



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y
Recursos Naturales**

**PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA SUSTENTAR
HIDRODINÁMICAMENTE EL MODELO DE UN BUQUE MEDIANTE UN
SISTEMA DE FOLIOS**

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de

INGENIERO NAVAL

Presentado por

Néstor John Vallejo Delgado

Guayaquil – Ecuador

2014

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todo, a mi familia por el apoyo incondicional brindado, a mis amigos que brindaron su apoyo en todo momento, y de manera especial al Ph. D. José R. Marín López por la paciencia y guía en este proyecto y a lo largo de mi carrera estudiantil.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres y hermanos por brindarme su apoyo y su motivación en todo momento. A toda mi familia por su cariño inagotable y a mis amigos que me acompañaron y brindaron su apoyo incondicional.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

Néstor John Vallejo Delgado

TRIBUNAL DE GRADO

Marco Velarde Toscano, M. Sc .

Presidente del Tribunal

José R. Marín López, Ph.D.

Director de Tesis

Roberto Morante Villarreal, Ing

Miembro Principal

Alejandro Chanaba Ruiz, M. Sc.

Miembro Suplente

RESUMEN

Actualmente en nuestro país la información sobre embarcaciones equipadas con sistemas de folios es muy escasa, por lo que en la presente tesis se desarrolla este proyecto en el que se construye y prueba un sistema de Folios para sustentar un modelo de 1.3 m de eslora. Asumiendo que el centro de gravedad del modelo se encuentra cerca de la sección Media del mismo, se elige una configuración del tipo Tandem con un sistema de control en "V" ("Surface Piercing"). El perfil elegido para los folios es similar al de las puntas de las palas de las hélices de la serie B-Wageningen, con base plana y parte superior con forma de arco circular; sus dimensiones se seleccionaron utilizando la Teoría Bidimensional mediante un proceso iterativo: cuerda de 6,5 cm y longitud de 50 cm. Luego mediante el uso del programa computacional COMSOL, [18], se realizó un análisis numérico bidimensional del flujo viscoso sobre el perfil, en el cual se determinan los campos de presión, y el análisis simplificado de Cavitación indica que este fenómeno no causará problemas en el modelo.

Para el cálculo estructural, se considera al sistema de folios como una cercha simplemente soportada en sus extremos superiores. Fue necesario determinar la rigidez flexural de la Sección mediante una prueba

experimental de Flexión con una probeta que posee la misma Sección Transversal y material que el Sistema de Folios. A partir de esta información, se modela el Sistema y se realiza un análisis estructural simplificado mediante el método de los Elementos Finitos. El Sistema de Folios se diseñó con un método el cual permite acoplarlos de manera sencilla al modelo, que consiste en un solo punto de sujeción por banda, esto además permite su rotación, para variar el ángulo de ataque de acuerdo a las exigencias al momento de la operación.

Para las pruebas experimentales se haló el modelo desde una lancha en zona de aguas tranquilas. Se realizan mediciones de resistencia mediante una celda de carga en la proa del modelo, en dos condiciones de carga y a diferentes velocidades. Además se realiza comparaciones del comportamiento del modelo a diferentes configuraciones del ángulo de ataque del sistema de folios, 10° y 5° , y, de 5° y 0° para los folios de Proa y Popa, respectivamente. Se obtuvo la tendencia esperada en las curvas de resistencia, con un incremento para el régimen de casco sumergido, y con una reducción en dicha fuerza al alcanzar el despegue. Finalmente se realizan las mediciones de resistencia en la embarcación sin Sistema de Folios, obteniéndose que a la máxima velocidad, dicha fuerza es mayor.

A partir de la información obtenida anteriormente se realiza un diseño preliminar de un Sistema de Folios para una embarcación prototipo de 8 m de eslora aplicando los parámetros que se utilizaron en el modelo. Se obtienen resultados en los cuales hay una reducción en la resistencia al avance y por ende en la potencia requerida. Con lo que finalmente se puede concluir que el método de diseño utilizado fue de fácil implementación, y aunque los resultados teóricos se diferenciaron de los experimentales, resulta en una opción viable para un diseño preliminar.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VII
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XIX
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1: DISEÑO DE UN SISTEMA DE FOLIOS.....	4
1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	4
1.2 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN Y TIPO DE SISTEMAS DE FOLIOS A UTILIZARSE.	9
1.3 SELECCIÓN DEL PERFIL Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS FOLIOS.	14
1.4 ANÁLISIS NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DEL FOLIO.....	23
1.5 ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE LA CAVITACIÓN.....	28
CAPITULO 2: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE FOLIOS.....	37
2.1 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LA VIGA-FOLIO.....	37
2.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS FOLIOS.	47
2.3 SISTEMA PARA ADAPTAR LOS DIFERENTES SISTEMAS DE FOLIOS.	51

CAPITULO 3: PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL	55
3.2 RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.	62
3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.	69
CAPITULO 1: APLICACIÓN PRELIMINAR DE FOLIOS A UNA EMBARCACIÓN	84
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMBARCACIÓN.	84
4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS FOLIOS	88
4.3. ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FOLIOS INSTALADOS EN LA EMBARCACIÓN.....	93
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES.....	102
ANEXOS	104
BIBLIOGRAFIA	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de la embarcación Pesquera.....	5
Figura 2: Plano de Líneas de Formas del Modelo.	7
Figura 3: Distribución de los Componentes de la Resistencia, Operación de Estabilización y Elevación de una Embarcación con Hidrofolios, [2]	10
Figura 4: Sistemas de Control en los Folios, [2].....	12
Figura 5: Configuración de los Folios, [1].....	13
Figura 6: Partes del Folio	15
Figura 7: Modo de operación de los Folios	16
Figura 8: Perfil del Folio	17
Figura 9: Curva de Coeficiente de Sustentación vs Angulo de Ataque.....	19
Figura 10: Curva de Coeficiente de Arrastre vs Angulo de Ataque.....	20
Figura 11: Perfil Folio AG-38.....	20
Figura 12: Bosquejo del Túnel de Prueba.....	24
Figura 13: Discretización del Subdominio	24
Figura 14: Medición de Campo de Velocidad, 0° Angulo de Ataque.....	26

Figura 15: Medición de Campo de Velocidad, 5° Angulo de Ataque.....	26
Figura 16: Medición de Campo de Velocidad, 10° Angulo de Ataque.....	27
Figura 17: Distribución de Presión a 10° de Angulo de Ataque	29
Figura 18: Distribución de Presión a 5° de Angulo de Ataque	29
Figura 19: Distribución de Presión a 0° de Angulo de Ataque	30
Figura 20: Variación del Coeficiente de Sustentación con Relación al Angulo de Ataque.....	31
Figura 21: Variación del Coeficiente de Arrastre con Relación al Coeficiente de Sustentación	32
Figura 22: Variación de la Presión a diferentes profundidades de Inmersión, a 10° de Angulo de Ataque.	34
Figura 23: Variación de la Presión a diferentes profundidades de Inmersión, a 5° de Angulo de Ataque.	34
Figura 24: Variación de la Presión a diferentes profundidades de Inmersión, a 0° de Angulo de Ataque.	35
Figura 25: Prueba Experimental de Flexión	39
Figura 26: Curva de Deformaciones Unitarias vs Carga Aplicada	40
Figura 27: Curva de Desplazamientos vs Carga Aplicada.....	40
Figura 28: Modelo Estructural, Embarcación Adrizada	43
Figura 29: Grafica de Momentos Flectores con la Embarcación Adrizada.....	43

Figura 30: Modelo Estructural, Embarcación Escorada.....	44
Figura 31: Grafico de Momentos Flectores en la Embarcación Escorada	44
Figura 32: Proceso de Diseño de los Folios.....	48
Figura 33: Construcción de los moldes machos de los Folios	48
Figura 34: Esquema del Método RTM,	49
Figura 35: Construcción en Fibra de Vidrio.....	50
Figura 36: Acabado y Recubrimiento con Poliuretano	50
Figura 37: Esquema de los Folios.....	52
Figura 38: Sistema de Sujeción de los Folios	53
Figura 39: Diseño de Sistema de Folios Instalados en el Modelo.....	54
Figura 40: Esquema de Accesorios y Equipos utilizados en las Pruebas Experimentales, [13].	56
Figura 41: Determinación experimental del LCG, Cond. de Carga 1 sin Folios.	60
Figura 42: Determinación experimental del LCG, Cond. de Carga 1 con Folios.	60
Figura 43: Resumen de Resultados de Resistencia al Avance para diferentes Condiciones de Trabajo.	63
Figura 44: Resistencia al Avance con y sin en Condición de Carga 1 (Ligera). ..	65

Figura 45: Resistencia al Avance con y sin en Condición de Carga 2 (Cargado).....	65
Figura 46: Proceso de Sustentación para el Modelo con Folio de Proa a 5° y el de Popa a 0°, Condición de Carga 1	66
Figura 47: Proceso de Sustentación para el Modelo con Folio de Proa a 10° y el de Popa a 5°, Condición de Carga 1	67
Figura 48: Proceso de las pruebas de Remolque para modelo sin Folios, Condición de Carga 1	68
Figura 49: Curvas de Resistencia para las dos Condiciones de Carga, para el Modelo sin Folios	73
Figura 50: Resultados Teóricos de Resistencia al Avance del Modelo con Sistema de Folios en diferentes condiciones de Trabajo	77
Figura 51: Variación del Angulo de Ataque de los Folios con Relación al Cambio de Asiento del Modelo.	78
Figura 52: Velocidad de Despegue Experimental y Teórica para la Condición de Carga 1	79
Figura 53: Velocidad de Despegue Experimental y Teórica para la Condición de Carga 2	80
Figura 54: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 1, Folio de Proa a 5° y Folio de Popa a 0°.	81

Figura 55: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 1, Folio de Proa a 10° y Folio de Popa a 5°.	82
Figura 56: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 2, Folio de Proa a 10° y Folio de Popa a 5°.	82
Figura 57: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 1, Folio de Proa a 10° y Folio de Popa a 5°.	83
Figura 58: Embarcación Planeadora modelada en 3D	86
Figura 59: Curvas Hidrostáticas de la Embarcación	87
Figura 60: Dimensiones de los folios y la embarcación.	89
Figura 61: Representación de las Fuerzas Actuantes durante la Sustentación, y la ubicación del LCG de la Embarcación	89
Figura 62: Velocidad vs Sustentación de los folios de la Embarcación	92
Figura 63: Resistencia al Avance para las dos Condiciones de Carga	95
Figura 64: Accesorio para Simulación de Carga Puntual.....	108
Figura 65: Indicador de Caratula.....	109
Figura 66 Extensómetro Instalado y Dispositivo para Adquisición de Datos...	109
Figura 67: Equipos Instalados para la Prueba de Flexión.....	110
Figura 68: Curva de Deformaciones Unitarias vs Carga Aplicada	110
Figura 69: Curva de Desplazamientos vs Carga Aplicada.....	111
Figura 70: Resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 1	114

Figura 71: Resultados de Resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 2.....	115
Figura 72: Resultados de Resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 3.....	116
Figura 73: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C1F10A5	117
Figura 74: Resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 1.....	118
Figura 75: Resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 2.....	119
Figura 76: Resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 3.....	120
Figura 77: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C1F5A0	121
Figura 78: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 1.....	122
Figura 79: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 2.....	123
Figura 80: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 3.....	124
Figura 81: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 4.....	125
Figura 82: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 5.....	126
Figura 83: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C1WF	127
Figura 84: Resultados de Resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 1.....	128
Figura 85: Resultados de Resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 2.....	129
Figura 86: Resultados de Resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 3.....	130
Figura 87: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C2F10A5	131
Figura 88: Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 1.....	132
Figura 89: Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 2.....	133

Figura 90: Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 3.....	134
Figura 91: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C2F5A0	135
Figura 92: Resultados de Resistencia al Avance C2WF, velocidad 1.....	136
Figura 93: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 2.....	137
Figura 94: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 3.....	138
Figura 95: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C2WF	139
Figura 96: Proceso de Diseño del Sistema de Folios	141

INDICE DE TABLAS

Tabla I: Dimensiones Principales del Modelo	6
Tabla II: Dimensionamiento Teórico de los Folios	22
Tabla III: Características Físicas del Fluido	24
Tabla IV: Distribución de Velocidades Máximas y Mínimas	27
Tabla V: Coeficientes de Sustentación y Arrastre para el Folio a diferentes Ángulos de Ataque.....	31
Tabla VI: Presión de Vapor de Agua para Diferentes Temperaturas	33
Tabla VII: Condición de Estabilidad 1, Embarcación Adrizada	45
Tabla VIII: Condición de Estabilidad 2, Embarcación Escorada.	46
Tabla IX: Listado de Equipos usados en el desarrollo de la Prueba Experimental.	57
Tabla X: Esquema de las condiciones de trabajo a las cuales se desarrollaran las pruebas de Resistencia.	59
Tabla XI: Peso y Ubicación del LCG para Condición de Trabajo.....	61
Tabla XII: Rangos de Aplicación del Método de Holtrop, [14].....	71
Tabla XIII: Evaluación del Modelo a Aplicar el Método de Holtrop.....	72
Tabla XIV: Variación de la Resistencia Total Experimental para el modelo equipado con Folios en función de la Velocidad.	76

Tabla XV: Dimensiones Principales de la Embarcación	85
Tabla XVI: Condiciones de Carga de la Embarcación	90
Tabla XVII: Dimensiones Principales y Condiciones de Trabajo de los Folios..	91
Tabla XVIII: Resistencia Generada para cada Condición de Carga	94
Tabla XIX: Potencia al Eje para las diferentes Condiciones de Trabajo	95
Tabla XX: Desempeño de los Motores Fuera de Borda para cada Condición de Carga	96
Tabla XXI: Consumo de Combustible para diferentes Condiciones de Trabajo	97
Tabla XXII: Condiciones de trabajo para las pruebas de Resistencia.....	113
Tabla XXIII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 1	114
Tabla XXIV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 2.....	115
Tabla XXV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 3.....	116
Tabla XXVI: Resumen de resultados C1F10A5	117
Tabla XXVII: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 1	118
Tabla XXVIII: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 2.....	119

Tabla XXIX: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 3.....	120
Tabla XXX: Resumen de resultados C1F5A0	121
Tabla XXXI: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 1	122
Tabla XXXII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 2.....	123
Tabla XXXIII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 3.....	124
Tabla XXXIV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 4.....	125
Tabla XXXV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 5.....	126
Tabla XXXVI: Resumen de resultados C1WF.....	127
Tabla XXXVII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 1	128
Tabla XXXVIII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 2.....	129
Tabla XXXIX: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 3.....	130

Tabla XL: Resumen de resultados C2F10A5.....	131
Tabla XLI: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 1.....	132
Tabla XLII: Resumen de Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 2.....	133
Tabla XLIII: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 3.....	134
Tabla XLIV: Resumen de resultados C2F5A0	135
Tabla XLV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2WF, velocidad 1.....	136
Tabla XLVI: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 2.....	137
Tabla XLVII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 3.....	138
Tabla XLVIII: Resumen de resultados C2WF	139

INTRODUCCION

En un bote la función principal de un sistema de folios es elevar el casco fuera del agua para disminuir la resistencia al avance de la embarcación, [2], y además produce una disminución a la respuesta al oleaje, cuando este es pequeño, [4]. A velocidades bajas el casco de un buque se encuentra completamente sumergido, y conforme aumenta su velocidad se genera una fuerza de sustentación sobre los folios, pudiendo levantarla completamente fuera del agua, [1]. Estos folios mencionados son apéndices con sección transversal, similar al ala de un avión, y su dimensionamiento se lo realiza con relación al desplazamiento, distribución de pesos y velocidad de trabajo de la embarcación.

Se puede mencionar como desventajas posibles del uso de folios en embarcaciones, el problema de la cavitación debido a presiones muy negativas en la cara superior; esto aumentaría la resistencia y además desgastaría de manera considerable el material, [1]. Otro potencial problema es la necesidad de métodos activos de control, para reducir el movimiento vertical en la embarcación producido por un oleaje pronunciado. También se debe tener en cuenta el lugar donde se navega, refiriéndose principalmente a la profundidad y objetos que se encuentren

en el agua, ya que estos son los principales causantes de daño por impacto durante la navegación.

En el proceso de diseño de los folios para adaptarlos en un bote en forma simple se puede asumir el flujo como bidimensional y despreocuparse de los efectos de la cavitación. Luego para proceder con la construcción se presentan varios problemas, debido a las dimensiones y formas de este apéndice las cuales son bastante singulares con especial énfasis en los bordes de entrada y salida del fluido.

Al momento en el Ecuador no se conoce de experiencia práctica en lo que concierne a embarcaciones equipadas con sistemas de folios, y el tema es desconocido para muchas personas que se encuentran en el medio. El desarrollar pruebas con modelos puede brindar una guía para futuros diseños de embarcaciones equipadas con folios.

Objetivo General

Diseñar y probar un sistema de folios para el modelo de una embarcación, y diseñar preliminarmente el sistema para un bote planeador.

Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de hidrofolios basado en teoría Bidimensional para sustentar hidrodinámicamente el modelo de una embarcación.
- Construir e instalar un sistema de folios tipo en V (“Surface piercing”) para el modelo.
- Realizar pruebas experimentales del modelo sustentado en folios para compararlos con los resultados teóricos en diferentes condiciones de operación.
- Seleccionar preliminarmente el sistema de folios para una embarcación planeadora y evaluar su desempeño.

Beneficios

Este trabajo mostrará una opción para diseñar y construir embarcaciones rápidas en el país, empleando un sistema de folios para sustentirlas hidrodinámicamente. Se demostrará mediante pruebas experimentales en modelos las ventajas que se pueden tener con este tipo de dispositivos.

Hipótesis

Un sistema de folios para sustentar hidrodinámicamente el casco de un modelo puede diseñarse preliminarmente aplicando teoría de folios bidimensionales y despreciando los efectos de la cavitación.

CAPÍTULO 1

DISEÑO DE UN SISTEMA DE FOLIOS

1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.

El modelo que será utilizado para realizar las pruebas de resistencia al avance y sustentación con un sistema de folios, tiene las formas de un buque pesquero con doble china y fue fabricado en madera. Posee una eslora de 1.30 m y peso de 7.7 kg en condición Ligera, esto es, sin considerar el sistema de folios. Normalmente para este tipo de diseños se utilizan embarcaciones con formas planeadoras, pero se utilizó un casco de buque pesquero por su disponibilidad en el Laboratorio de Ingeniería Naval.

El modelo que se va a utilizar para las pruebas de resistencia al avance y sustentación utilizando un sistema de folios pertenece a la Facultad de Ingeniería Marítima (FIMCBOR) de la ESPOL, y fue elaborado en madera de Laurel. El proceso de construcción se realizó mediante los planos de flotación y fue ensamblado mediante varias tiras de madera, como se puede apreciar en la Figura 1.



