a bordo)*



*Figura N° 85: Trineo en descenso (cámara externa)*

**CAPÍTULO VI**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En la actualidad los atletas dedicados a las modalidades de apnea en mar abierto están alcanzando profundidades cada vez mayores y sobrepasando los límites de resistencia a altas presiones y de tiempo sin respirar que durante siglos se creyeron insuperables para los seres humanos. Estas hazañas se han podido lograr en gran medida debido al desarrollo de los métodos de intenso entrenamiento físico y mental de los atletas, y también por el impulso tecnológico que le brindan los equipamientos deportivos que contribuyen a incrementar su rendimiento competitivo.

Uno de estos equipos son los trineos utilizados en la modalidad de peso variable. Al tratarse de una de las modalidades más exigentes para los atletas, los procesos de diseño y construcción de los trineos adquieren cada vez mayor relevancia, pues el óptimo funcionamiento de los mismos puede marcar la diferencia no solamente al momento de establecer nuevos récords si no también en cuanto a la prevención de riesgos para la salud de los atletas sometidos a condiciones tan extremas.

Son muchas las variables que intervienen en el diseño y la construcción de estos trineos debido a la gran cantidad de disciplinas (ingeniería, medicina, reglamentos del deporte, capacidades de cada atleta, entre otros) que deben tomarse en cuenta durante el desarrollo de estos productos para que el atleta pueda beneficiarse al máximo de su utilización.

El método de diseño ingenieril permite estudiar una gran cantidad de posibilidades al momento de realizar un proyecto de esta naturaleza, pues abarca desde el diseño conceptual del producto hasta los cálculos que permiten validar la factibilidad del proyecto. Así, a lo largo de todo el proceso pueden analizarse con el debido cuidado las variables involucradas en el funcionamiento del trineo, lo cual redundará en una mayor calidad del equipo y por tanto un mayor incremento en el desempeño del atleta.

### **6.1 CONCLUSIONES**

Para finalizar este trabajo se presentan una serie de conclusiones relevantes derivadas de la investigación:

- (a) El trineo diseñado, analizado y construido en este trabajo cumplió con los objetivos establecidos ya que contribuye al incremento del rendimiento de los apneistas dedicados a la disciplina de peso variable, pues el dispositivo permite el descenso del apneista en una posición ergonómica, realizando un recorrido fluido y libre de desbalances que puedan afectar la concentración del atleta, además es fácilmente adaptable a las características físicas de cada usuario y a sus requerimientos de velocidad mediante el sistema de lastres apilables, es fácilmente transportable, cuenta con un sistema de freno confiable y de accionamiento inmediato e intuitivo y sus piezas están diseñadas para resistir sollicitaciones mecánicas de tracción mucho mayores a las que se verían sometidas durante su operación regular.
- (b) El peso total del trineo sin el lastre es de 6 kg, y ninguna pieza excede los 0,9 m de longitud. Por lo tanto se cumple la meta propuesta de un peso no mayor a 10 kg y longitudes de cada pieza no mayores a 1 m.
- (c) Se utilizaron diversas metodologías en la consecución de los objetivos de esta investigación. Muchos de ellos originales a causa de la escasez de información en la literatura y la complejidad de los problemas, como es la simulación de la geometría del conjunto integrado por el trineo y el atleta a través del método de los elementos finitos, o la determinación del comportamiento hidrodinámico y estructural del trineo, entre otros. Ningún trabajo similar ha sido realizado en la bibliografía consultada.
- (d) El análisis hidrodinámico del conjunto integrado por el perfil, la estructura metálica y el cuerpo del atleta, demuestra que para velocidades comprendidas entre 0,5 y 50 m/s, con números de Reynolds asociados entre  $6,4 \cdot 10^4$  y  $6,4 \cdot 10^6$ , su coeficiente de arrastre  $C_D$  adquiere un valor casi constante igual a 0,32. Este valor es menor al de una esfera lisa para  $Re$  entre  $6 \cdot 10^4$  y  $2 \cdot 10^5$ , lo cual convierte al trineo diseñado en una geometría óptima por su fluidodinámica para el uso al que se destina.
- (e) La mayoría de las velocidades analizadas está dentro del rango de operación del trineo, pues empíricamente se considera que a velocidades de inmersión mayores de 2 m/s el cuerpo humano podría sufrir traumatismos severos y otras anomalías orgánicas derivadas de los cambios bruscos de presión bajo el mar.
- (f) La relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre el conjunto integrado por el trineo y el atleta permite deducir que el flujo circundante tiene un carácter laminar. Este comportamiento se debe a la gran diferencia en el orden de magnitud entre ambas fuerzas; y se refleja en los números de Reynolds calculados con las velocidades de operación del trineo.

- (g) La estructura principal del trineo puede fallar si es sometido a una carga de flexión igual a la sumatoria de los pesos del perfil, su soporte y de lastre máximo. Para evitar que falle bajo estas cargas, se requiere un tubo de aluminio de por lo menos 37,1 mm de diámetro externo si se mantiene el diámetro interno de 17 mm, lo cual implicaría una masa total solo de la estructura de 9 kg por lo que se excede 10 kg en toda la masa del trineo.
- (h) El trineo fue probado en mar abierto por el apneista venezolano Carlos Coste, a una profundidad de 30 m. El trineo alcanzó la velocidad terminal de 1,5 m/s y se desplazó fluidamente y sin perturbaciones por la línea vertical guía. La monoaleta fue protegida de vibraciones por el perfil. Se comprobó que el sistema de freno es de accionamiento inmediato. El atleta ajustó la altura de los elementos del perfil según su preferencia.
- (i) Durante la validación experimental, se observó que para el atleta es difícil introducir la monoaleta en el perfil sumergido. Otro inconveniente que se presentó fue la inclinación del tubo superior debido a que por una mala manipulación del trineo durante su montaje se vio sometido a una carga de flexión igual al peso del lastre más el del perfil, lo cual según los cálculos desarrollados en este trabajo hace fallar la pieza, tal como se verificó. Sin embargo, la inclinación del tubo no tuvo repercusiones en el funcionamiento del trineo.