Figura 1: Modelo de la embarcación Pesquera

En la Tabla I se muestran las dimensiones y características principales del modelo mencionado, y que será parte del análisis desarrollado en este trabajo:

Eslora Total	130	Centímetros
Manga	33.0	Centímetros
Puntal	17.5	Centímetros
Calado	5.0	Centímetros
Desplazamiento Ligero	7.7	Kilogramos

Tabla I: Dimensiones Principales del Modelo

El modelo posee las formas de una embarcación pesquera con doble china y ángulo de astilla muerta de $9,68^\circ$. Estas características se pueden apreciar en el Plano de Líneas de Formas que se muestra en la Figura 2, que se preparó empleando el programa computacional GFormas, [11].

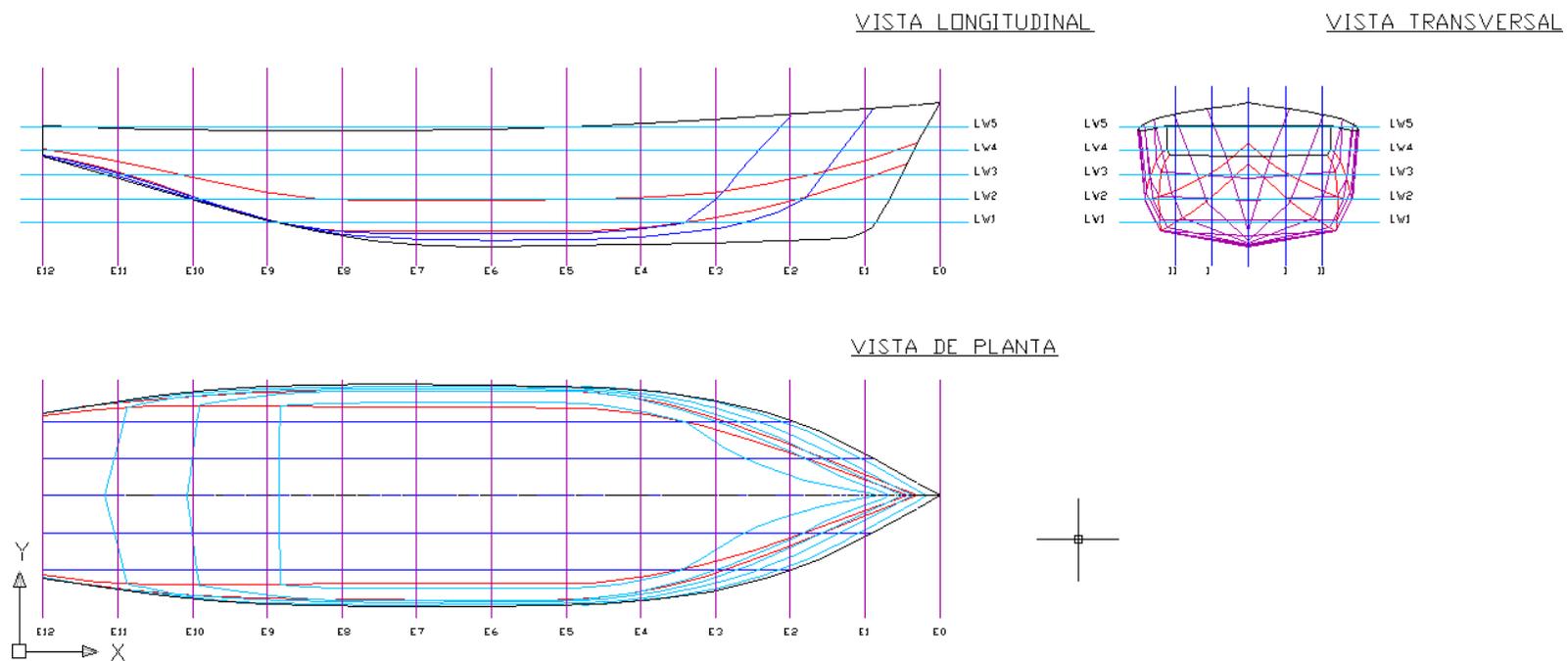


Figura 2: Plano de Líneas de Formas del Modelo.

Generalmente las embarcaciones que operan con un sistema de folios para la sustentación son del tipo planeador es decir con el espejo sumergido y una sola china. Estas formas son las adecuadas por motivos de resistencia al avance a bajas velocidades. Sin embargo en el presente estudio, por motivos de disponibilidad en el Laboratorio de Ingeniería Naval, se utilizó el casco de la embarcación pesquera descrita previamente que tiene el espejo únicamente sumergido de manera parcial.

1.2 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN Y TIPO DE SISTEMAS DE FOLIOS A UTILIZARSE.

La Fuerza de Sustentación generada depende de la velocidad de la lancha, y al incrementar logra que el casco se despegue completamente fuera del agua. Por motivos de control y estabilidad de la embarcación se elige para el presente proyecto el sistema de folios de tipo en “V” (“*Surface Piercing*”). Este esquema en condiciones de escora se estabiliza automáticamente por inmersión extra de área de folio. Además asumiendo que el centro de gravedad del modelo está alrededor de sección Media, se selecciona una configuración longitudinal del tipo “Tándem”, esto es, dos folios, con dimensiones similares en Proa y Popa.

Una embarcación equipada con un sistema de folios tiene dos modos de operación; el primero es el Normal, con velocidad baja, cuando se encuentra con el casco sumergido (“*hullborne mode*”). Luego incrementando la velocidad empieza el despegue (“*take off*”) que es el periodo de transición hasta alcanzar el segundo modo, Sustentado (“*foilborne mode*”), en el que el casco del buque queda totalmente suspendido fuera del agua. El despegue de la embarcación del agua por efecto de los folios generalmente se presenta después del punto de resistencia máxima (“*hump*”) como se indica en la Figura 3, tomado de [2].

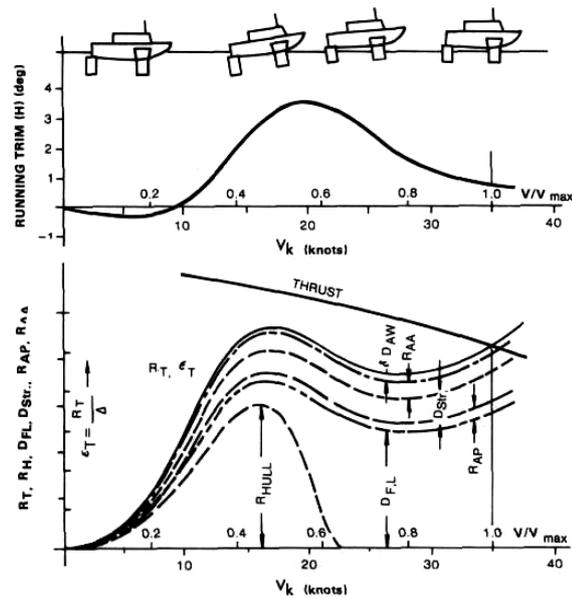


Figura 3: Distribución de los Componentes de la Resistencia, Operación de Estabilización y Elevación de una Embarcación con Hidrofolios, [2]

En el modo de Sustentación, la relación “Arrastre/Sustentación” debe ser adecuada para la operación indicada, y al mismo tiempo la embarcación debe ser capaz de mantenerse suspendida de una manera estable. Estos requerimientos son de alguna manera conflictivos, y además ellos dependen en gran manera de la velocidad. Como resultado, según [2], surgen diferentes diseños variando las configuraciones y sistemas de control para dar solución a estos requerimientos.

Existe una diferencia básica al momento de clasificar las embarcaciones con sistemas de folios, la cual es mediante los métodos de control y

estabilización una vez que se alcanza el modo de Sustentación. En la Figura 4, tomada de [2], se presentan de manera preliminar los folios de tipo en V (“*Surface Piercing Foils*”) y los de tipo en T (“*Submerged Foils*”) los cuales son utilizados como métodos de control y sustentación. En el presente caso se eligieron los folios con forma en V (“*Surface Piercing*”) caracterizado por su estabilidad estática y dinámica inherente en casos de cabeceo, rolido, guiñada y oscilación vertical, ya que los folios son inmediatamente estabilizados por la inmersión extra de área. En el caso de que una fuerza externa altere el equilibrio de la embarcación, se genera un cambio en la fuerza de sustentación por variación de área del folio sumergido, los que a su vez generan fuerzas y momentos de restauración que devuelven a la embarcación a su posición vertical.

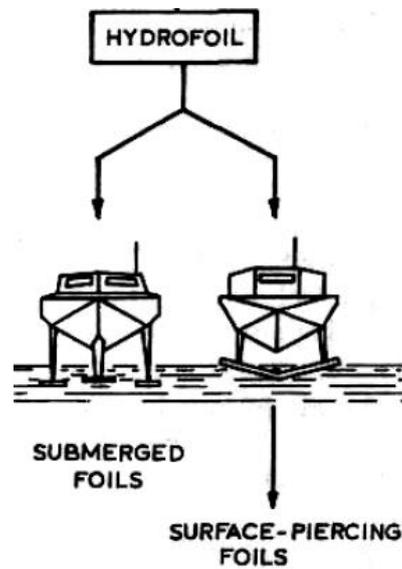


Figura 4: Sistemas de Control en los Folios, [2].

Existen diferentes tipos de configuraciones de folios para sustentar una embarcación, aunque siempre se debe considerar una distribución de superficies de sustentación en proa y popa para mantener el equilibrio longitudinal. En el presente caso se asume que el centro de gravedad se encuentra alrededor de la sección media por lo que se va a seleccionar la configuración “*Tandem*” sin división, de acuerdo a lo recomendado por [1], y que se presenta en la Figura 5.

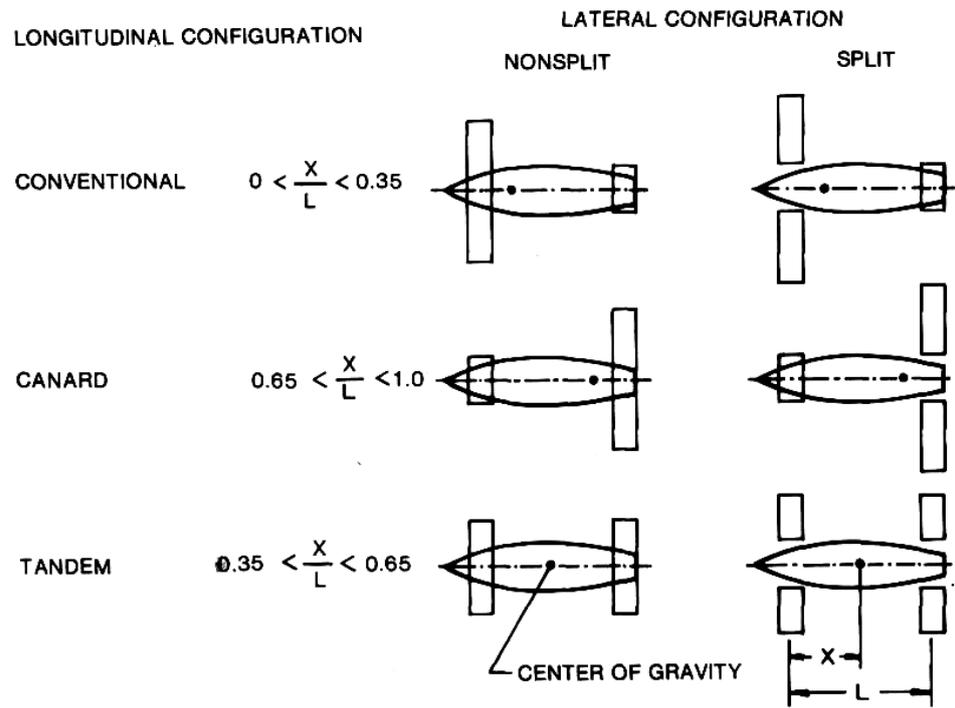


Figura 5: Configuración de los Folios, [1]

1.3 SELECCIÓN DEL PERFIL Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS FOLIOS.

Para reducir el riesgo de cavitación en la cara de succión del folio, se elige un perfil similar al de las puntas de las palas de las hélices de la serie B-Wageningen, con base plana y parte superior con forma de arco circular. Las dimensiones de los folios se calculan en base a la teoría de folios Bidimensionales tomando a partir de una sección similar, un coeficiente de sustentación igual a 1.00, a un ángulo de ataque de 6.5° . La longitud del folio resulta en 36 cm, con una cuerda de 6.5 cm. Se espera que el sistema de folios sustente al modelo de 7.7 kg de peso total a una velocidad de 3.5 nudos.

Se denomina folio a una superficie con forma de ala de avión o pala de una hélice, que al moverse a través de un fluido genera una Fuerza de sustentación y Arrastre, [14]. Las formas y términos de operación se los presenta de manera preliminar en la Figura 6.

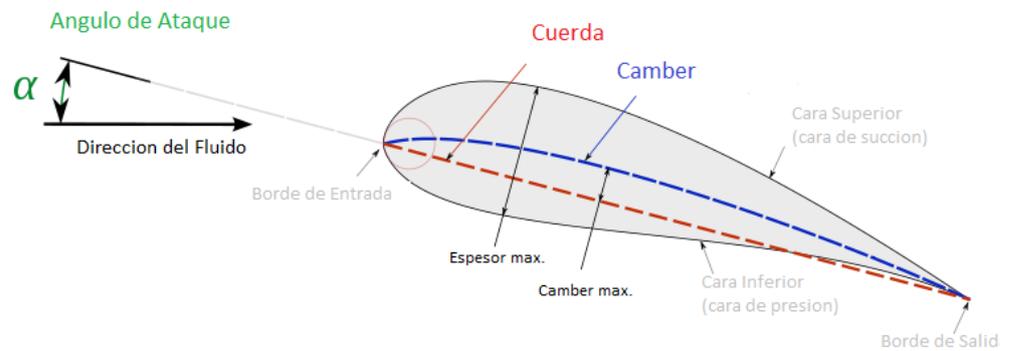


Figura 6: Partes del Folio

Al circular el fluido en la vecindad del folio se generan líneas de flujo curvilíneas que resultan en baja presión en un lado y alta presión en el otro. Esta diferencia de presión es el resultado de una diferencia de velocidad basándose en el principio de Bernoulli, dado que el campo de velocidad resultante tiene valores más altos en la cara superior que en la cara inferior. De esta forma se puede relacionar la Fuerza de Sustentación de manera directa con la diferencia de velocidades entre la cara superior e inferior del folio, [14]. Esto se puede apreciar en la Figura 7.

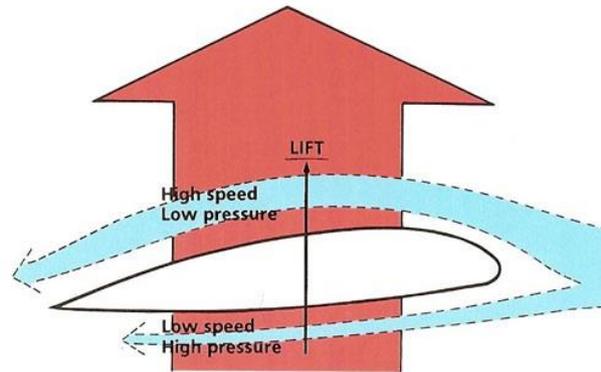


Figura 7: Modo de operación de los Folios
(Fuente: tomada del Internet, [14])

Al momento de elegir el perfil del folio se tomó en consideración la posibilidad de que se genere cavitación por la baja presión estática en la que se opera (con poca profundidad). Por ello la forma elegida es similar al de las puntas de las hélices de la serie B-Wageningen, que son de fondo plano y su parte superior con forma de arco circular como lo explica el PNA vol II, [2]. Para conservar proporciones de cuerda y espesor se tomó como punto inicial una circunferencia, marcando un segmento circular y de manera base la dimensión de la cuerda del folio como se puede apreciar en la Figura 8.

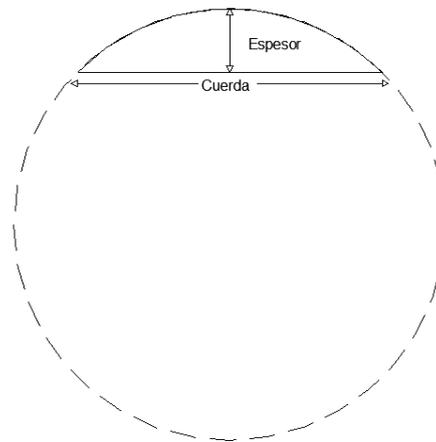


Figura 8: Perfil del Folio

Para realizar el dimensionamiento de los folios, se utilizó la teoría Bidimensional de los folios la cual se enuncia de la siguiente manera: “En un fluido ideal un folio bidimensional produce una Fuerza de Sustentación que es proporcional a la densidad del fluido, el área de trabajo y el cuadrado de la velocidad”¹, [4]. Donde la fuerza de Sustentación se escribe de la siguiente manera:

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

dónde:

L : Fuerza de Sustentación Generada.

C_L : Coeficiente de Sustentación.

V : Velocidad.

S : Longitud del Folio (“*Span*”).

¹ Du Cane, Peter, High Speed Small Craft. Temple Press, 1974

C: Cuerda.

ρ : Densidad del agua

Debe considerarse que la fuerza de Sustentación generada por los folios actúa en dirección perpendicular al movimiento del fluido.

Además de la fuerza de Sustentación, se genera una componente paralela al movimiento del fluido llamada Arrastre que es equivalente a la Resistencia al Avance generada por los folios. Esta componente se calcula de la siguiente manera:

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

dónde:

D : Fuerza de Arrastre Generado.

C_D : Coeficiente de Arrastre.

El coeficiente de Sustentación es una propiedad que varía de acuerdo a la forma y posición folio, varía aproximadamente de manera lineal con respecto al ángulo de ataque hasta el ángulo de parada ("*Stall Angle*"). Después de este ángulo, el coeficiente de Sustentación empieza a decrecer. Para realizar el dimensionamiento teórico se han preparado curvas de " C_L vs α " y " C_D vs α " que corresponde a las figuras 9 y 10, respectivamente, utilizando el programa computacional XFOIL desarrollado

por Mark Drela, [13], para el folio AG-38 que se presenta en la Figura 11. Este folio tiene características similares al seleccionado en esta tesis, y fue utilizado dado que no se dispone de las características del folio a utilizarse en este trabajo.

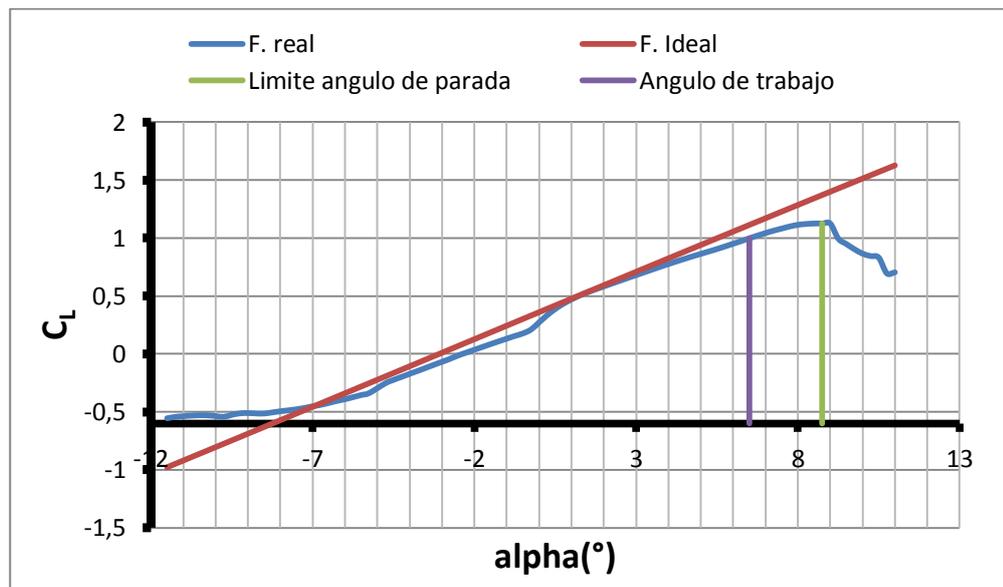


Figura 9: Curva de Coeficiente de Sustentación vs Angulo de Ataque.

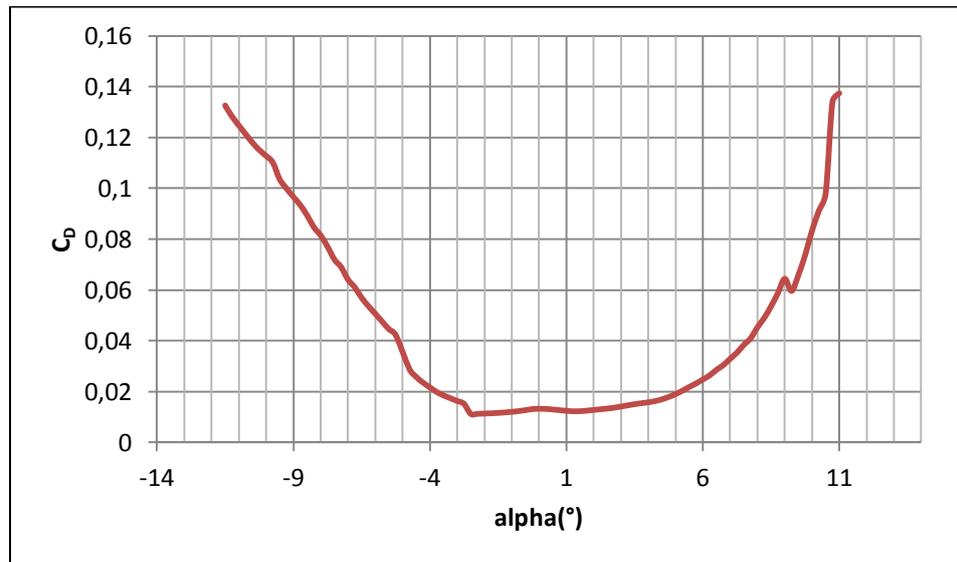


Figura 10: Curva de Coeficiente de Arrastre vs Angulo de Ataque.

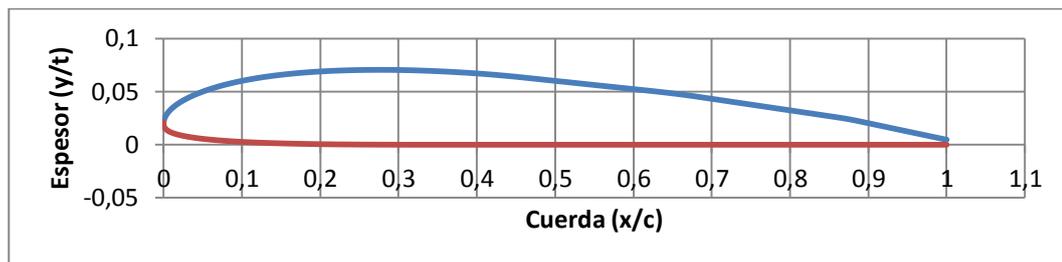


Figura 11: Perfil Folio AG-38

En la

Figura 9 se puede apreciar las diferencias en el coeficiente de sustentación del folio en fluidos real e ideal. A simple vista se puede visualizar el comportamiento lineal en el fluido ideal, a diferencia del presentado en el fluido real en el cual se presenta el ángulo de Parada antes mencionado.

En la Figura 10 no se pudo realizar la comparación del Coeficiente de

Arrastre del fluido real con el ideal ya que en este caso en que no hay superficie libre y la velocidad de arrastre es estable su valor es cero para cualquier ángulo de ataque.

A partir de las curvas C_L y C_D se establece un valor de ángulo de ataque de 6.5° manteniendo un margen de seguridad respecto del ángulo de Parada que es de 9.0° . Para los cálculos entonces se tiene un coeficiente de Sustentación cercano a 1.0 y de Arrastre de 0.029. Al momento de realizar el dimensionamiento teórico se recuerda que la configuración *Tandem* que va a usarse en el modelo, consta de dos folios de proa y popa, con dimensiones similares, facilitando de esta manera los cálculos, como se puede apreciar en la Tabla II. En esa tabla se ha analizado también la sustentación que se produce al cambiar ligeramente la velocidad de la embarcación.

	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	
Número de Folios	2	2	2	
C_L (Coeficiente de Sustentación)	1	1	1	
C_D (Coeficiente de Arrastre)	0,029	0,029	0,029	
α (Angulo de Ataque)	6,5	6,5	6,5	°
ρ (Densidad del agua)	1000	1000	1000	kg/m ³
V (Velocidad)	<u>3</u>	<u>3,5</u>	<u>4</u>	Nudos
	1,54	1,80	2,06	m/s
Peso de la Embarcación	7,7	7,7	7,7	Kg
Cuerda	0,065	0,065	0,065	m
Longitud del Folio ("Span")	0,36	0,36	0,36	m
Fuerza de Sustentación Requerida	75,46	75,46	75,46	N
L (Fuerza de Sustentación Generada)	55,73	75,85	99,07	N
D (Fuerza de Arrastre Generada)	1,59	2,17	2,83	N

Tabla II: Dimensionamiento Teórico de los Folios

Como se puede apreciar en la Tabla II, la velocidad influye de una manera considerable en la fuerza de Sustentación generada por el sistema de folios. Además, para la velocidad de diseño la relación Arrastre/Sustentación es de 2,85 %, es decir es muy beneficiosa.

1.4 ANÁLISIS NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DEL FOLIO.

En base a la información obtenida en el subcapítulo anterior se modela el perfil del folio para desarrollar un análisis del flujo Bidimensional viscoso sobre el perfil utilizando el paquete computacional COMSOL. Se evalúan los campos de velocidad alrededor del perfil del folio a diferentes ángulos de ataque correspondientes a los utilizados en las pruebas experimentales detalladas en el capítulo 3. Finalmente se determina la ubicación donde existen las variaciones máximas y mínimas de velocidad para cada ángulo de ataque.

Tomando la información utilizada en el subcapítulo anterior se realiza la modelización del perfil del folio de manera bidimensional utilizando el programa computacional AUTOCAD. Se exporta el modelo para analizar el flujo viscoso utilizando el paquete computacional COMSOL siguiendo el procedimiento descrito en la Tesis de Grado “Caracterización Numérico-Experimental del Flujo Bidimensional Alrededor de la Sección Transversal de una Tobera” sustentada por la Ing. Nadia Muñoz, [16].

Al momento de modelar el túnel de prueba se toma en consideración la distancia que tienen estas con respecto al folio para que no produzca interferencia en la simulación como se aprecia en la Figura 12. Además se utiliza en total 38 nodos y 38 elementos de 0,36 cm de longitud igualmente

espaciados para el perfil del folio. Para la discretización del subdominio se utilizó la opción del programa para enmallado sencillo con un total del 3940 elementos como se aprecia en la Figura 13.



Figura 12: Bosquejo del Túnel de Prueba

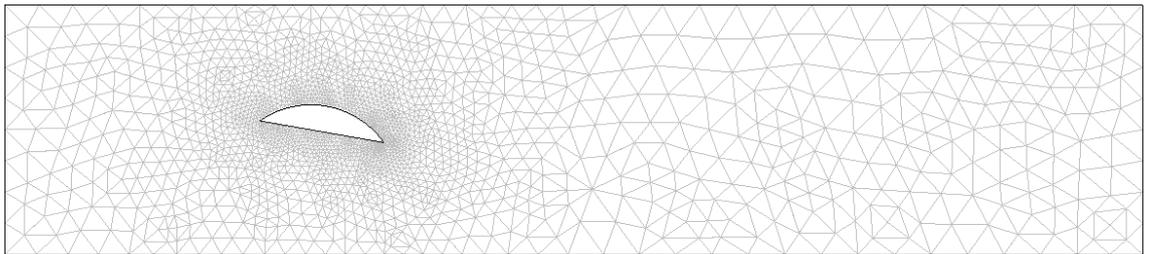


Figura 13: Discretización del Subdominio

Para realizar la simulación se toma en consideración las siguientes características físicas del fluido:

Densidad	998	Kg/m ³
Viscosidad Dinámica	1,02E-04	Pa.s

Tabla III: Características Físicas del Fluido

Establecidas las características Físicas del fluido, se deben fijar las condiciones Cinemáticas para resolver el problema. Se determina que el tiempo de evaluación para la evaluación sea de 10 segundos, tomando una grabación cada segundo para poder analizar el cambio del comportamiento del fluido en relación del tiempo.

Se evalúa el comportamiento del folio a diferentes ángulos de ataque como se puede apreciar en las siguientes figuras:

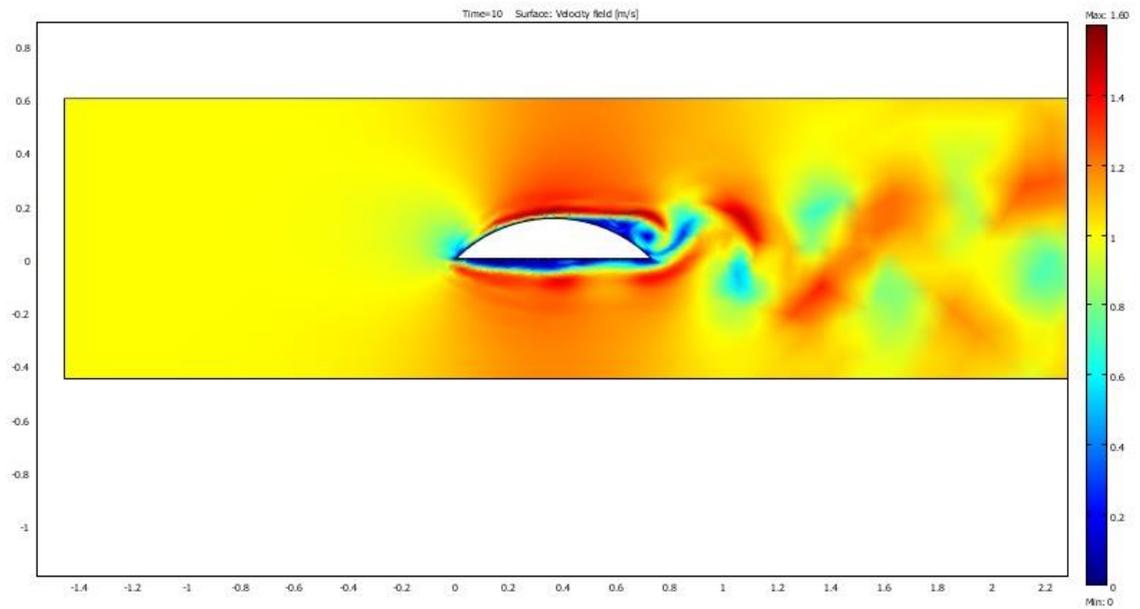


Figura 14: Medición de Campo de Velocidad, 0° Angulo de Ataque.

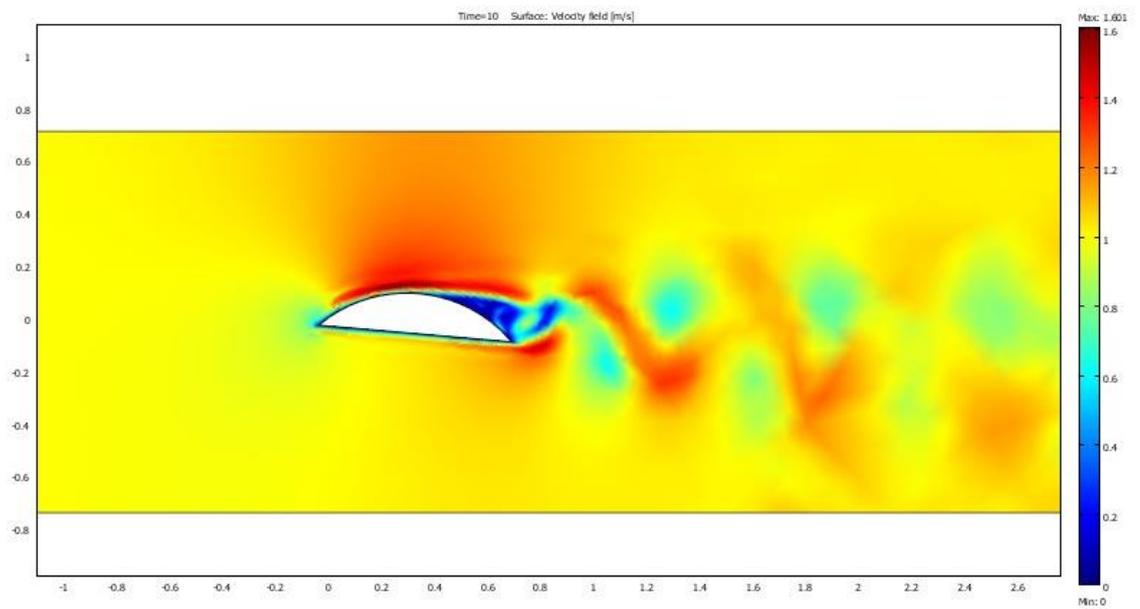


Figura 15: Medición de Campo de Velocidad, 5° Angulo de Ataque.

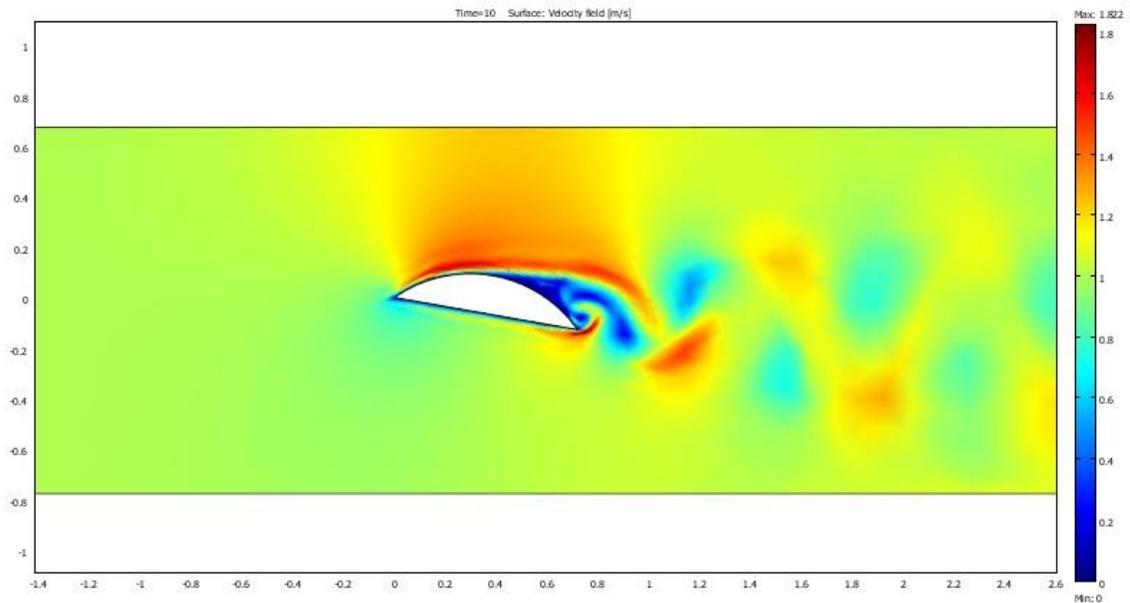


Figura 16: Medición de Campo de Velocidad, 10° Angulo de Ataque.

Una vez concluida la simulación, se determina los valores máximos y mínimos de velocidad para cada condición de trabajo como se aprecia en la tabla a continuación:

Angulo de Ataque	Velocidad Máxima (Cara de Succión)		Velocidad Mínima (Cara de Presión)	
	Ubicación (x/c)	Velocidad (m/s)	Ubicación (x/c)	Velocidad (m/s)
0 grados	0,4328	1,603	0,6642	0
5 grados	0,2793	1,613	0,6126	0
10 grados	0,7196	1,89	0,6509	0

Tabla IV: Distribución de Velocidades Máximas y Mínimas

1.5 ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE LA CAVITACIÓN.

A partir de la simulación del flujo viscoso obtenida mediante el paquete computacional COMSOL se hace una estimación de la distribución de presión a lo largo de las caras de succión y presión del folio. Además integrando la distribución de presión se obtiene la fuerza resultante generada por los folios a diferentes ángulos de ataques, y mediante la teoría bidimensional de los folios se generan las gráficas de “ α vs C_L ” y “ C_D vs C_L ”. Finalmente se realiza una estimación de la cavitación a diferentes profundidades de inmersión de los folios.