### **6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

- (a) Se recomienda diseñar y construir una guía que facilite la introducción de la monoaleta en el perfil.
- (b) Se recomienda sustituir el material del tubo vertical de la estructura metálica por otro cuya resistencia a la fluencia sea lo suficientemente mayor al del aluminio 6063 T5, como por ejemplo acero inoxidable, manteniendo así diámetros aceptables, aunque esto implicará un mayor peso.
- (c) Se recomienda seguir cuidadosamente las instrucciones de uso del manual, para mantener el trineo en óptimas condiciones y beneficiarse al máximo de sus propiedades.
- (d) Para posibles trabajos de investigación similares se sugiere analizar otras geometrías del perfil posiblemente más hidrodinámicas, como un paraboloide.
- (e) Se sugiere también estudiar la factibilidad de usar materiales no metálicos para la estructura principal del trineo, tales como fibra de carbono u otros materiales compuestos que tengan una relación entre resistencia mecánica y peso mucho más elevada que las aleaciones de aluminio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, J. (2013) *Conceptualización y Ámbito de la Biomecánica*, Documento en progreso. Instituto de Investigaciones & Soluciones Biomecánicas, Cali. Colombia
- ANSYS (2012) *Introduction to ANSYS CFX*. Estados Unidos.
- ANSYS (2012) *Introduction to ANSYS Meshing*. Estados Unidos
- Arias, F. (2006) *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica*, 5ª Ed. Caracas: Episteme.
- Association Internationale pour le Développement de l'Apnée, (2007) *Guidelines and Protocol for Sled Diving*.
- Beer, F., Johnston, R. y Dewolf, J. (2004) *Mecánica de materiales*, 3ª Ed. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- Cifuentes, J., Torres, P. y Frías, M. (1986) *El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería*. 2ª Ed. México: Fondo de Cultura Económica.
- Cifuentes, J., Torres, P. y Frías, M. (1986) *El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*. 2ª Ed. México: Fondo de Cultura Económica.
- Fonseca L, Z. (2011) *El método de los elementos finitos: una introducción*, Maracaibo: Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta
- Gere, J. (2006) *Mecánica de Materiales*, 6ta Ed. México: Thomson.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2003) *Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en PYME*. España.
- Llana, S. (s.f.) *El análisis biomecánico en natación*. Ponencia presentada en la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Universitat de València, España.
- Lippmann, J. y Mitchell, S. (2005). *Deeper into Diving*, 2ª Ed. Australia: J. L. Publications
- Milani, R. (1983) *Diseño para nuestra realidad*, Caracas: Equinoccio.
- Miravete, A. (2007) *Materiales compuestos I*, España: Reverté
- Molina, D. y León, R. (2005) *Diseño de productos para deportes extremos. Sistematización del proceso en diseños no abordados anteriormente. Caso:*

- trineo para apnea submarina*, Resumen del Trabajo especial de grado. Universidad de Los Andes, Mérida.
- Moreno, P. y Pérez, A. (2004) *Método de los elementos finitos: introducción a ANSYS*, Madrid: Universidad de Sevilla
  - Mott, R. L. (1996) *Mecánica de fluidos aplicada*, 4ta Ed. México: Pearson.
  - Mott, R. L. (1996) *Resistencia de materiales aplicada*, 3a Ed. México: Pearson.
  - Osborn, A. (1960). *Imaginación aplicada*. (Durán, A. trad.) España: Velflex (obra original en 1953)
  - Pérez L., Souto A. y González L. (2001) *El futuro enfoque de la hidrodinámica marina*. Ponencia presentada en el II Simposio de diseño e ingeniería naval. Madrid.
  - Rodríguez, L. (2011) *Estudio fluido-dinámico y optimización de la aleta de una embarcación planeadora de vela*. Resumen del Trabajo especial de grado. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
  - Tablante, O. (1988). *El proceso de investigación y desarrollo en el diseño de equipos, productos y máquinas*, Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas
  - Wilmore, J. y Costill, D. (2007) *Fisiología del esfuerzo y del deporte*, (Campo del, P., trad.) 6ª Ed. España: Paidotribo.

### REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- Association Internationale pour le Développement de l'Apnée, (2009) [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.aidainternational.org>
- Bergman, J. (2001) *Densidad de las aguas de los océanos*. [Página web en línea]. Disponible en : <http://www.windows2universe.org/earth/Water/density.html&lang=sp> [Consulta: 2013, mayo 8]
- Bernal, I. (2010) *Malas posturas*. [Página web en línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/29341262/ERGONOMIA-MALAS-POSTURAS> [Consulta: 2013, abril 20]
- Blacio, E. (2009) *Curso teórico de buceo con equipo SCUBA* [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/> [Consulta: 2013, enero 25]
- Cedeño, M. (2013) *Canadiense William Winram implanta en Egipto Récord Mundial de Apnea Peso Variable 145 metros*. [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.sportalsub.net/blog/2013/> [Consulta: 2013, noviembre 4]
- Contreras, G. (2007) *Carlos Coste bate Récord Mundial de peso variable a -140m de profundidad*. [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.carloscoste.com/noticias>. [Consulta: 2012, octubre 25]
- Córdoba de, M. (2010) *Presión bajo el agua*. Página web de información fisiológica: <http://fisiologoi.com/paginas/BUCEO/presionagua.htm> [Consulta: 2012, septiembre 12]
- García, M., Nava V. y Sánchez, F. (2011) *Velocidad y definición del sonido y fenómenos acústicos*. [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/victormanuelnavaflores/> [Consulta: 2013, abril 27]
- Gil, J. L. (2009) *Nociones básicas de apnea*. [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.marcanario.com/apnea/> [Consulta: 2012, septiembre 18]
- [Imagen de nomenclatura de un perfil]. Obtenida de: [www.commons.wikimedia.org/wiki/File:Perfil\\_alar\\_1.svg](http://www.commons.wikimedia.org/wiki/File:Perfil_alar_1.svg)
- [Imágenes de ejemplos de trineos usados en peso variable]. Obtenidas de <http://www.carloscoste.com/galeria.php?idv=79>(derecha) y de [www.freediving.biz/nolimit](http://www.freediving.biz/nolimit)
- Manlioesp (2008) *Umberto Pelizzari - Record mondiale -75m* [Archivo de vídeo]. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=fhyj2VZGcFw> [Consulta: 2013, noviembre 8]

## BIBLIOGRAFÍA

---

- *Mantenimiento de cascos de fibra.* (2011) [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.fondear.org/infonautic/> [Consulta: 2013, octubre 26]
- Martínez, I. (2005) *Termodinámica del océano.* [Artículo técnico en línea]. Disponible en: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/> [Consulta: 2013, febrero 10]
- Muzzone, J. (2011) *WORLD EXCLUSIVE: new Herbert Nitsch sled designed by Trygons.* [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.ilovepescasub.com/en/apnea/2011/06/> [Consulta: 2012, noviembre 16]
- Navarro, T. (2010) *Apneistas famosos.* [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.yumping.com/noticias-aventura/> [Consulta: 2012, diciembre 16]
- Pereira, S. (2012) *Hex dominant method and local inflation.* (11 de febrero de 2012) [Mensaje 2]. Dirigido a: <http://www.cfd-online.com/Forums/ansys-meshing/>
- Rumsey, C. (2013) *The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model* [Artículo técnico en línea] Consultado el 18 de septiembre de 2013 en: <http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>
- *Skandalopetra.* (2008) [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.freediving.es/skandalopetra> [Consulta: 2013, marzo 12]
- Sosa, P. (2007) *Formas y resistencia.* [Artículo técnico en línea]. Consultado el 2 de marzo de 2013 en: <http://www.ingenierosnavales.com/DOCUMENTACIONFOROS/>
- Trubridge, W. (2009) *Freediving World Record no fins 88m (288 ft)* [Archivo de video]. Consultado el 8 de noviembre de 2013 en: <http://www.youtube.com/watch?v=vF4PN8-2YSk>
- *Umberto Pelizzari* (2003) [Página web en línea] Disponible en: <http://www.bajoelagua.com/articulos/apnea/67.htm> [Consulta: 2012, diciembre 15]
- Universidad de Cádiz (s.f.) *Laboratorio de Corrosión y Protección.* [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.labcyp.com/admin/16.pdf> [Consulta: 2013, mayo 12]
- Anadón, R. y Fernández, C. (s. f.) *Características de los medios acuáticos* [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.unioviedo.es/chely/CHELY/docencia/> [Consulta: 2013, noviembre 5]
- Wikipedia. (2006). [Página web en línea]. Enciclopedia. Disponible en: <http://www.wikipedia.org/>

## APÉNDICES

### APÉNDICE 1: MANUAL DE USO DEL TRINEO

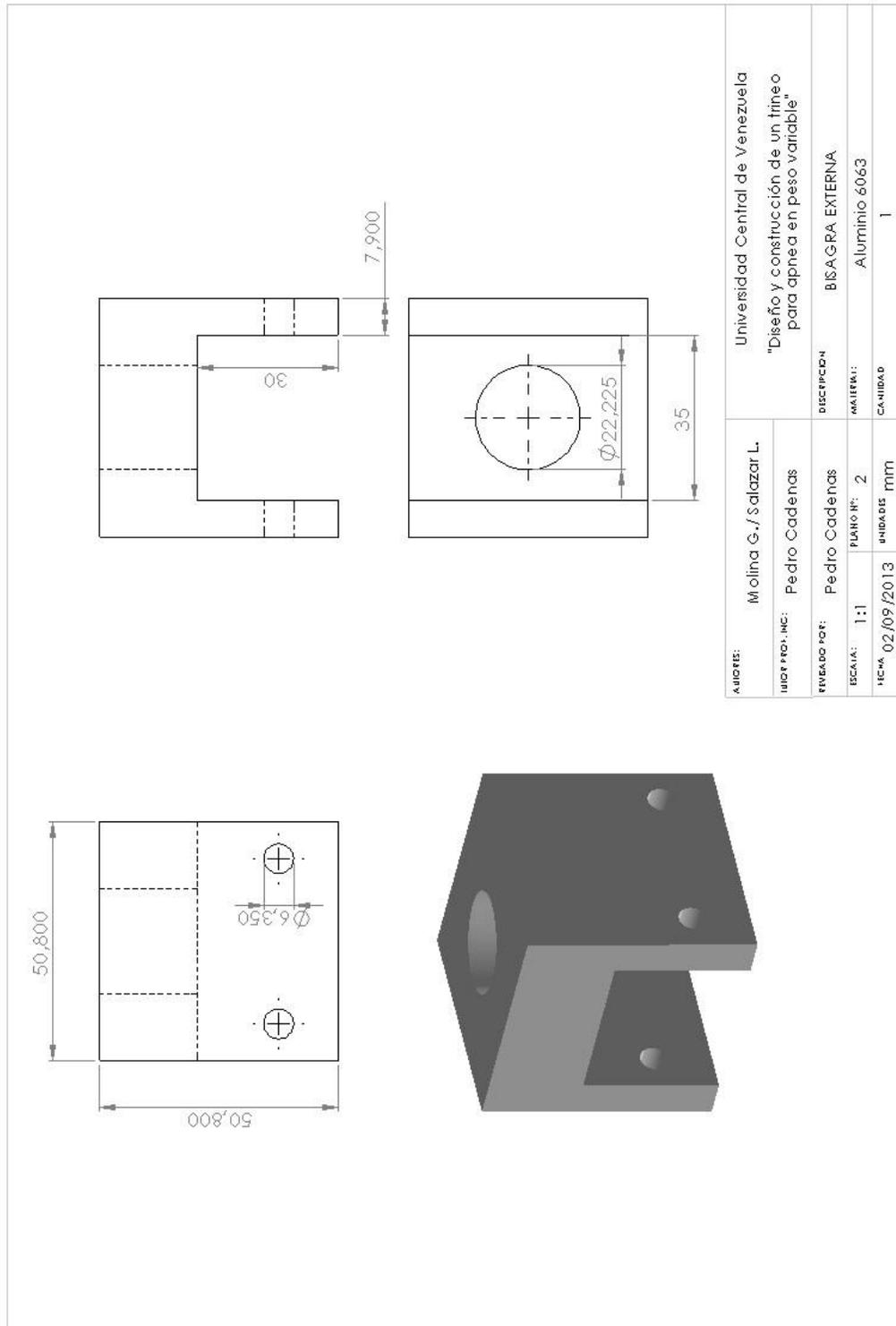
#### PREPARACIÓN Y MONTAJE

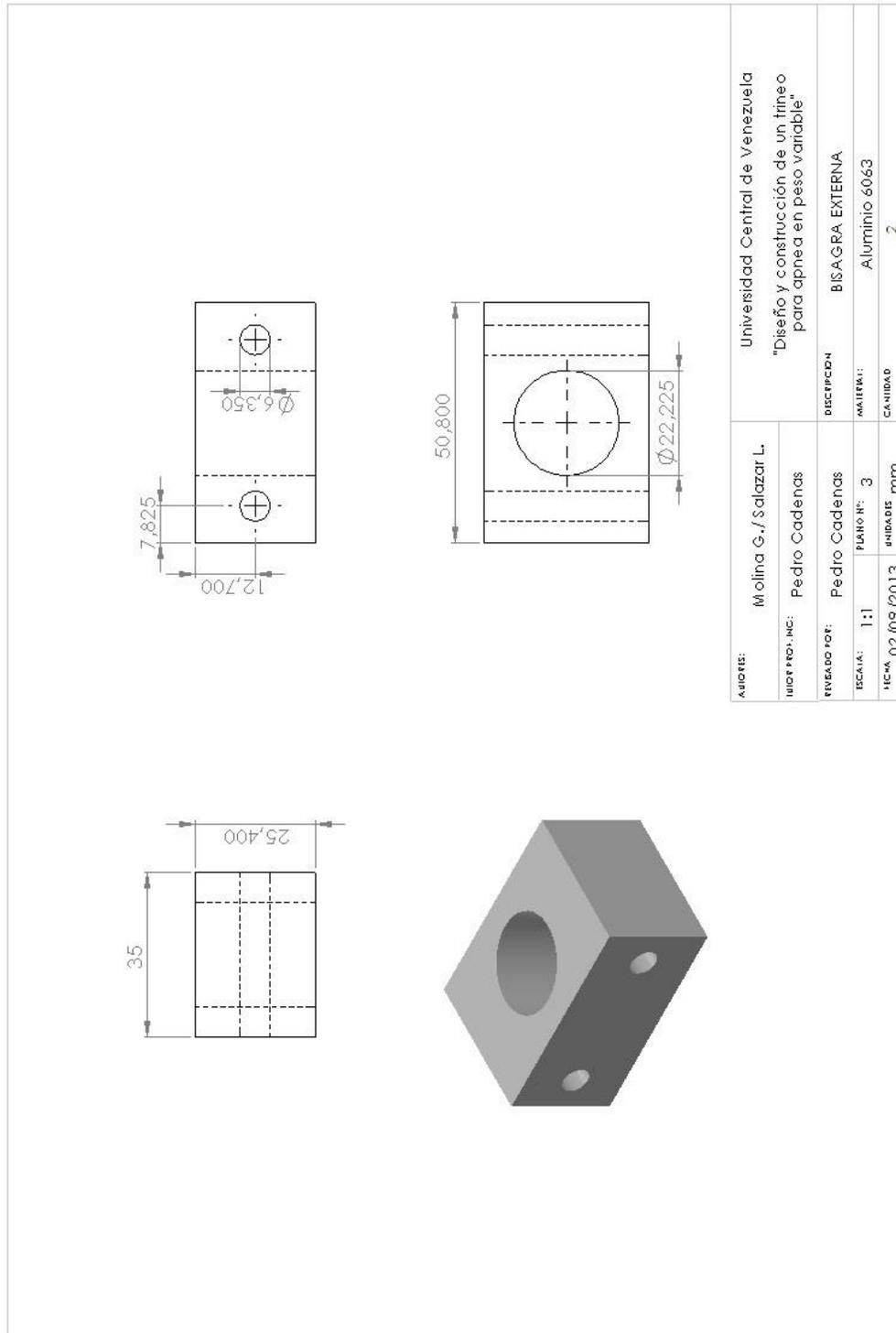
- (a) En la embarcación, extender la estructura principal y colocar los 2 pernos de  $\frac{1}{4}$  pulg x  $2 \frac{1}{2}$  pulg de cada uno de los 2 sistemas de bisagras.
- (b) Instalar el freno de mano en su alojamiento y colocar sus 2 pernos de sujeción. El freno debe permitir el paso de la soga.
- (c) Ubicar el agarre del brazo a la altura deseada y apretar el perno de la abrazadera. Si es necesario el uso de la cámara, instalar el tubo de la cámara en la estructura y apretar el perno de la abrazadera.
- (d) Colocar el perfil a la altura deseada y apretar el perno de la abrazadera.
- (e) Introducir la soga a través de toda la estructura metálica y colocar el tope en la marca deseada.
- (f) Verificar que el freno funcione eficientemente.
- (g) Suspender el trineo en la superficie del mar, mediante la línea con el contrapeso.
- (h) Emplazar la ranura de los pesos a lo largo del tubo principal y apoyar sobre el soporte del perfil, rotar el peso consiguiente en  $180^\circ$ , asegurarse de que las guías calcen entre ellas, impidiendo que los lastres se salgan hacia los lados del tubo. Es conveniente realizar esta