Tomando los campos de velocidades alrededor del folio a diferentes ángulos de ataque calculados mediante el programa computacional COMSOL se estima la distribución de presión en su cara superior e inferior. Se toman los datos encontrados a los 10 segundos de la evaluación, esperando la estabilidad del sistema evaluado. A continuación se presenta la distribución de presión a lo largo del folio como se aprecia en las figuras 17, 18 y 19:

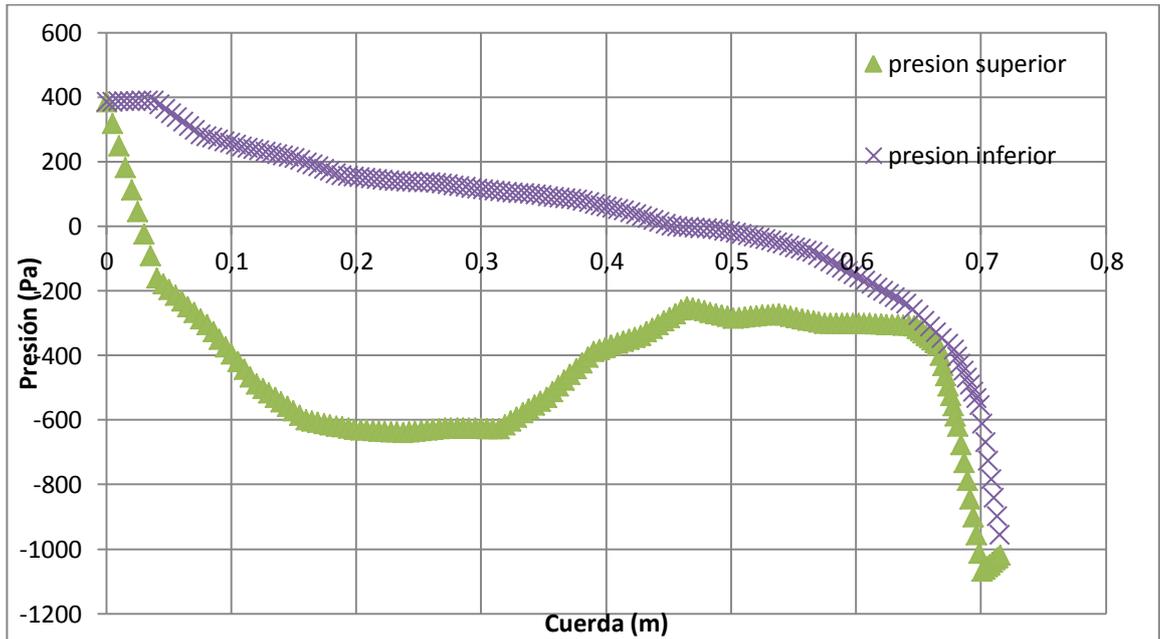


Figura 17: Distribución de Presión a 10° de Angulo de Ataque

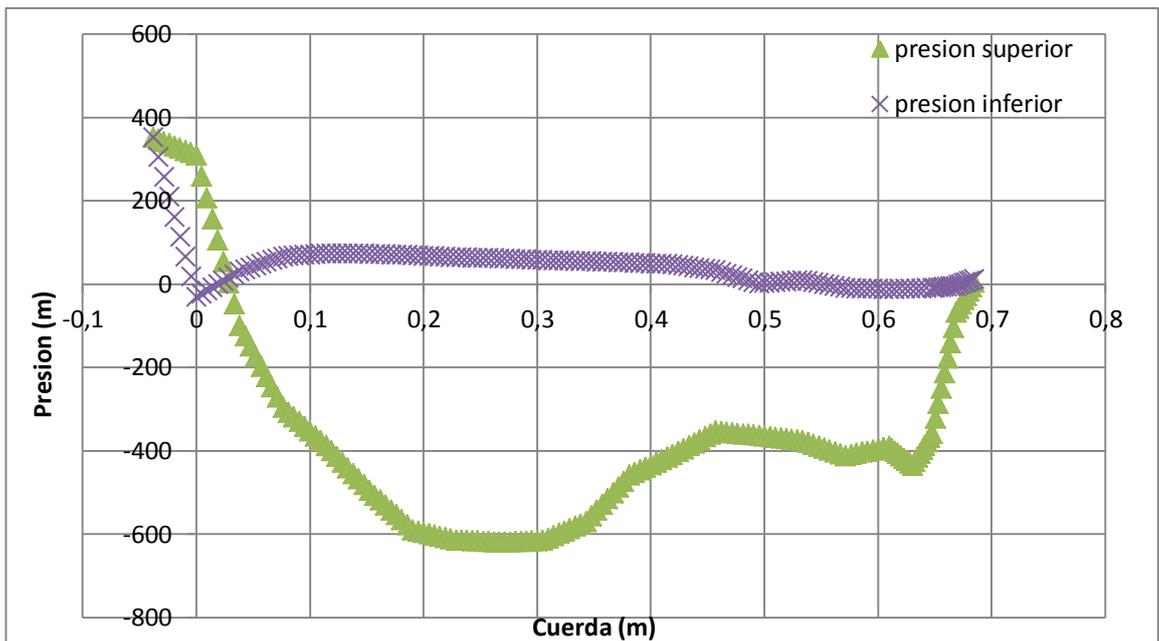


Figura 18: Distribución de Presión a 5° de Angulo de Ataque

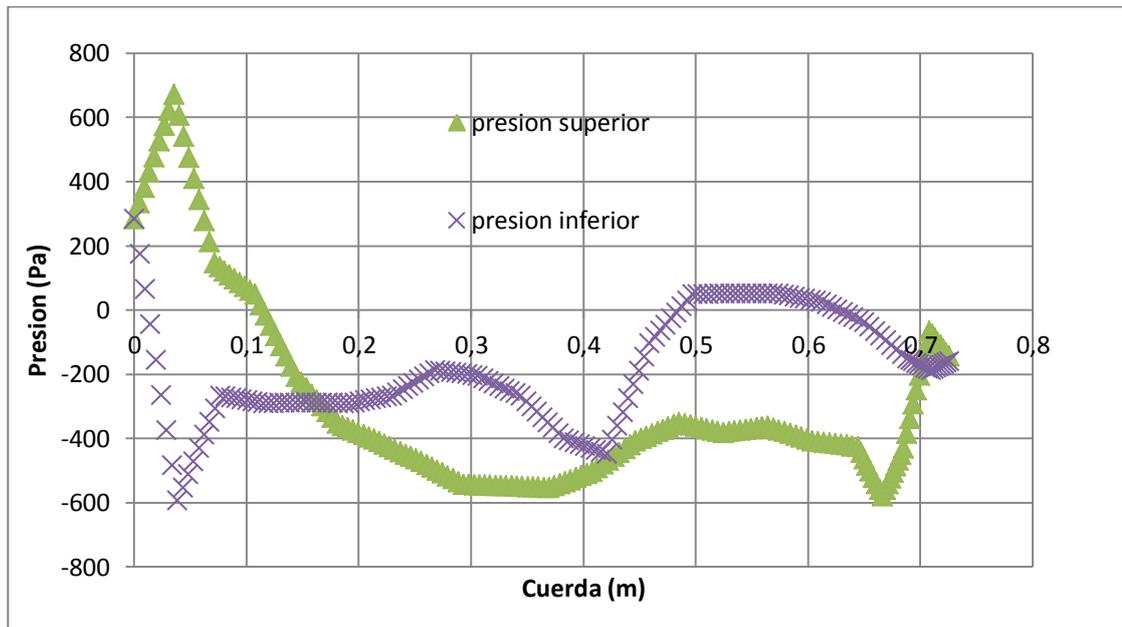


Figura 19: Distribución de Presión a 0° de Angulo de Ataque

Como se puede apreciar en las gráficas por lo general la presión se mantiene positiva en la cara inferior del folio, a diferencia de la superior que mantiene su presión negativa. Para el ángulo de ataque a 0° , este comportamiento tiende a diferir.

A partir de las distribuciones de presión se integran las fuerzas resultantes que actúan sobre el folio, de tal manera mediante la teoría bidimensional se determinan los coeficientes de Sustentación y de Arrastre como se muestra en la tabla a continuación:

Angulo de Ataque	C_L	C_D
0	0,215	0,179
5	0,841	0,146
10	0,939	0,217

Tabla V: Coeficientes de Sustentación y Arrastre para el Folio a diferentes Ángulos de Ataque

Para apreciar de mejor manera los datos presentados, se realizan las gráficas de “ α vs C_L ” y “ C_D vs C_L ” en los cuales se muestra el comportamiento de los folios en relación al cambio de ángulo.



Figura 20: Variación del Coeficiente de Sustentación con Relación al Ángulo de Ataque

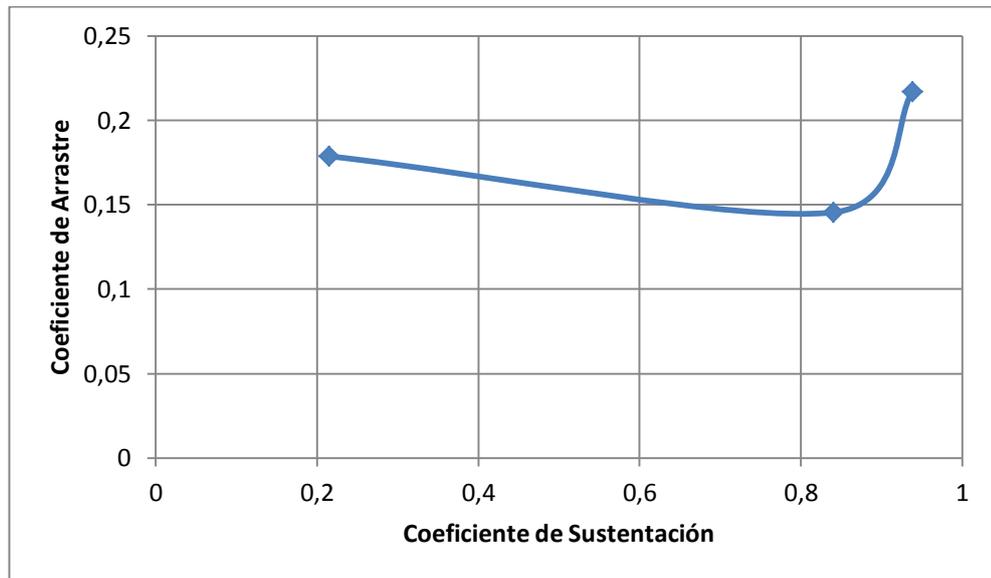


Figura 21: Variación del Coeficiente de Arrastre con Relación al Coeficiente de Sustentación

Finalmente se analiza los puntos en los cuales se tienen los valores de presión más baja para cada ángulo de ataque, evaluándolos a diferentes alturas de inmersión de los folios para determinar el riesgo posible de que se genere cavitación en los mismos. En la Tabla VI se presentan los valores de presión absoluta a los cuales el agua se evapora, [2].

Temperatura		Presión Vapor
°c	°f	Pascales
0	32	610,8
5	41	871,8
10	50	1227,1
15	59	1704
20	68	2336,9
25	77	3166,6
30	86	4241,4
35	95	5622,2
40	104	7374,6

Tabla VI: Presión de Vapor de Agua para Diferentes Temperaturas

Como se tiene conocimiento la zona con mayor velocidad se presenta en la cara de succión (cara superior) del folio, por lo que el enfoque se realizara en ella. Se presentara la variación de la presión a lo largo del folio para cada ángulo de ataque a diferentes alturas de inmersión como se aprecia en las siguientes figuras.

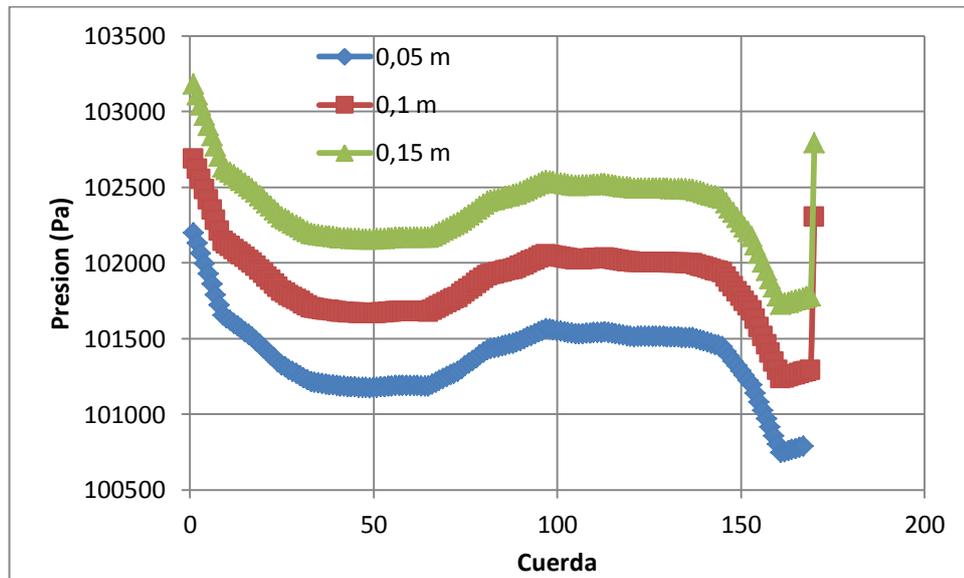


Figura 22: Variación de la Presión a diferentes profundidades de Inmersión, a 10° de Angulo de Ataque.

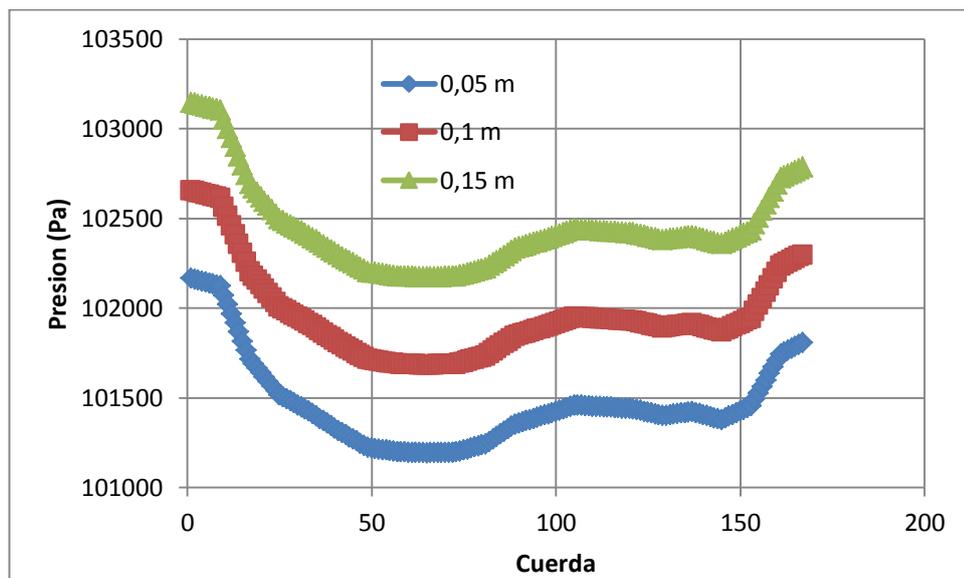


Figura 23: Variación de la Presión a diferentes profundidades de Inmersión, a 5° de Angulo de Ataque.

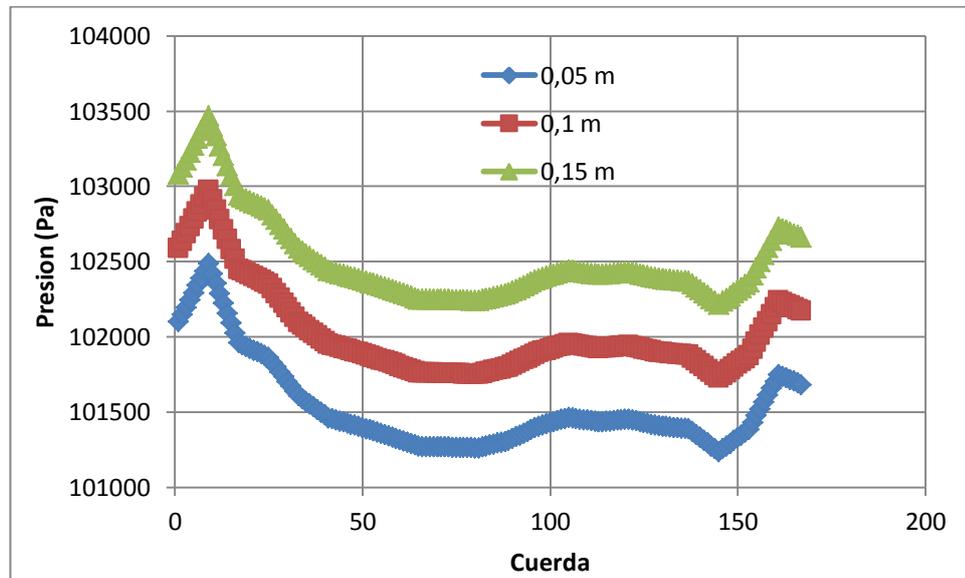


Figura 24: Variación de la Presión a diferentes profundidades de Inmersión, a 0° de Angulo de Ataque.

Como se puede apreciar en las gráficas los valores de presión no son influenciados mayormente por la profundidad de inmersión, debido a que la variación de presión por cada 5 cm de inmersión es de 490 Pa, siendo esto de menor relevancia en el cálculo de presión en este caso. Recordándose que la Presión de Cavitación a 25°C es de 3166 Pa, analizando la información presentada en los gráficos, se puede determinar que no existe riesgo de cavitación en el caso analizado.

Por lo general en situaciones en las cuales se opera a mayor velocidad, el riesgo de que se presente la cavitación es también mayor. Pero debido a

que a la velocidad analizada el modelo ya sustenta una cantidad equivalente a su peso, no se realiza un análisis a mayor velocidad ya que esto causaría inestabilidad en el modelo ya que la sustentación sería mayor a su peso.

CAPITULO 2.

CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE FOLIOS

2.1 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LA VIGA-FOLIO.

En este capítulo se va a realizar un cálculo, el cual facilite en el futuro realizar un diseño estructural preliminar de un sistema de Folios. Al sistema se lo considera como una Cercha² simplemente soportada en los extremos superiores. La estructura está cargada en forma distribuida en la zona del folio que está sumergida, correspondiente a la fuerza de sustentación en el momento de operación. Para determinar la rigidez flexural se somete una probeta con la sección transversal igual a la del folio, a un ensayo de flexión y se determina que la rigidez flexural, EI , es $4.265E+04 \text{ Kg.cm}^2$. Luego se calcula la distribución del Momento Flector,

² Grupo de Vigas en un plano, con cargas aplicadas, únicamente en el plano del Sistema.

en el sistema de vigas asumiendo que la embarcación se encuentra primero adrizada y luego escorada, empleando el método de Elementos Finitos.

Se va a determinar la distribución de Momento Flector en el Sistema de folios y para realizar este cálculo estructural se lo considera de manera simplificada, similar a una Cercha con soportes simples en sus extremos superiores. La parte sumergida del sistema encargada de la sustentación del modelo, soporta una carga distribuida equivalente a la mitad del peso del modelo en cada folio.

Rigidez Flexural del Folio

Para determinar el Momento Flector al cual será sometida la estructura, se debe identificar la Rigidez Flexural de la sección ($E \cdot I$: Módulo de Young x Inercia). Debido a que es complicado de precisar analíticamente por la geometría de la Sección y las características del material, se determinó de manera experimental dicha propiedad. Se desarrolló una prueba de flexión con una probeta preparada con el material y sección del folio (Véase anexo A). Se registran los valores de desplazamiento vertical mediante un indicador de carátula, y la deformación unitaria mediante extensómetros, producidos por una carga concentrada. En la Figura 25 se puede observar el esquema utilizado en la prueba experimental.



Figura 25: Prueba Experimental de Flexión

Con los valores de desplazamiento vertical y deformación unitaria obtenidos se preparan gráficos de las curvas de F vs $v\left(\frac{L}{2}\right)$, y, F vs ϵ_x como se puede apreciar en la Figura 27.

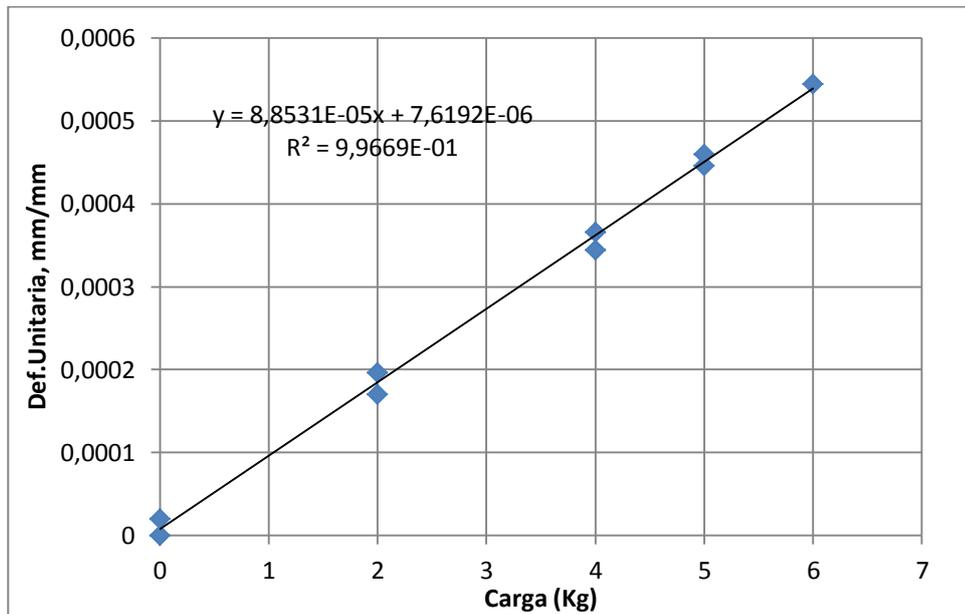


Figura 26: Curva de Deformaciones Unitarias vs Carga Aplicada

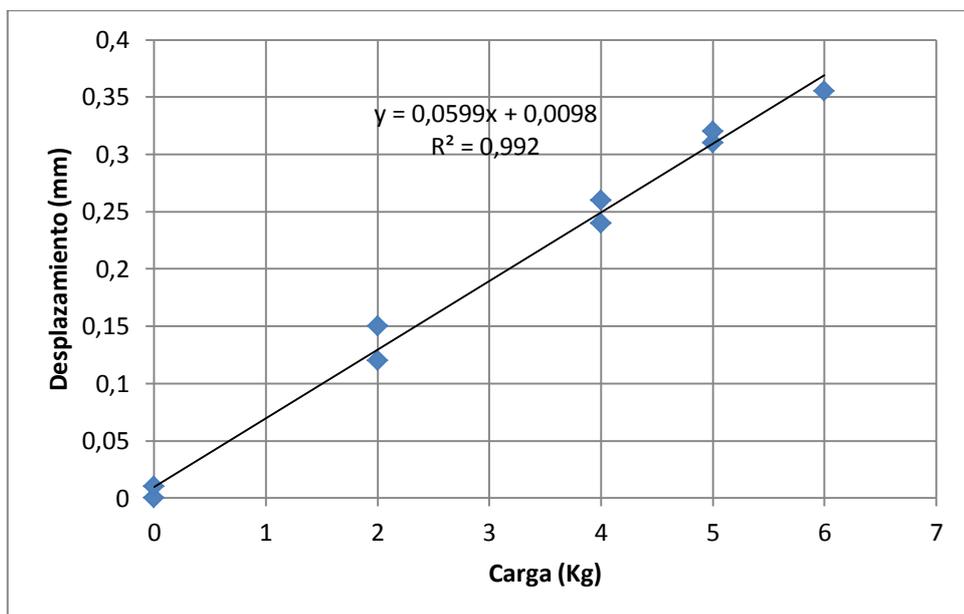


Figura 27: Curva de Desplazamientos vs Carga Aplicada

A partir de las ecuaciones de regresión obtenidas de las gráficas y las formulaciones deducidas en el Anexo A:

$$EI = \frac{Lc}{4m_2} \quad (3), \text{ y}$$

$$EI = \frac{L^3}{48m_1} \quad (4),$$

se determina que la rigidez flexural obtenida a partir de las deformaciones unitarias es $4.02e4 \text{ Kg.cm}^2$ según determina la ecuación (3). Utilizando los desplazamientos, dicho parámetro es igual a $4.51e4 \text{ Kg.cm}^2$, ecuación (4). Finalmente se toma un valor promedio de $4.265e4 \text{ Kg.cm}^2$.

En las fórmulas mencionadas:

E: Módulo de Young.

I: Inercia

L: Longitud de la probeta

m_1 : Pendiente de la curva F vs $v\left(\frac{L}{2}\right)$, método de los

Desplazamientos.

m_2 : Pendiente medida en gráfico de F vs ϵ_x , método de las deformaciones unitarias.

c: Distancia medida desde el eje neutro hasta la fibra más alejada.

Distribución de Momento Flector.

A continuación se modela el sistema de folios utilizando el programa computacional SAP 2000 para realizar un análisis estructural empleando el método de Elementos Finitos. Se consideran dos condiciones de trabajo: embarcación Adrizada y Escorada.

Los modelos estructurales empleando elementos vigas se muestran en las Figura 28 y 30, para el cual se incluyen 48 elementos de 5 cm de longitud. El valor de la carga Distribuida es de 0.08 Kg/cm, correspondientes a la mitad del peso del modelo (considerando que operan dos folios en Proa y Popa). Además los nodos de las estructuras superiores se los considera Simplemente Soportados. Procesada la información se obtienen los siguientes gráficos representando los momentos flectores, Figura 29 y 31. Claramente se nota que los puntos en los cuales se obtienen los valores más altos son en el centro del folio y en las uniones de los brazos verticales con los folios.

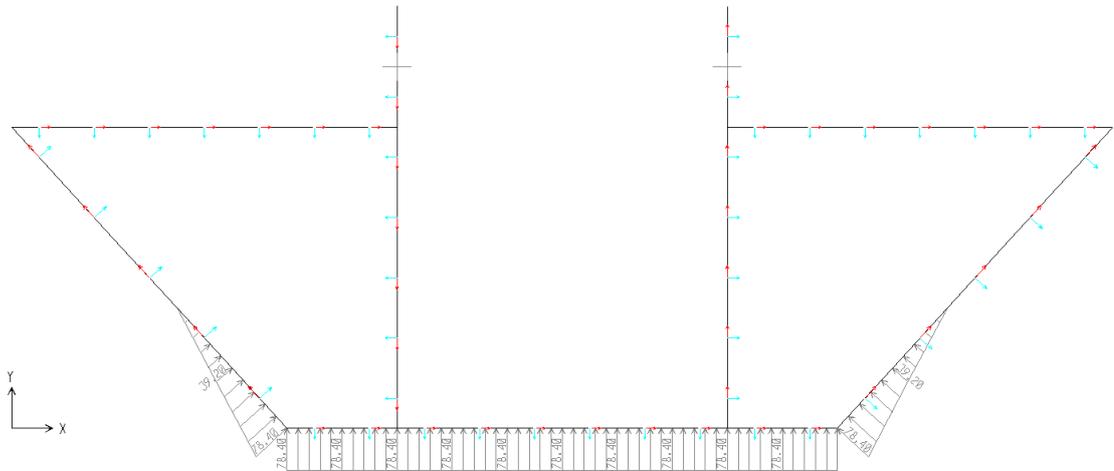


Figura 28: Modelo Estructural, Embarcación Adrizada

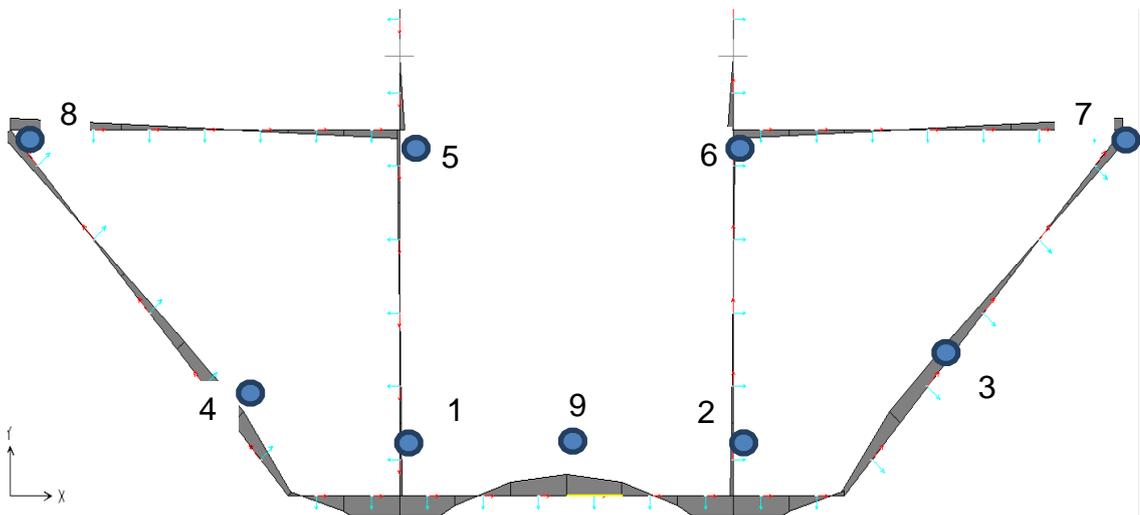


Figura 29: Grafica de Momentos Flectores con la Embarcación Adrizada

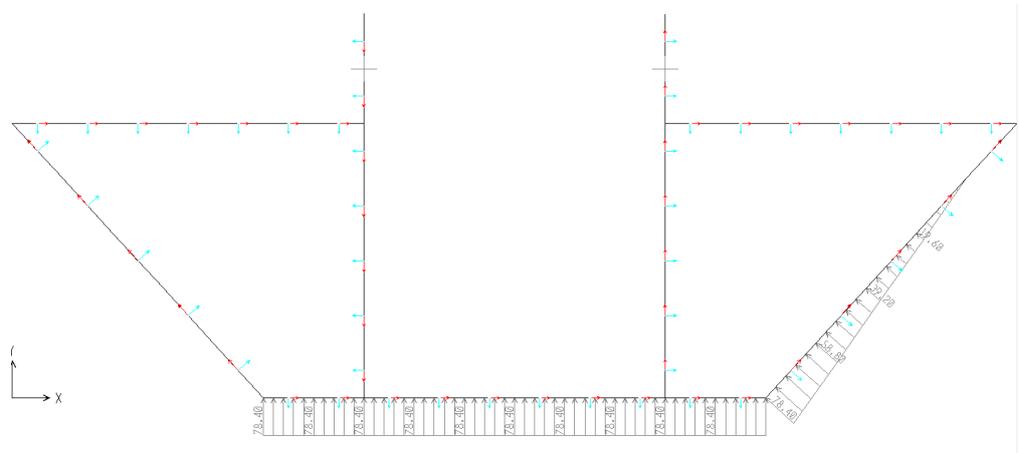


Figura 30: Modelo Estructural, Embarcación Escorada.

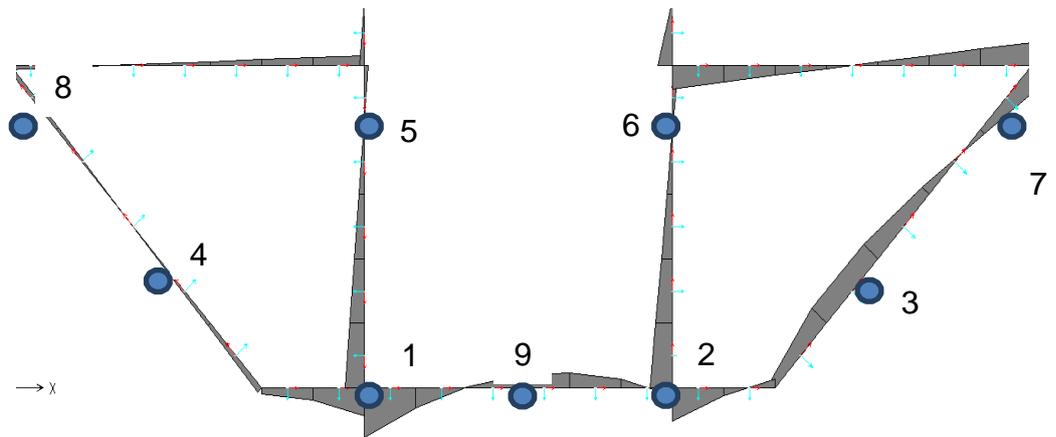


Figura 31: Grafico de Momentos Flectores en la Embarcación Escorada

Para en un futuro ayudar en un análisis estructural preliminar de un Sistema de Folios prototipo, los Momentos Flectores se presentan en forma adimensional, dividiéndolos para el producto “L x B”, donde “L” es la sustentación desarrollada por el folio (Kg) y “B” es la manga (m) considerada una dimensión representativa. De manera simplificada se presenta en las Tabla VII y VIII los valores adimensionales más relevantes asignados por posiciones como se apreció en la Figura 29 y 31.

Condición de Estabilidad 1, Embarcación Adrizada		
Punto	Momt. Flector (Kg. cm)	Momt. Flector Adimensional
1	661,57	1,309
2	661,57	1,309
3	222,48	0,440
4	222,48	0,440
5	113,46	0,225
6	113,46	0,225
7	141,54	0,280
8	141,54	0,280
9	282,57	0,559

Tabla VII: Condición de Estabilidad 1, Embarcación Adrizada

Condición de Estabilidad 2, Embarcación Escorada		
Punto	Momt. Flector (Kg. cm)	Momt Flector Adimensional
1	1084,94	2,147
2	723,61	1,432
3	497,35	0,984
4	77,72	0,154
5	209,19	0,414
6	512,18	1,014
7	493,11	0,976
8	104,8	0,207
9	330,99	0,655

Tabla VIII: Condición de Estabilidad 2, Embarcación Escorada.

2.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS FOLIOS.

Para la fabricación de los folios con material compuesto, y dado que la sección transversal tiene forma circular por un lado y plana por el otro, se construyen moldes en madera Teca a partir de un eje de 5 pulgadas de diámetro. Luego cortando segmentos circulares se tiene el molde macho con el perfil del folio. Se procede luego con la construcción de los folios utilizando el método RTM (*Resin Transfer Moulding*), utilizando como material de construcción la manta moldeable y resina Isostática. Finalmente se le da el acabado con una capa de poliuretano, resistente a las condiciones de trabajo a las cuales será expuesto.

Los folios para sustentar el molde del buque, se construyen con material compuesto: resina y fibra plástica, para lo cual se requiere moldes. Para su preparación (véase la Figura 32) se tomó una viga con sección transversal cuadrada, la cual cumpliría la función de núcleo. Luego se añade a cada cara de la sección transversal, una tira de madera de Teca con el mismo espesor que los folios, de esta manera mantener la sección transversal cuadrada. Como siguiente paso se inscribe un círculo dentro de la sección cuadrada, con el diámetro igual al del lado del cuadrado, esta medida debe ser igual a las 5 pulgadas requeridas. Las tiras de madera se añadieron mediante tornillos de cabeza plana, para que no interfieran en el proceso de construcción.

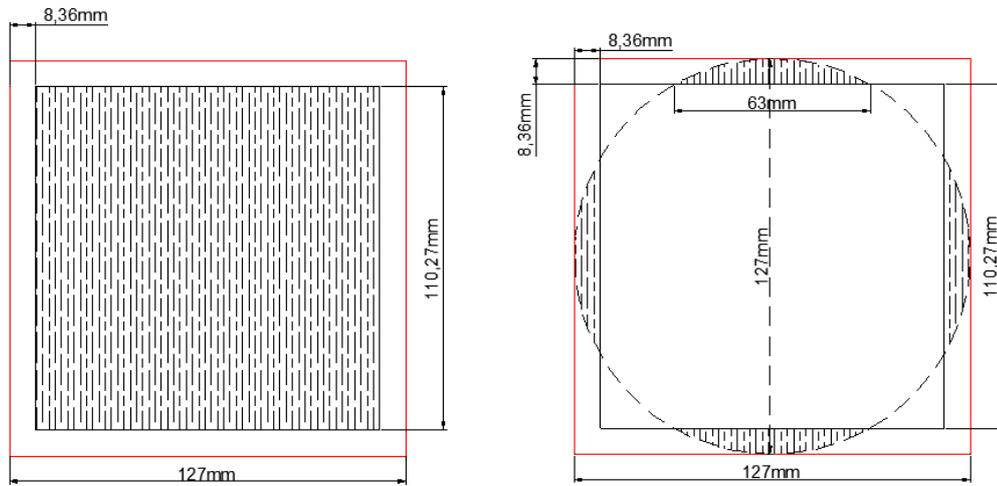


Figura 32: Proceso de Diseño de los Folios

Como siguiente paso, para brindar la forma redonda a la sección, se maquinó la viga en un torno para darle la forma circular de 5 pulgadas de diámetro. Finalmente se retiran los tornillos que adhieren las tiras de madera, obteniendo el perfil deseado como se aprecia en la Figura 33.



Figura 33: Construcción de los moldes machos de los Folios

Ya listos los moldes se procede con la construcción de los folios en fibra de vidrio, utilizando el método RTM *Resin Transfer Moulding* (véase la Figura 34), el cual se lo realiza utilizando como molde macho los perfiles de madera y como molde hembra un tubo de PVC de 5 pulgadas. Se utiliza como material una manta moldeable, la cual cuenta con una lámina de PVC entre dos capas de Mat 200 entretejidas entre si y resina Isostática. Para la construcción se utilizaron tres capas de manta moldeable para alcanzar el espesor requerido del perfil. Finalmente el producto tiene la apariencia, que se muestra en la Figura 35.

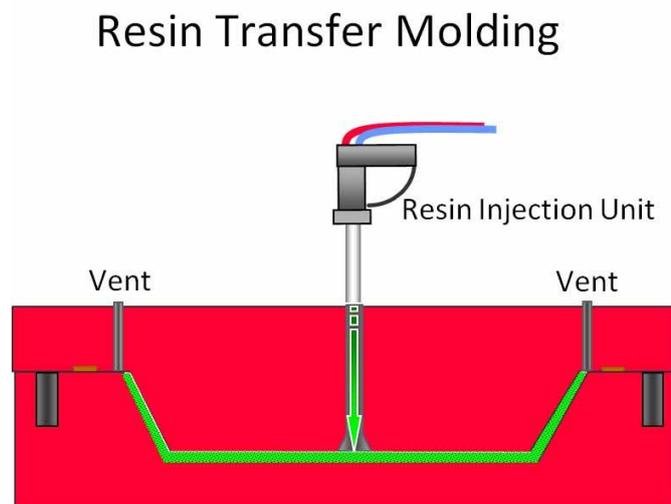


Figura 34: Esquema del Método RTM,
(Fuente: tomada del Internet, [14])



Figura 35: Construcción en Fibra de Vidrio

Luego de fundidos los folios, se los debe limar y pulir para eliminar imperfecciones y darle el acabado requerido para disminuir la rugosidad de la superficie. Además se le aplica una capa de poliuretano para protegerlo de los efectos de la intemperie, como se aprecia en la Figura 36.