operación entre 2 personas: una desde la embarcación le pasa los lastres a otra que se encuentra en el agua al lado del trineo suspendido. Mover los pesos cuidadosamente para evitar accidentes (caída del lastre sobre los pies de la persona en la embarcación o sobre la cabeza de la persona en el mar, caída del lastre al fondo del mar, etc.)  
**ATENCIÓN:** Colocar los lastres mientras el trineo esté en posición vertical exclusivamente para evitar someter el sistema a flexión.
- (i) Ubicarse con la monoaleta dentro del perfil y sujetar un brazo del agarre lateral, manteniendo la otra mano en la palanca del freno.
- (j) Cuando el atleta esté listo para descender, soltar el trineo.

#### ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

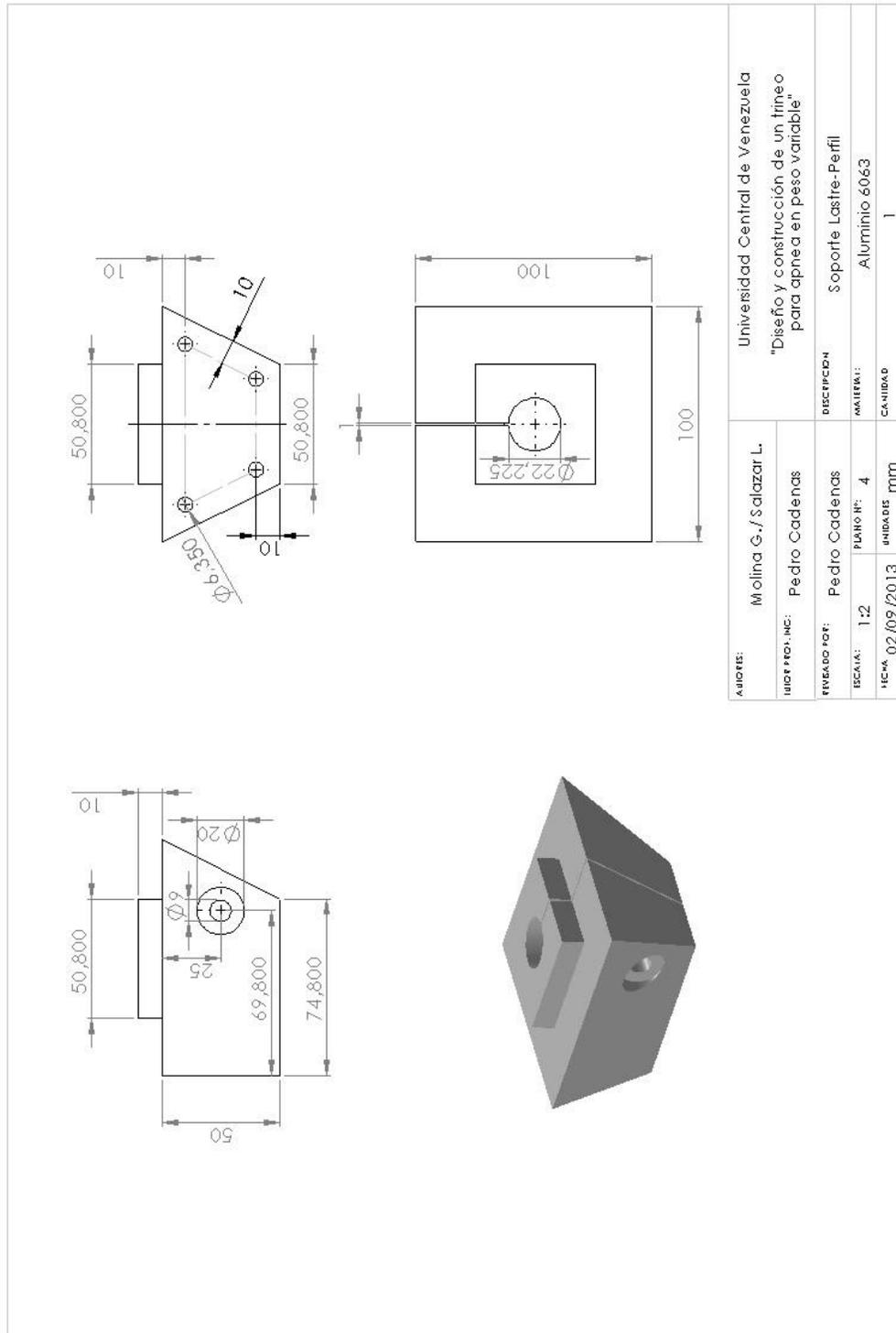
- a) Desarmar todo el conjunto, invirtiendo los pasos del ensamblaje.  
**ATENCIÓN:** Subir el trineo a velocidad moderada, y retirar los lastres antes de colocar el trineo en la embarcación.
- b) Limpiar con abundante agua todas las piezas a fin de retirar cualquier resto de sal marina que pueda corroer la estructura.
- c) Almacenar todos los componentes por separado y con la protección adecuada.
- d) Evitar golpear las piezas en el traslado, en el caso del perfil puede causar una grieta o rotura del mismo.

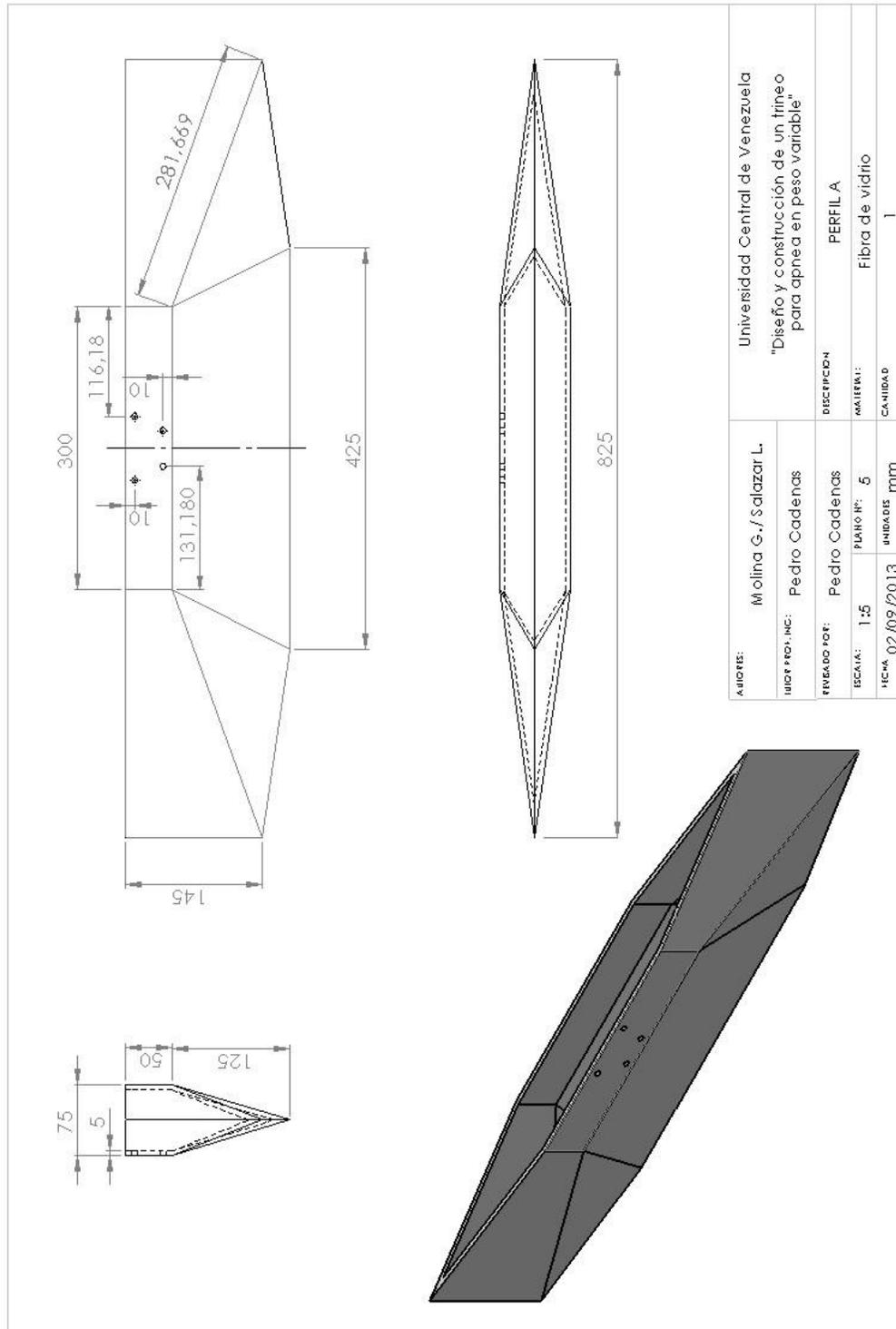




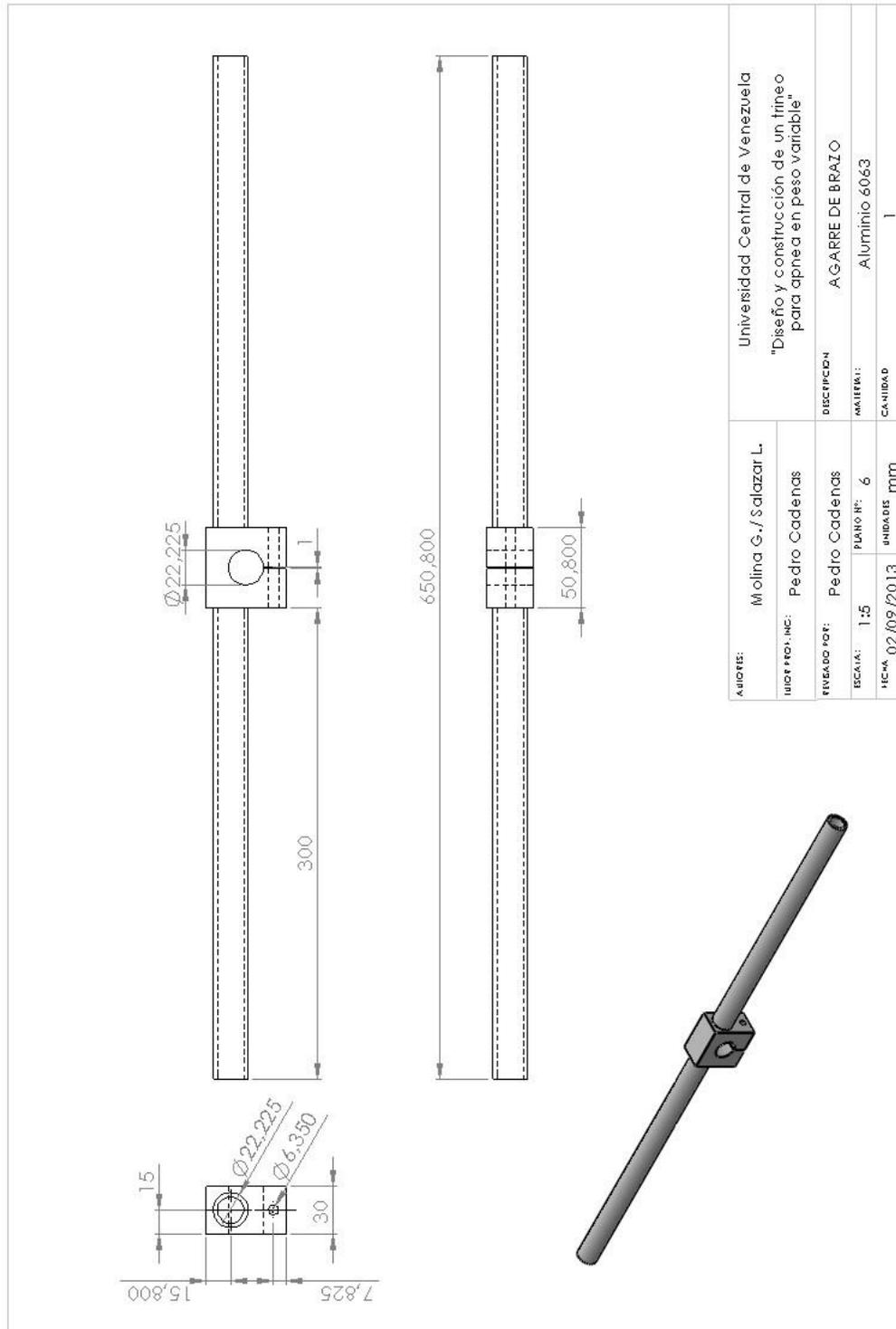


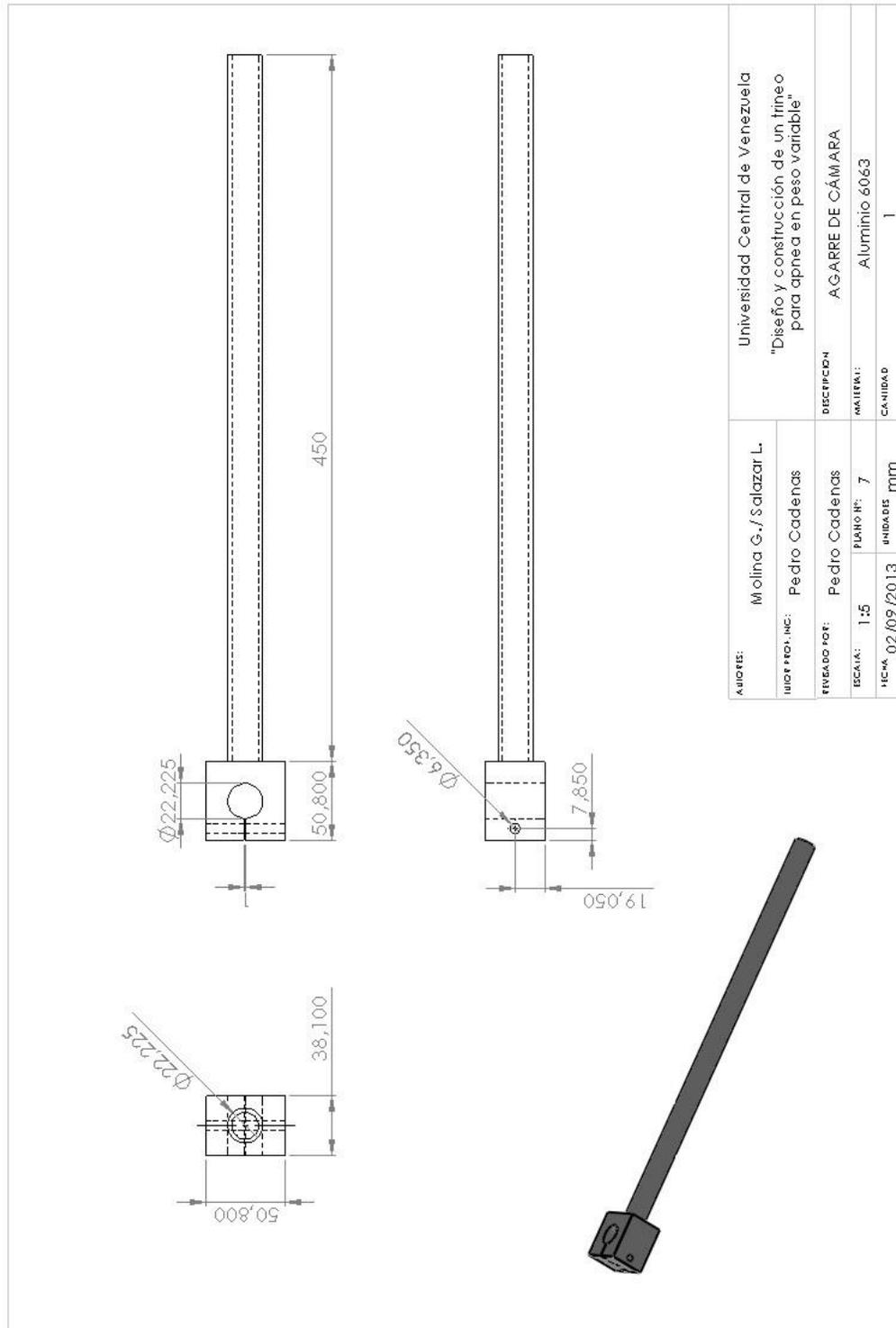
AUTORES:		Molina G./ Salazar L.		Universidad Central de Venezuela	
DISEÑO PROF. INC:		Pedro Cadenas		"Diseño y construcción de un trineo para apnea en peso variable"	
REVISADO POR:		Pedro Cadenas		DESCRIPCIÓN	
ESCALA:		1:1		MATERIA:	
FECHA:		02/09/2013		BISAGRA EXTERNA	
		UNIDADES		MATERIA:	
		mm		Aluminio 6063	
				CANTIDAD	
				2	