Figura 36: Acabado y Recubrimiento con Poliuretano

2.3 SISTEMA PARA ADAPTAR LOS DIFERENTES SISTEMAS DE FOLIOS.

Para las diferentes pruebas del modelo del buque, el Sistema de Folios debe ser fácil de desmontar, y, además permitir que se adopte el ángulo de ataque adecuado. Entonces, la estructura se diseña para acoplarse al modelo mediante dos brazos verticales ("*struts*"), uno a cada banda, los cuales poseen un solo punto de sujeción por costado. Esto simplifica el montaje y además permite la rotación, para de esta manera variar el ángulo de ataque del folio a conveniencia durante la experimentación. Finalmente para brindarle rigidez a la estructura se le añadió un brazo transversal al sistema, el cual se acopla al brazo vertical y al extremo del folio en "V".

Teniendo en cuenta que se debe mantener un diseño sencillo para poder montar y desmontar el sistema de folios con facilidad, el diseño incluye brazos verticales denominados ("*struts*"). Estos elementos van a estar separados en una medida igual a la manga de la embarcación en la sección donde se instalan los folios, teniendo una altura mayor que el puntal del modelo para que permanezca sumergido debajo de la quilla cuando el modelo se sustente, Figura 37.

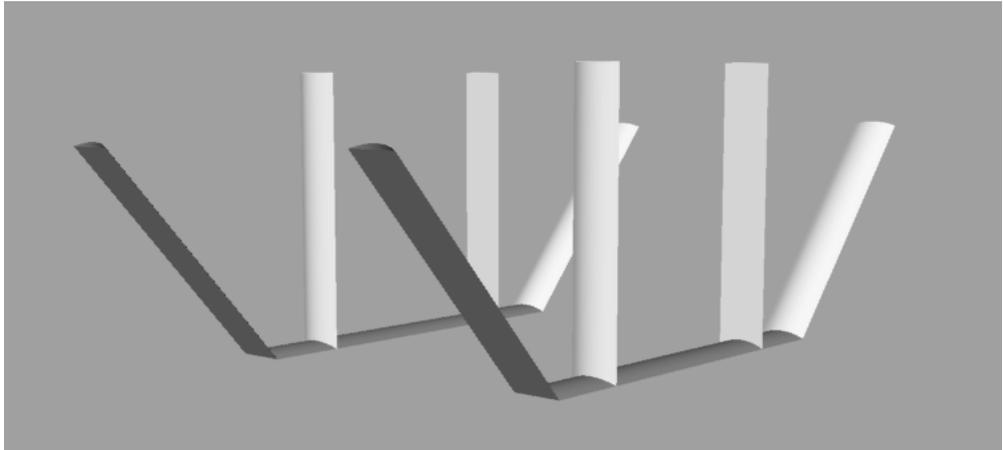


Figura 37: Esquema de los Folios

Luego se toma en consideración los puntos de sujeción de los folios, para lo que se instala un perno en cada extremo superior del brazo vertical, el mismo que se encuentre acoplado a cada banda del modelo. Además de esta manera fácilmente se puede variar el ángulo de ataque de los folios para simular las diferentes condiciones de trabajo en las pruebas experimentales, como se muestra en la Figura 38.

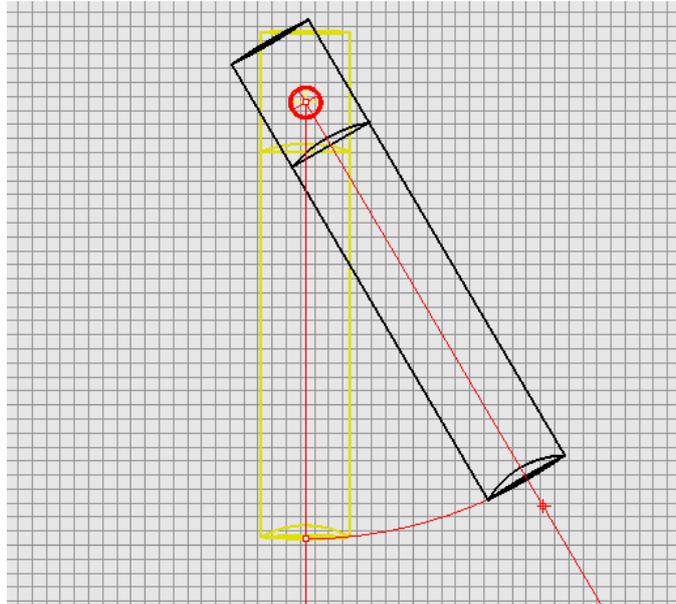


Figura 38: Sistema de Sujeción de los Folios

En el diseño se incluye un brazo transversal a la estructura para brindarle mayor rigidez, el cual se lo acopla al brazo vertical y al extremo del folio en “V”. Finalmente para su visualización se lo modela en 3D mediante el programa computacional Rhinomarine como se aprecia en la Figura 39.

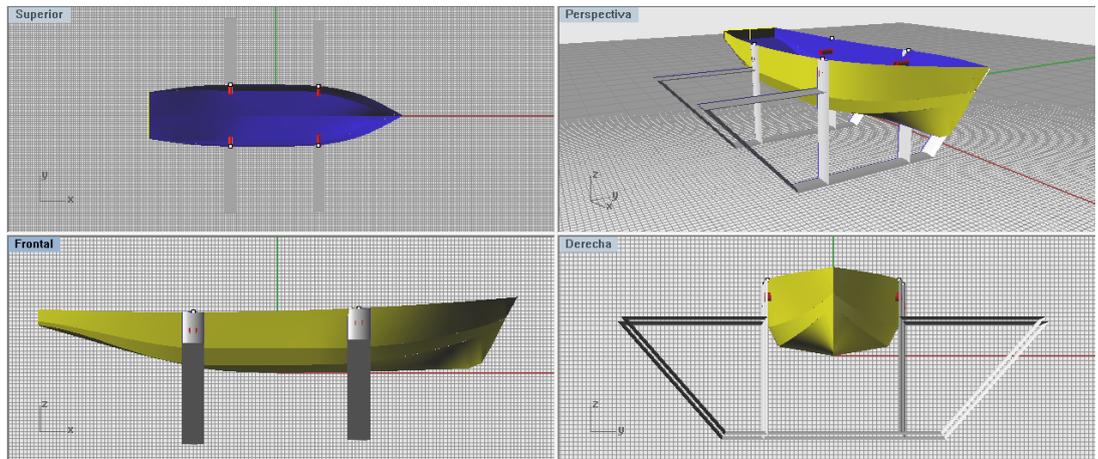


Figura 39: Diseño de Sistema de Folios Instalados en el Modelo

CAPÍTULO 3.

PRUEBAS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL

Las pruebas experimentales desarrolladas en este trabajo consisten en halar el modelo del buque con folios, desde una lancha, empleando un brazo metálico lateral, y registrar la fuerza de tensión, que corresponde a la resistencia al avance. El equipo utilizado para realizar las pruebas incluye: un brazo de arrastre instalado en una lancha con motor fuera de borda, una celda de carga para medir la fuerza, un medidor de velocidad del agua, una tarjeta de adquisición de datos, y, un computador portátil para almacenar la información. Las pruebas se realizan en dos condiciones de carga, y

además con y sin el Sistema de Folios. Además en las pruebas con el sistema de folios instalado, se prueban dos disposiciones, variando el ángulo de ataque de los folios.

Actualmente en la ESPOL no se dispone de un Tanque de Arrastre con los equipos de medición para realizar pruebas de Resistencia y Propulsión con modelos de embarcaciones, por lo que se optó en adoptar un método utilizado en proyectos de Tesis anteriores, [13]. El método consiste en remolcar lateralmente el modelo desde una lancha que avanza a velocidad constante en aguas tranquilas y almacenar en un computador los datos adquiridos por los equipos utilizados en la navegación.

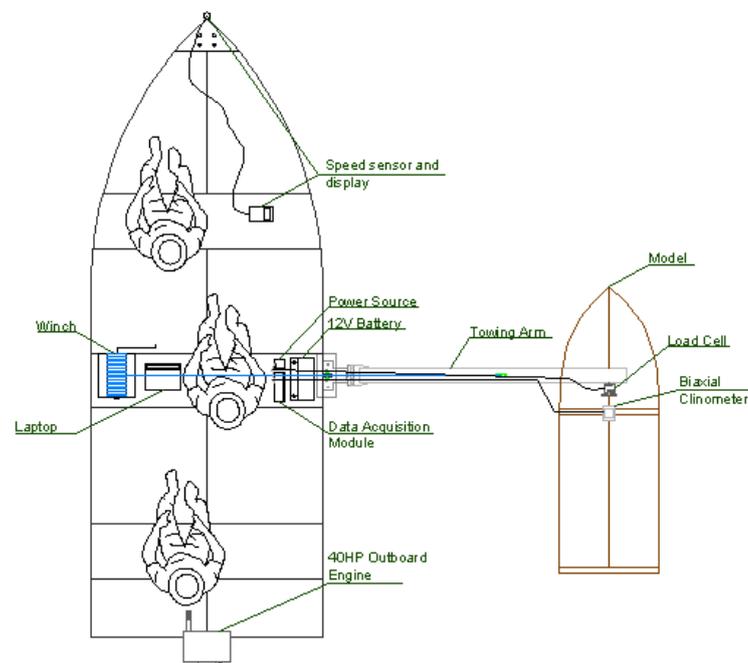


Figura 40: Esquema de Accesorios y Equipos utilizados en las Pruebas Experimentales, [13].

Para realizar las pruebas de arrastre del modelo se utilizó una lancha de aluminio de 4.3 m de eslora. La lancha tiene formas finas y bajo desplazamiento. Para la propulsión se utiliza un motor fuera de borda Yamaha de 6 hp. Para halar el modelo desde el bote se instala un brazo mecánico rebatible que posee una base de acero, y una estructura cuadrada de aluminio de 3.2 m de longitud. La longitud de este brazo es adecuada para evitar que las olas generadas por el bote interfieran el arrastre del modelo. Los equipos utilizados durante las pruebas se los detalla en la tabla que se encuentra a continuación.

Equipo	Características
Batería	Marca: BOSCH Voltaje: 12 volt, 700 Amp
Inversor de Corriente	Marca: BLACK & DECKER Modelo: PI500BB
Fuente transformadora de Voltaje	Marca: COSEL CO. LTD Modelo: OMB-DAQ-3000
Tarjeta de Adquisición de Datos	Marca: OMEGA Modelo: OMB-DAQ-3000
Celda de Carga	Marca: AMCELLS Modelo: STL S-Type 50 lbs
Medidor de Velocidad	Marca: SWOFFER INSTRUMENTS, INC Modelo: 2100-STD, 2100-LX
Computador Portátil	Marca: HP Modelo: Pavilion g4- 1071

Tabla IX: Listado de Equipos usados en el desarrollo de la Prueba Experimental.

Una vez instalados los equipos a bordo de la lancha se da inicio a las pruebas. Es necesario como mínimo 4 personas a bordo de la lancha; en proa se ubica una persona encargada de controlar la velocidad de avance de la embarcación y registrar evidencia fotográfica de cada prueba. La siguiente persona que se encuentra en la sección media, se encarga de manejar el winche que controla el brazo de aluminio; esto para que la línea de remolque se mantenga paralela al movimiento de la embarcación, para que tensión no influya en la sustentación del modelo. Las otras dos personas que se encuentran en popa son las encargadas de manejar los equipos de adquisición de datos y la propulsión mediante el motor fuera de borda, tratando de mantener la velocidad constante mientras se realizan las mediciones. Durante las pruebas se registran los datos que provee la celda de carga, para posteriormente calcular los valores de Resistencia al Avance, además de la velocidad de la lancha.

Las pruebas experimentales se las realiza en dos condiciones de carga, y en cada una de estas, con y sin folios. Además en las condiciones con folios se trabaja con dos configuraciones diferentes con referencia al ángulo de ataque. Para cada una de estas condiciones se le asignó un código para su mejor identificación en cálculos posteriores, como se puede apreciar en la tabla que se presenta a continuación:

Condición de Carga 1 (15.8 kg)	Con Sistema de Folios	F. Proa 10° F. Popa 5°	C1F10A5
		F. Proa 5° F. Popa 0°	C1F5A0
	Sin Sistema de Folios		C1WF
Condición de Carga 2 (18.55 kg)	Con Sistema de Folios	F. Proa 10° F. Popa 5°	C2F10A5
		F. Proa 5° F. Popa 0°	C2F5A0
	Sin Sistema de Folios		C2WF

Tabla X: Esquema de las condiciones de trabajo a las cuales se desarrollaran las pruebas de Resistencia.

Para las dos condiciones de carga se debe determinar la ubicación del centro de gravedad longitudinal de la embarcación, tratándose de que se mantenga la ubicación del LCG similar a la de diseño. Se puede apreciar en la siguiente figura la forma de determinar experimentalmente los centros de gravedad longitudinales en diferentes condiciones.



Figura 41: Determinación experimental del LCG, Cond. de Carga 1 sin Folios.



Figura 42: Determinación experimental del LCG, Cond. de Carga 1 con Folios.

Los resultados obtenidos con el izado en seco del modelo son lo que se presentan en la tabla a continuación:

	Peso Total (Kg)	Ubicación LCG (cm)
C. de Carga 1 sin Folios	14,96	-1,19
C. de Carga 2 sin Folios	17,56	-3,09
C. de Carga 1 con Folios	15,80	-5,81
C. de Carga 2 con Folios	18,55	-5,07

Tabla XI: Peso y Ubicación del LCG para Condición de Trabajo

Como se puede apreciar en la tabla anterior, en todas las condiciones de trabajo el LCG se encuentra ligeramente hacia popa de sección Media. Además en la condición sin folios se restó un peso de aproximadamente 1 Kg correspondiente al peso de los folios en situación realista.

3.2 RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados de las pruebas de arrastre se resumen en gráficas de Velocidad vs Resistencia al avance del modelo, en las cuales se incluyen las curvas correspondientes a las 6 condiciones de trabajo mencionadas. Se divide las curvas en dos grupos representativos, con y sin Sistema de Folios. Para las curvas correspondientes al modelo con Sistema de Folios instalados se incluyen las mediciones a 3 velocidades diferentes, los que presentan un comportamiento creciente hasta el punto de velocidad de despegue, luego del cual la resistencia tiende a decrecer. Las curvas correspondientes al modelo sin el sistema de folios, muestran en forma clásica que la resistencia se incrementa de manera exponencial en función de la velocidad.

Para cada condición de evaluación del modelo se desarrollaron mediciones a 3 diferentes velocidades de arrastre, realizando 4 veces cada una de estas para luego promediarlas. Debe mencionarse que por el sistema de control de velocidad, este parámetro no se repitió exactamente en cada prueba. La razón para la adquisición de valores de la fuerza de tensión ("*scan rate*"), es de 60 mediciones por segundo y se realizó durante 20 segundos, obteniendo un total de 1200 datos por medición. Se presenta la tabla con los resultados

promediados de las mediciones, en los cuales se registran valores de velocidad, número de Froude y valores de resistencia (Tensión).

C1F5A0	Velocidad (m/s)	1,043	1,487	1,970		
	Froude	0,292	0,417	0,552		
	Resistencia (kg)	1,854	3,342	2,539		
C1F10A5	Velocidad (m/s)	0,993	1,523	1,770		
	Froude	0,278	0,427	0,496		
	Resistencia (kg)	1,630	3,234	2,580		
C1WF	Velocidad (m/s)	1,272	1,505	1,736	2,034	2,304
	Froude	0,356	0,422	0,486	0,570	0,646
	Resistencia (kg)	0,185	0,773	1,489	1,887	2,052
C2F5A0	Velocidad (m/s)	0,988	1,523	1,897		
	Froude	0,277	0,427	0,531		
	Resistencia (kg)	2,314	4,394	3,433		
C2F10A5	Velocidad (m/s)	1,044	1,523	1,830		
	Froude	0,292	0,427	0,513		
	Resistencia (kg)	1,878	3,666	3,578		
C2WF	Velocidad (m/s)	1,507	1,990	2,376		
	Froude	0,422	0,558	0,666		
	Resistencia (kg)	3,101	3,786	5,122		

Figura 43: Resumen de Resultados de Resistencia al Avance para diferentes Condiciones de Trabajo.

En las siguientes figuras se presentan los valores de resistencia para cada condición de carga. En las condiciones en las cuales el modelo se encuentra equipado con el Sistema de Folios, los valores de resistencia inicialmente se incrementan en función de la velocidad; luego, conforme el modelo se eleva por efecto de la sustentación generada por los folios, los valores de resistencia decrecen. Para las condiciones a las cuales el modelo opera sin el sistema de folios equipados, los valores para la Condición de Carga 2 poseen un comportamiento exponencial; en cambio en la Condición de Carga 1, se obtuvieron resultados algo particulares, razón por la cual se realizaron 5 mediciones en esta condición, confirmando dichos valores.

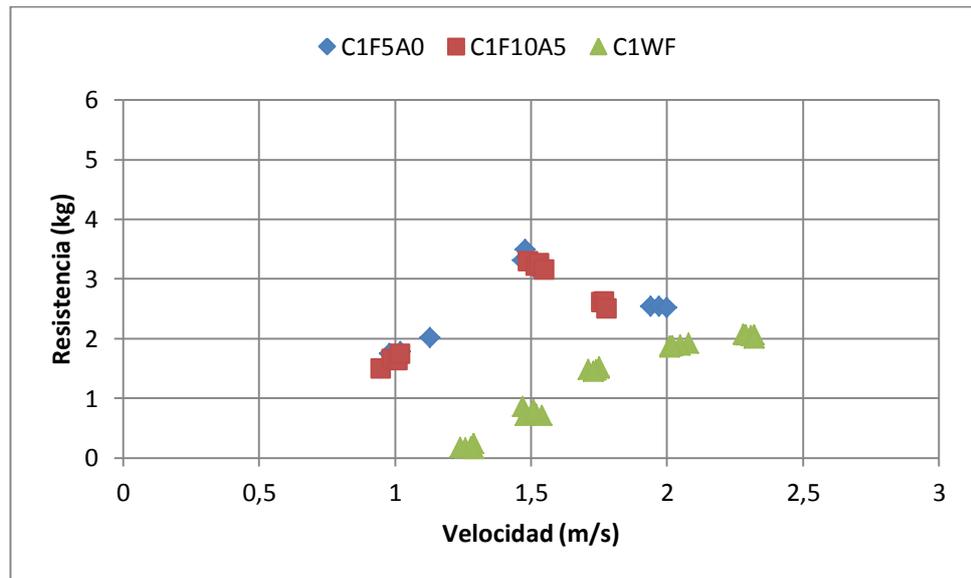


Figura 44: Resistencia al Avance con y sin en Condición de Carga 1 (Ligera).