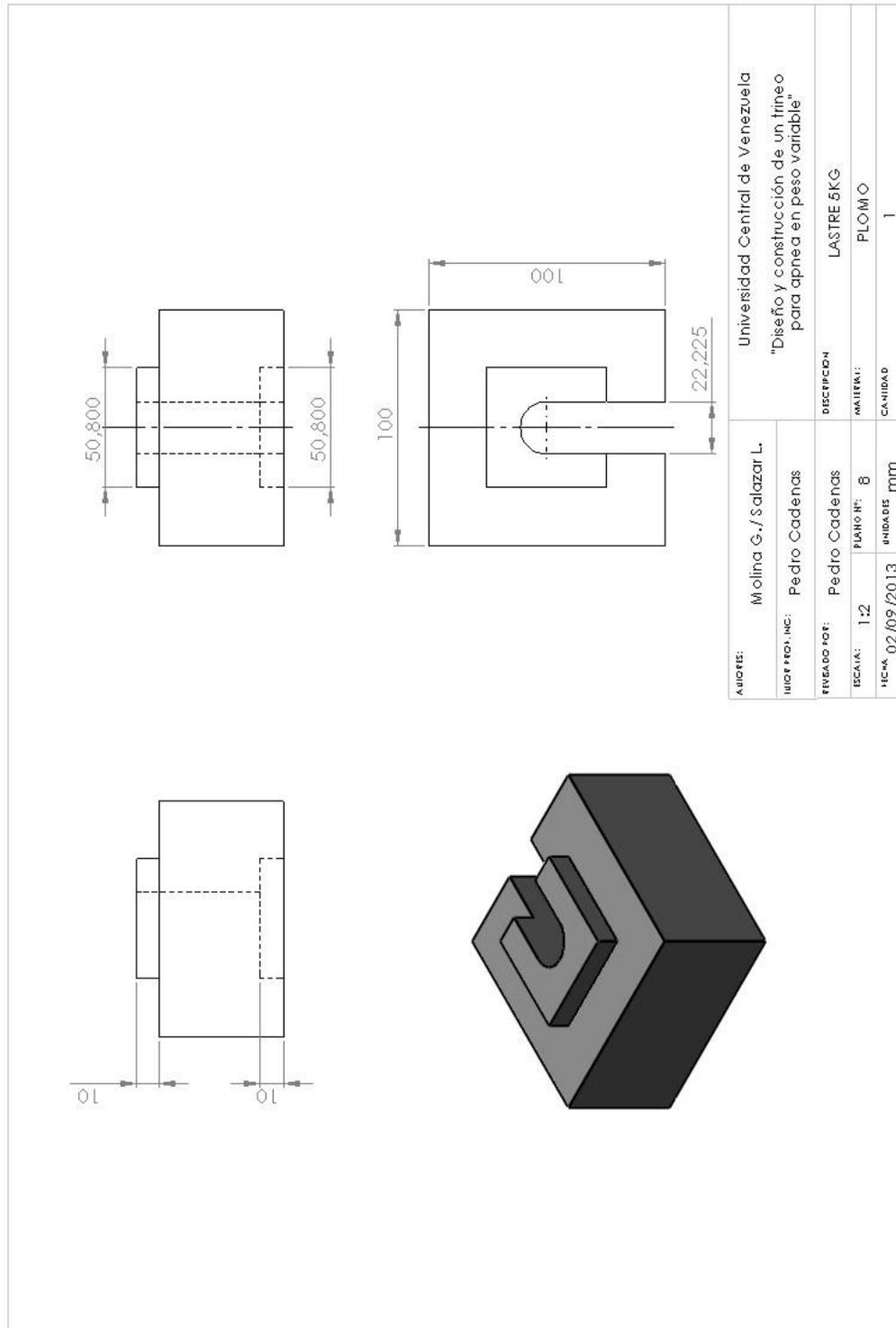




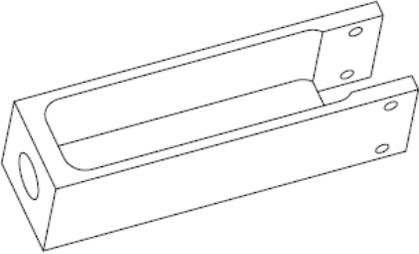
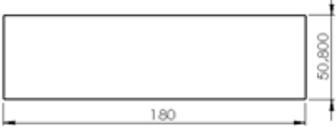
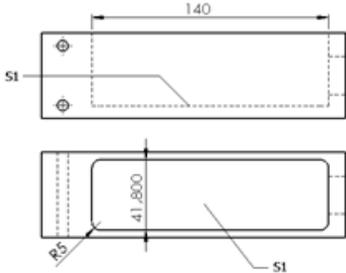
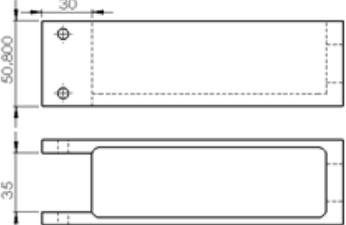
AUTORE:	Molina G./ Salazar L.	Universidad Central de Venezuela
DISEÑO POR:	Pedro Cadenas	"Diseño y construcción de un trineo para apnea en peso variable"
REVISADO POR:	Pedro Cadenas	DESCRIPCION
ESCALA:	1:5	MATERIAL:
PLANO N°:	5	CANTIDAD
FECHA:	02/09/2013	
UNIDADES:	mm	
		PERFIL A
		Fibra de vidrio
		1



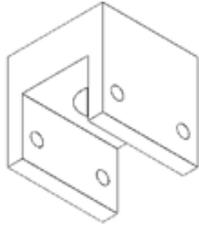
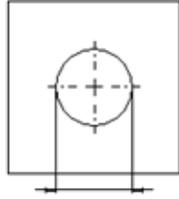
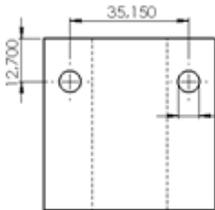
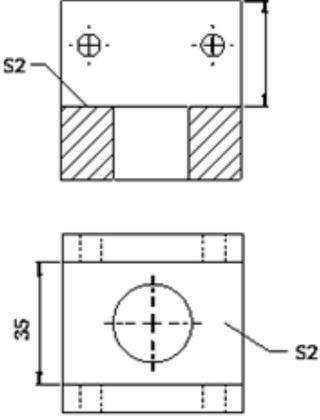




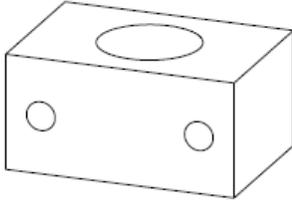
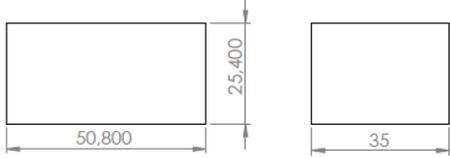
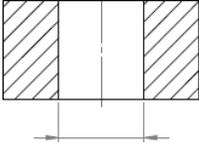
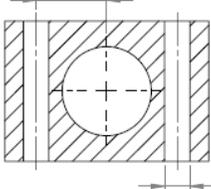
**APENDICE 3: PLANES DE FABRICACIÓN**

U.C.V	PLAN DE FABRICACIÓN		HOJA N°	
<b>Producto</b>	Trineo para Apnea			
<b>Pieza</b>	Alojamiento del Freno			
<b>Cantidad</b>	1			
<b>Material</b>	Aluminio			
<b>Diseño</b>	Molina G./ Salazar L.			
<b>Preparado</b>	Molina G./ Salazar L.			
<b>Fecha</b>	02/09/2013			
Fase	Descripción	Máquina	Herramientas de corte y medicion	Detalles
1	Refrentado Mecanizado de la pieza en bruto a medidas 50,8x50,8x18	Torno paralelo	Cuchilla de refrentar, comparador	
2	Taladrado Mecanizado del agujero guia para el tubo, profundidad 10 mm	Torno paralelo	Broca de $\varnothing 7/8"$	
3	Taladrado Mecanizado de los agujeros para la bisagra	Taladro	Broca de $\varnothing 1/4"$ , Vernier	
4	Fresado Mecanizado de la ranura para el freno a 43mm de profundidad	Fresadora Universal	Fresa Frontal-Tangencial de $\varnothing 10$ mm, Vernier	
	Fresado Mecanizado de la ranura para la Bisagra-Interna,	Fresadora Universal	Fresa Frontal-Tangencial de cualquier diametro dentro de los parámetros. Vernier	

APÉNDICES

U.C.V	PLAN DE FABRICACIÓN		HOJA N°	
<b>Producto</b>	Trineo para Apnea			
<b>Pieza</b>	Bisagra-Externa			
<b>Cantidad</b>	1			
<b>Material</b>	Aluminio			
<b>Diseño</b>	Molina G./ Salazar L.			
<b>Preparado</b>	Molina G./ Salazar L.			
<b>Fecha</b>	02/09/2013			
Fase	Descripción	Máquina	Herramientas de corte y medicion	Detalles
1	Refrentado Mecanizado de la cara para llevar la pieza a medidas 50,8x50,8x50,	Torno Paralelo	Cuchilla de refrentar, comparador	 <p>S1</p>
2	Taladrado Mecanizado del agujero guía para el tubo, profundidad 25,4mm	Torno Paralelo	Broca de centro, Broca de $\varnothing 7/8"$ , Vernier	
3	Taladrado Mecanizado de los agujeros para la bisagra	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 1/4"$ , Vernier	
4	Fresado Mecanizado de la ranura para la Bisagra-Interna, Profundidad 30mm	Fresadora Universal	Fresa Tangencial de cualquier diámetro dentro de los parámetros, Vernier	 <p>S2</p>

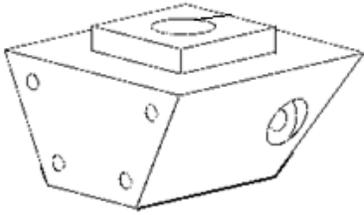
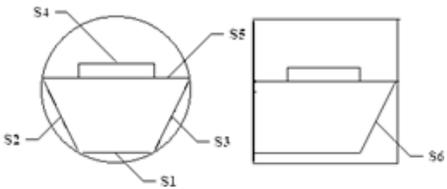
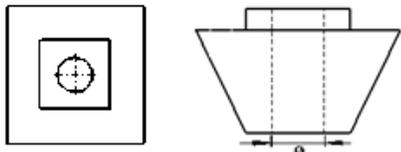
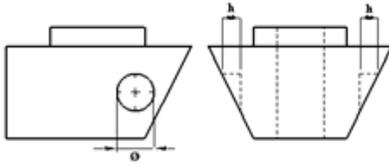
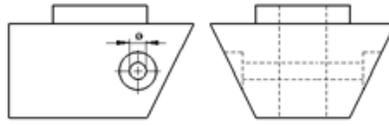
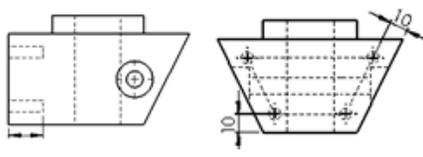
# APÉNDICES

U.C.V	PLAN DE FABRICACIÓN		HOJA N°	
<b>Producto</b>	Trineo para Apnea			
<b>Pieza</b>	Bisagra-Interna			
<b>Cantidad</b>	2			
<b>Material</b>	Aluminio			
<b>Diseño</b>	Molina G./ Salazar L.			
<b>Preparado</b>	Molina G./ Salazar L.			
<b>Fecha</b>	02/09/2013			
Fase	Descripción	Máquina	Herramientas de corte y medicion	Detalles
1	<u>Refrentado</u> Mecanizado de las caras para llevarla a medidas 50,8x35x25,4	Fresadora Universal	Fresa Tangencial de cualquier diámetro, Vernier	
2	<u>Taladrado</u> Mecanizado del agujero guia para el tubo	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 7/8"$ , Vernier	
3	<u>Taladrado</u> Mecanizado de los agujeros para la bisagra, a 17,575mm del centro	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 1/4"$ , Vernier	

APÉNDICES

U.C.V	PLAN DE FABRICACIÓN		HOJA N°	
Producto	Trineo para Apnea			
Pieza	Soporte Lastre-Agarre Perfil			
Cantidad	1			
Material	Aluminio			
Diseño	Molina G./ Salazar L.			
Preparado	Molina G./ Salazar L.			
Fecha	02/09/2013			
Fase	Descripción	Máquina	Herramientas de corte y	Detalles
1	Mecanizado de cilindro de $\varnothing 10$ cm hasta las superficies requerida	CNC	Fresa Frontal-Tangencial de cualquier diámetro, Vernier Programa CNC	
2	Taladrado Mecanizado del agujero guía para el tubo	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 7/8"$ , Vernier	
3	Fresado Mecanizado del asiento del perno hasta la profundidad h	Fresadora	Broca de centro, Broca de $\varnothing 11/32"$ , Vernier	
4	Taladrado Mecanizado del agujero de abrazadera	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 11/32"$ , Vernier	
5	Roscado para los pernos que sujetan al perfil, hasta profundidad 3/4"	Giramacho	broca 5,2 mm, giramachos, macho para rosca de $\varnothing 1/4"$ , Vernier	
6	Ranurado para el sistema de abrazadera de espesor 1mm hasta la parte central	sierra	Hoja de sierra	

APÉNDICES

U.C.V	PLAN DE FABRICACIÓN		HOJA N°	
Producto	Trineo para Apnea			
Pieza	Soporte Lastre-Agarre Perfil			
Cantidad	1			
Material	Aluminio			
Diseño	Molina G./ Salazar L.			
Preparado	Molina G./ Salazar L.			
Fecha	02/09/2013			
Fase	Descripción	Máquina	Herramientas de corte y	Detalles
1	Mecanizado de cilindro de $\varnothing 10$ cm hasta las superficies requerida	CNC	Fresa Frontal-Tangencial de cualquier diámetro, Vernier Programa CNC	
2	Taladrado Mecanizado del agujero guía para el tubo	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 7/8"$ , Vernier	
3	Fresado Mecanizado del asiento del perno hasta la profundidad h	Fresadora	Broca de centro, Broca de $\varnothing 11/32"$ , Vernier	
4	Taladrado Mecanizado del agujero de abrazadera	Taladro	Broca de centro, Broca de $\varnothing 11/32"$ , Vernier	
5	Roscado para los pernos que sujetan al perfil, hasta profundidad 3/4"	Giramacho	broca 5,2 mm, giramachos, macho para rosca de $\varnothing 1/4"$ , Vernier	
6	Ranurado para el sistema de abrazadera de espesor 1mm hasta la parte central	sierra	Hoja de sierra	