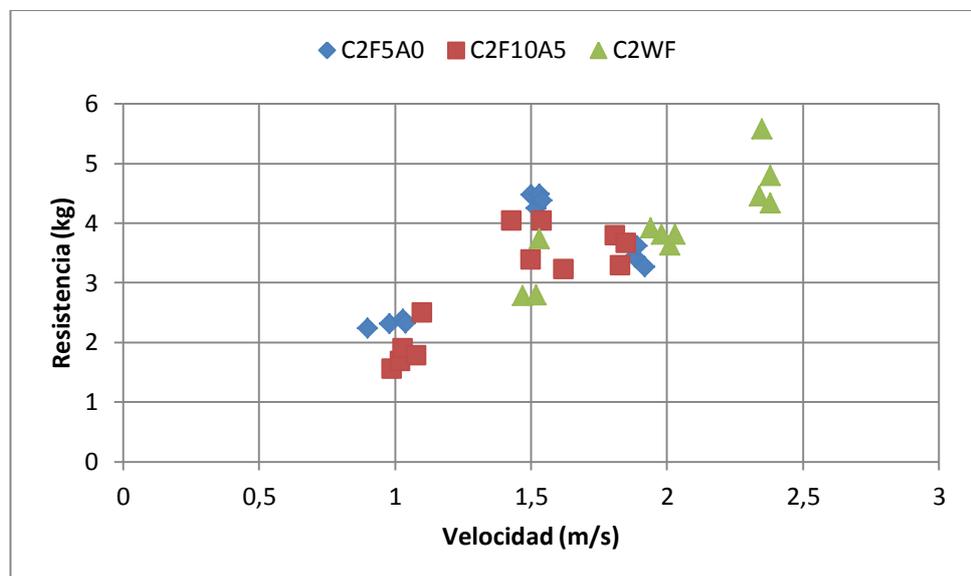


Figura 45: Resistencia al Avance con y sin en Condición de Carga 2 (Cargado).

En la siguiente figura se muestra el comportamiento del modelo en la condición de carga 1, con el folio de proa a 5° y el de popa a 0° , durante las pruebas a distintas velocidades. Se puede visualizar claramente que la embarcación se encuentra asentada, esto ayuda de manera directa a evitar potenciales ingresos de agua por Proa.



Figura 46: Proceso de Sustentación para el Modelo con Folio de Proa a 5° y el de Popa a 0° , Condición de Carga 1

A continuación se muestran imágenes del modelo en condición de carga 1 y con configuración del folio de proa a 10° y el de popa a 5° . Se nota que la sustentación del folio de proa es mayor que el de popa, porque la parte delantera se eleva bastante más que la trasera.

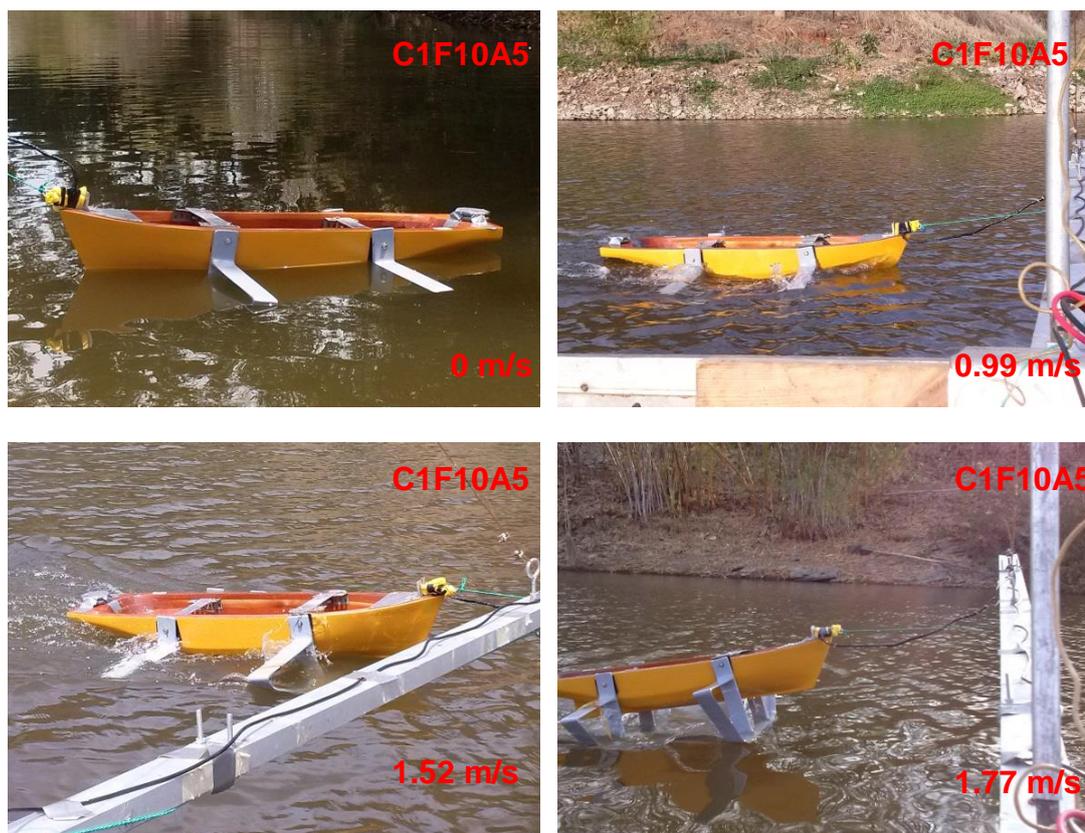


Figura 47: Proceso de Sustentación para el Modelo con Folio de Proa a 10° y el de Popa a 5° , Condición de Carga 1

En la siguiente figura se muestran imágenes de la prueba de resistencia del modelo sin el sistema de folios, en la condición de carga 1, a diferentes velocidades.

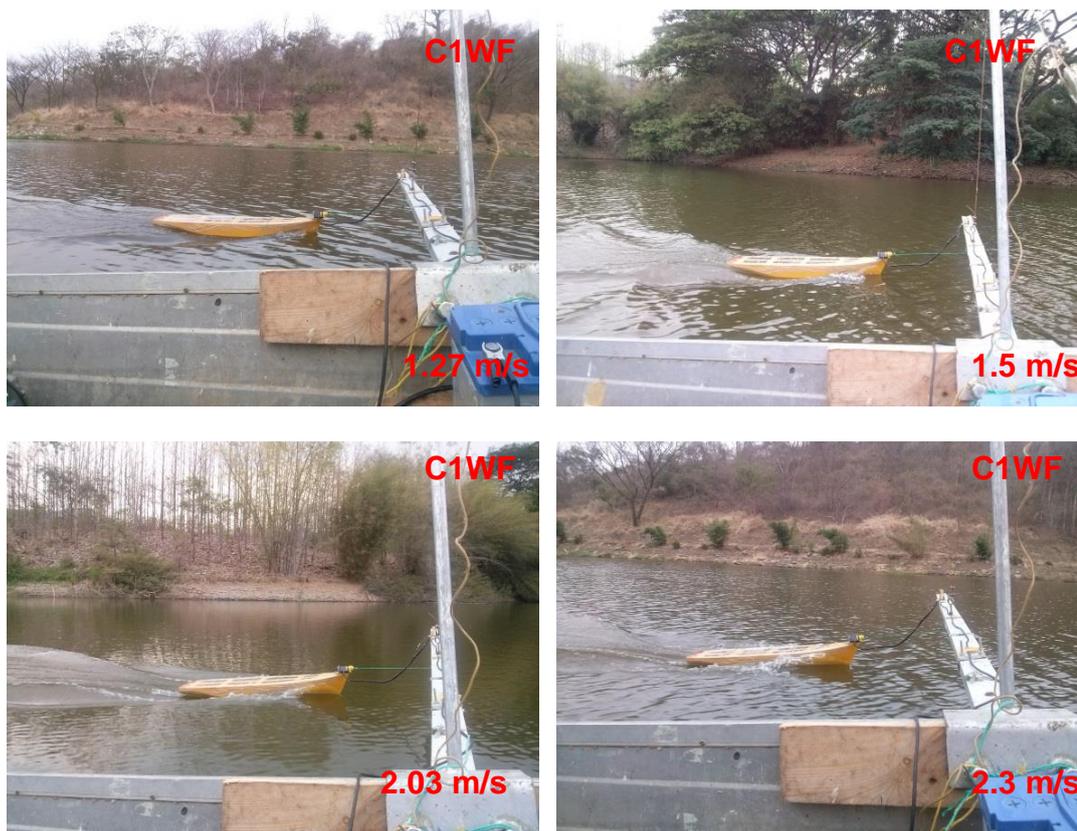


Figura 48: Proceso de las pruebas de Remolque para modelo sin Folios, Condición de Carga 1

3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.

Se realiza primero la estimación de la resistencia al avance del casco del modelo, a diferentes calados empleando el método de Holtrop. Luego se estima la Resistencia del conjunto modelo+folios considerando diferentes alturas de elevación del casco, utilizando el coeficiente de arrastre. Luego se compara la velocidad de despegue del agua mediante la teoría Bidimensional de los folios en las cuatro condiciones de trabajo consideradas. Finalmente se presentan gráficas para comparar las estimaciones teóricas con los resultados experimentales de los dos puntos antes mencionados y establecer su proximidad.

Comúnmente se reconocen tres métodos para calcular la resistencia al avance de una embarcación. El primero, experimental, que incluye ensayos con modelos, que incluye un proceso lento y costoso. El siguiente es el método estadístico que utiliza análisis de regresión de resultados de ensayos con modelos, el cual provee formulas fáciles de aplicar, teniendo como único requisito para que se puedan aplicar que se mantengan dentro de los parámetros de los modelos de las bases de datos. Sin dejar atrás el método numérico, el cual mediante un computador se somete al cuerpo en un simulador el cual determina el comportamiento hidrodinámico del mismo.

El proceso experimental se lo explicó en los subcapítulos anteriores para determinar la resistencia del modelo, y en este subcapítulo se utiliza el método estadístico de Holtrop para luego comparar resultados entre dichos procesos.

Resistencia con el Método de Holtrop

El método de Holtrop es utilizado con mucha frecuencia en nuestro medio para estimaciones preliminares de propulsión. En este método se presenta un grupo de ecuaciones elaboradas a partir de los resultados de las pruebas experimentales con modelos, con una base de 1707 ensayos de remolque y 1287 ensayos de autopropulsión. Las componentes de la Resistencia Total que incluye la formulación de Holtrop son:

$$R_T = R_F(1 + k_1) + R_A + R_{Apendices} + R_{EspSum} + R_{Olas} \quad \text{Ec. 3}$$

siendo:

R_T : Resistencia Total.

R_F : Resistencia Friccional (ITTC – 1957)

$1 + k_1$: El factor de forma que describe la Resistencia Viscosa de la forma del casco en relación a R_F .

R_A : Resistencia por Correlación Modelo/Prototipo

$R_{Apéndices}$: Resistencia por Apéndices.

R_{EspSum} : Resistencia por la Inmersión del Espejo.

R_{Olas} : Resistencia por Formación de Olas.

Recordando que se trata de una formulación de regresión, es necesario que los datos de la embarcación analizada se encuentren dentro de los de aplicación del método. En la siguiente tabla se presentan los rangos de las variables empleadas en la Regresión de Holtrop para los diferentes tipos de barcos, [15].

Tipo de Buque	Max Fn	Cp.	L/B	B/T
Granelero, Petrolero	0.24	0.73-0.85	5.1-7.1	2.4-3.2
Remolcador, Costero	0.38	0.55-0.65	3.9-6.3	2.1-3.0
P. Contenedor	0.45	0.55-0.67	6.0-9.5	3.0-4.0
Carguero Rápido	0.3	0.56-0.75	5.3-8.0	2.4-4.0
Roll-on-Roll-off, Ferries	0.35	0.55-0.67	5.3-8.0	3.2-4.0

Tabla XII: Rangos de Aplicación del Método de Holtrop, [14]

En este proyecto se va a analizar el modelo de un barco pesquero a una velocidad de 2.2 m/s y se lo va a considerar como embarcación costera. La siguiente tabla resume el análisis de aplicabilidad del Método de Holtrop en el presente caso:

Característica	Rango de Aplicación	Condición de Carga 1	Condición de Carga 2	
Max Fn	0.38	0.63	0.63	No cumple
Cp	0.55-0.65	0.60	0.62	Cumple
L/B	3.90-6.30	4.06	4.04	Cumple
B/T	2.10-3.00	3.39	3.16	No cumple

Tabla XIII: Evaluación del Modelo a Aplicar el Método de Holtrop

Como se puede apreciar en la tabla anterior no se satisfacen todos los parámetros establecidos por el método. Pero para establecer un análisis preliminar se lo utilizará para compararlo con las pruebas experimentales.

Para emplear el método de Holtrop se hace uso de los uno de los programas desarrollados en el curso de Programación Aplicada I que se dicta en la Facultad, [15]. Los resultados para diferentes condiciones de carga del modelo se presentan a continuación.

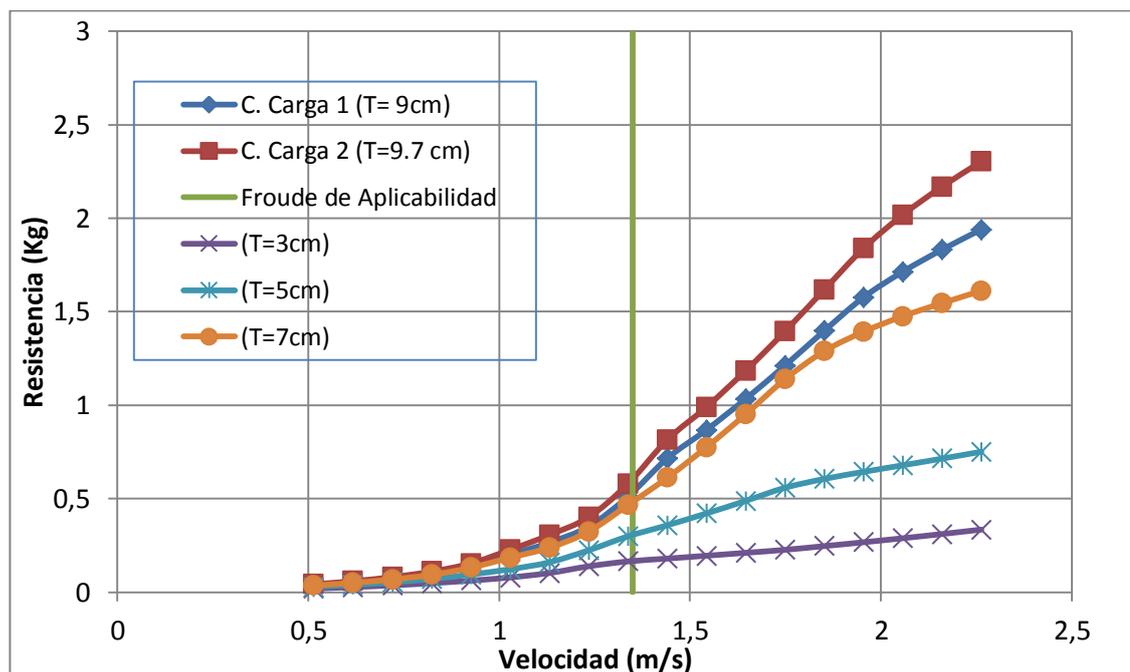


Figura 49: Curvas de Resistencia para las dos Condiciones de Carga, para el Modelo sin Folios

Como se esperaba, en la condición de carga 2, de mayor peso, la resistencia es mayor que en las restantes. La resistencia en la condición de carga 1 es de alrededor de 1.71 kg y en la condición de carga 2 de 2.02 kg, para una velocidad de 2.3 m/s. En la gráfica se incluye el límite de aplicabilidad del método por número de Froude.

Resistencia de los folios a partir de la Teoría Bidimensional.

Aplicando la teoría Bidimensional de los folios se estima la fuerza de Sustentación generada considerando la velocidad en cada caso, ligándose de manera directa con la reducción de la resistencia al avance debido a la disminución del volumen de desplazamiento al momento que la embarcación se empieza a sustentar. Se debe incluir el aumento de resistencia generado por los folios debido al incremento de velocidad, que se calcula con el coeficiente de arrastre propio, C_D , del perfil del folio.

Debe enfatizarse que los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre para la parte teórica se determinaron mediante el uso del programa computacional XFOIL desarrollado por Mark Drela, [12], para el perfil de folio AG-38. Para realizar los cálculos se utiliza las formulaciones detalladas en el capítulo 1, que se refieren a la resistencia y sustentación generadas por los folios. Para el cálculo de la resistencia Teórica del conjunto modelo+folios se siguió el proceso detallado a continuación:

- A partir de las curvas Hidrostáticas, se determinan las propiedades hidrostáticas del modelo a diferentes calados.
- Se determina el Área Horizontal Desarrollada, que corresponde al área proyectada de los folios que se encuentran diagonales debido al uso del Sistema en "V".

- Luego se calcula la reducción del desplazamiento original, que corresponde a la sustentación generada por el sistema de folios.
- Utilizando la formulación de la teoría bidimensional de folios, a partir de la sustentación determinada se estima la velocidad necesaria para generarla. Para esto se toma en cuenta el coeficiente de sustentación para cada folio a su respectivo ángulo de ataque.
- A partir de la velocidad se determina la resistencia generada por los folios en base al coeficiente de arrastre, C_D .
- La resistencia generada por el modelo se la determina de los resultados del método de Holtrop para los diferentes calados del modelo.
- Finalmente la Resistencia Total es la suma de la resistencia generada por los folios y la generada por el casco.

Los resultados se muestran en la tabla que se encuentra a continuación:

Calado (cm)	Desplaz. Modelo (kg)	Area Horiz Des. (m²)	L (2 fols) (kg)	Veloc. (m/s)	R folios (kg)	R casco (kg)	R Total (kg)
9,70	18,40	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,00	16,40	0,06	2,00	0,61	0,06	0,10	0,16
7,00	10,80	0,06	7,60	1,22	0,22	0,95	1,17
5,00	6,10	0,05	12,30	1,59	0,35	0,72	1,06
3,00	2,30	0,05	16,10	1,87	0,46	0,39	0,85
0,00	0,00	0,04	18,40	2,10	0,52	0,00	0,52

Tabla XIV: Variación de la Resistencia Total Experimental para el modelo equipado con Folios en función de la Velocidad.

Realizando el mismo procedimiento para las 4 condiciones de trabajo respectivas, se obtiene la gráfica que se presenta a continuación:

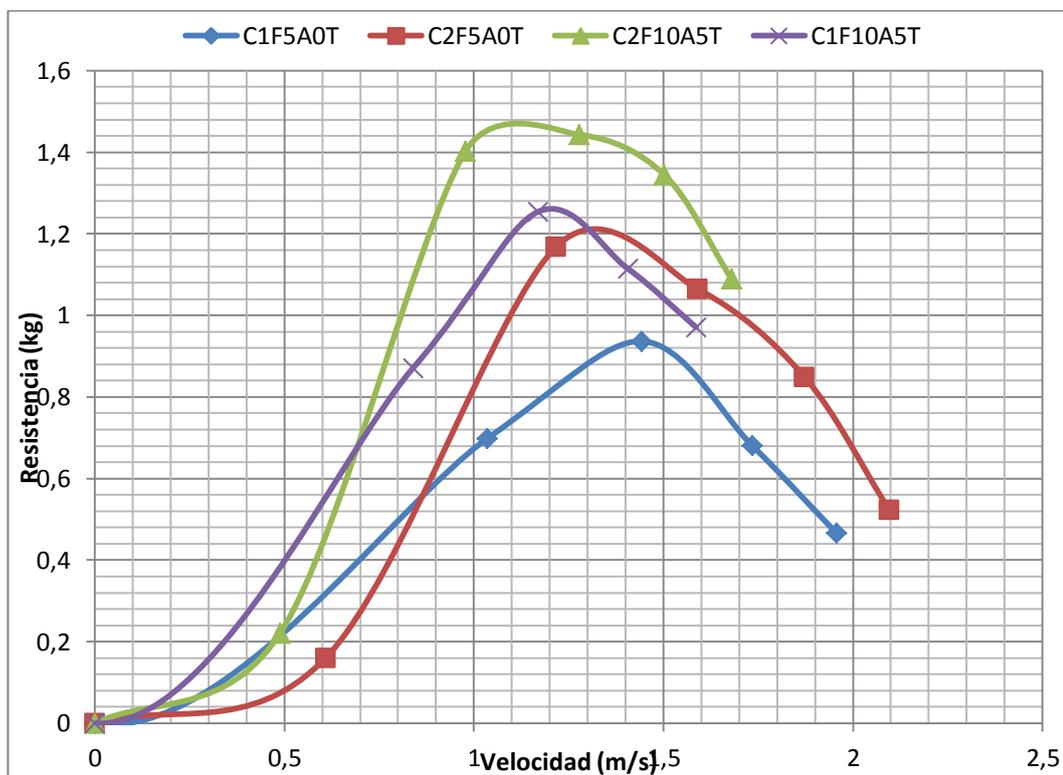


Figura 50: Resultados Teóricos de Resistencia al Avance del Modelo con Sistema de Folios en diferentes condiciones de Trabajo

Como se aprecia, para las cuatro condiciones de trabajo la Resistencia al Avance de manera inicial posee un comportamiento similar a una curva exponencial típica en las mediciones de resistencia; luego que el modelo se empieza a elevar, la curva tiende a decrecer.

Comparación de Resultados Teóricos y Experimentales

Antes de comparar las velocidades de despegue Teórica y Experimental se debe resaltar que los valores de sustentación generados por los folios varían de manera directa con el ángulo de ataque. Durante las pruebas del modelo se producían cambios de asiento, los que influenciaban en el ángulo de ataque de los folios y por tanto en la sustentación generada. Desafortunadamente debido a la posibilidad de daño no se instaló un inclinómetro para registrar el asiento durante las pruebas. Por este motivo en la gráfica solo se presenta un punto correspondiente a la velocidad de prueba a la cual el modelo se sustenta sobre el agua.



Figura 51: Variación del Angulo de Ataque de los Folios con Relación al Cambio de Asiento del Modelo.

La velocidad de despegue se considera aquel valor para el cual la sustentación de los folios es capaz de soportar todo el peso del sistema. Entonces para determinar dicho parámetro teóricamente, se calcula la sustentación de los folios a diferentes velocidades. Entonces la velocidad para la cual la sustentación es igual al peso del modelo, se considera la de Despegue. En este caso se asume que los valores de ángulo de ataque de los folios se mantienen constantes. Se incluye en la gráfica una línea horizontal correspondiente al peso del modelo en cada condición de trabajo. Como se aprecia en las figuras a continuación:

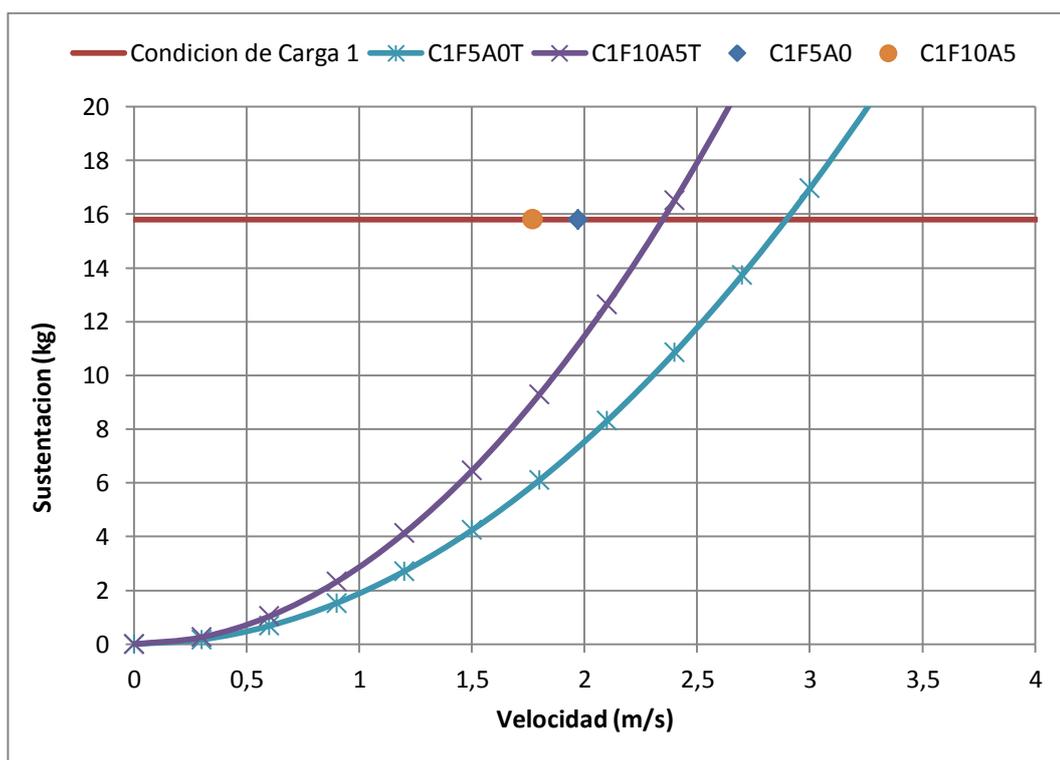


Figura 52: Velocidad de Despegue Experimental y Teórica para la Condición de Carga 1

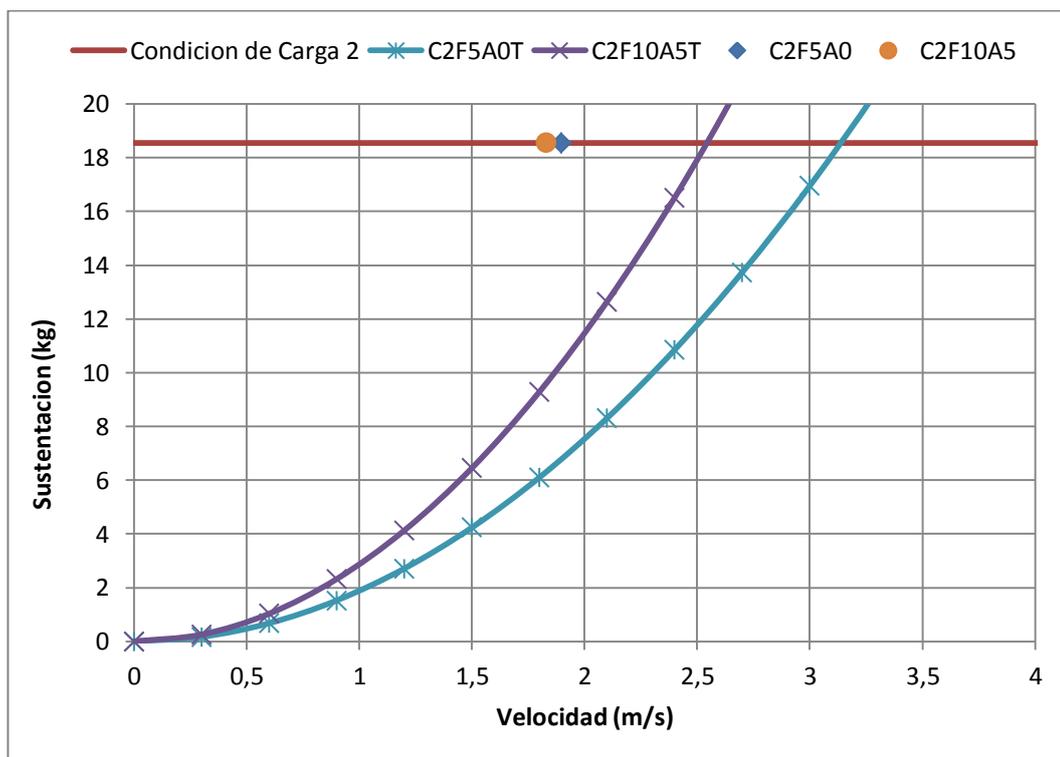


Figura 53: Velocidad de Despegue Experimental y Teórica para la Condición de Carga 2

Como se nota en los gráficos anteriores los valores experimentales de la velocidad de despegue se encuentran por debajo de los teóricos. Se piensa que esto se debe a la influencia del asiento sobre el ángulo de ataque durante las pruebas como se discutió previamente, y que no se las incluyó en las estimaciones teóricas.

Luego se comparan los datos de resistencia Teóricos y Experimentales del modelo para las dos condiciones de trabajo. En las gráficas se puede apreciar el comportamiento de la curva, que muestran una disminución de la resistencia conforme el modelo es elevado.

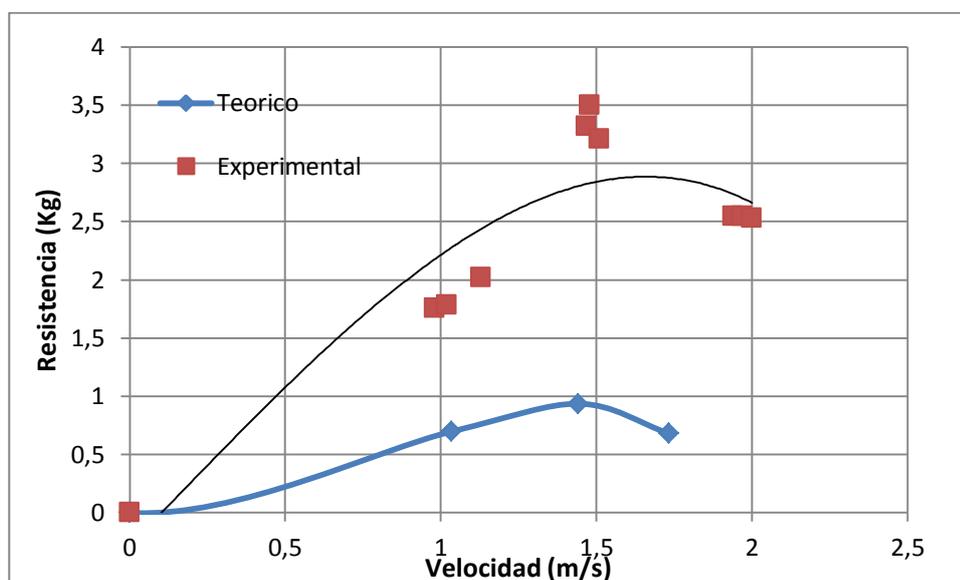


Figura 54: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 1, Folio de Proa a 5° y Folio de Popa a 0°.

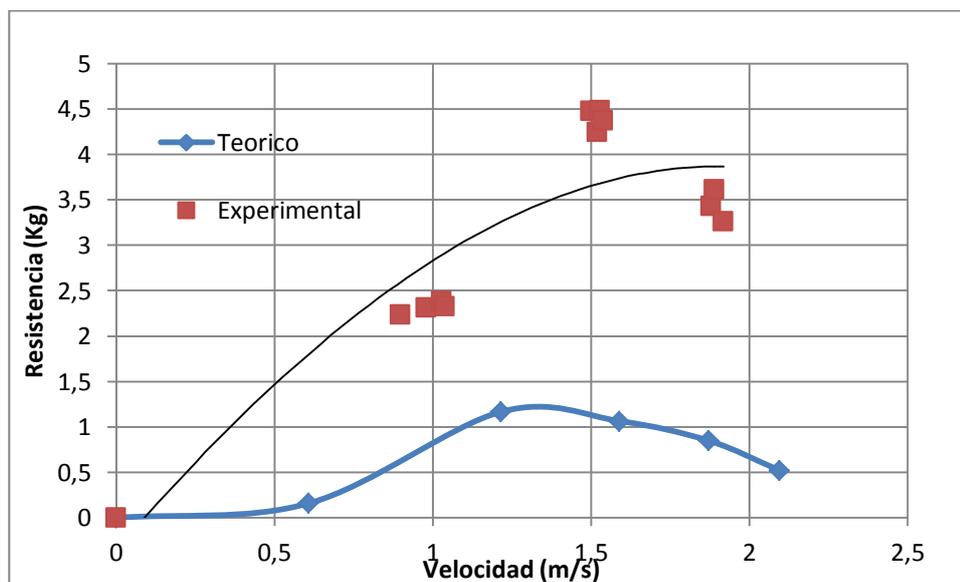


Figura 55: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 1, Folio de Proa a 10° y Folio de Popa a 5°.

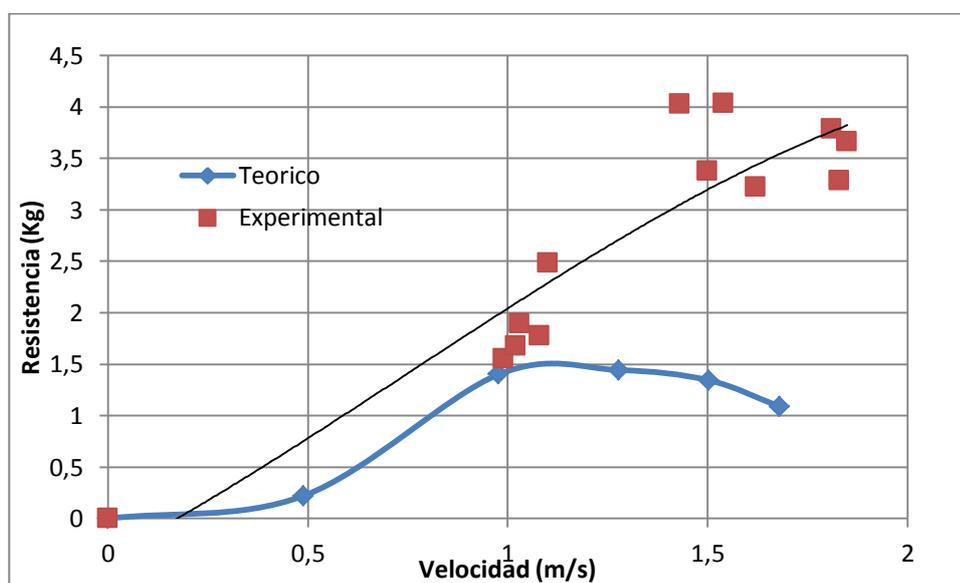


Figura 56: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 2, Folio de Proa a 10° y Folio de Popa a 5°.

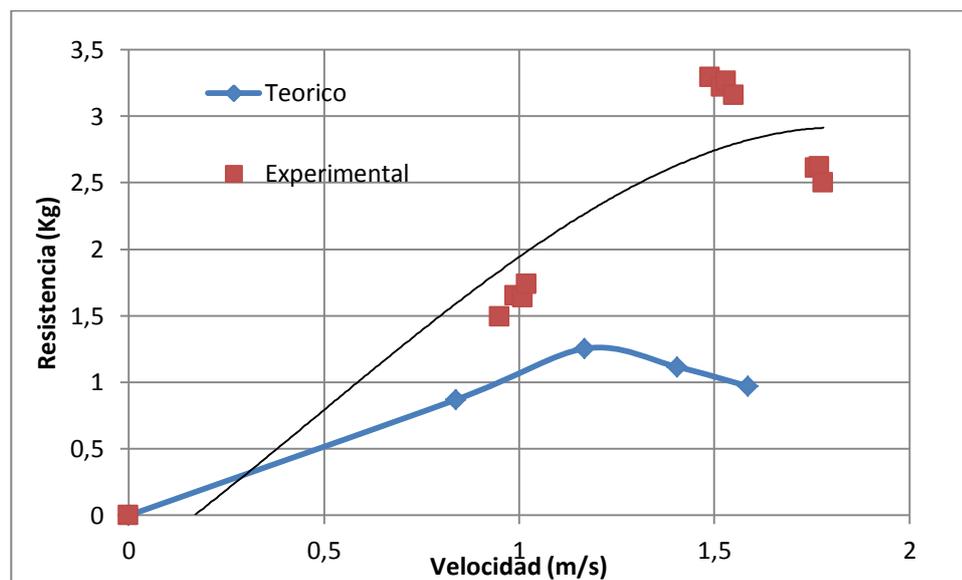


Figura 57: Resistencia al Avance en una Embarcación con Sistema de Folios para Condición de Carga 1, Folio de Proa a 10° y Folio de Popa a 5°.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores los valores de Resistencia experimentales se encuentran por encima de las teóricas de manera significativa, lo que se piensa se debe al aumento del ángulo de ataque por el incremento de asiento mencionado anteriormente. También es posible que incida el valor del coeficiente de Arrastre empleado, y, la interacción entre los folios de Proa y Popa. El comportamiento de las curvas, guardan similitud, ya que antes de la velocidad de sustentación poseen un comportamiento exponencial, y luego tienden a decrecer.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN PRELIMINAR DE FOLIOS A UNA EMBARCACIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMBARCACIÓN.

La embarcación prototipo que se utiliza para realizar la implementación de un Sistema de Folios para su Sustentación, posee una eslora de 7,98 m y el casco es de fibra de vidrio. Posee además formas prismáticas desde la Sección Media, una china y un ángulo de Astilla muerta de 14° y se planea transportar 12 personas con un peso total de 4200 kg. La velocidad de operación es alrededor de 14 nudos, con propulsión mediante motores fuera de borda de pata larga, y está destinada a realizar labores de cabotaje

La embarcación que se utiliza para implementar el Sistema de Folios es del tipo planeador, siendo el adecuado para este procedimiento. En la siguiente tabla se presentan las características principales de la embarcación.

Eslora Total	7,98	metros
Manga	2,59	metros
Puntal	0,98	metros
Calado Ligero	0,39	metros
Desplazamiento Ligero	3100	Kilogramos
Calado Cargado	0,42	metros
Desplazamiento Cargado	4200	Kilogramos
Angulo de Astilla Muerta	14	Grados

Tabla XV: Dimensiones Principales de la Embarcación

Además esta embarcación posee formas prismáticas desde la Sección Media hasta el espejo, cuenta con una china y un ángulo de astilla muerta de 14°. El costado forma un ángulo de 12° con la vertical, y la posición del centro de Boyantes está a 3,72m del espejo en condición cargada y 3,67m en condición ligera. Se modelo la embarcación en 3D empleando el Programación Computacional Rhinomarine como se puede apreciar en la siguiente figura

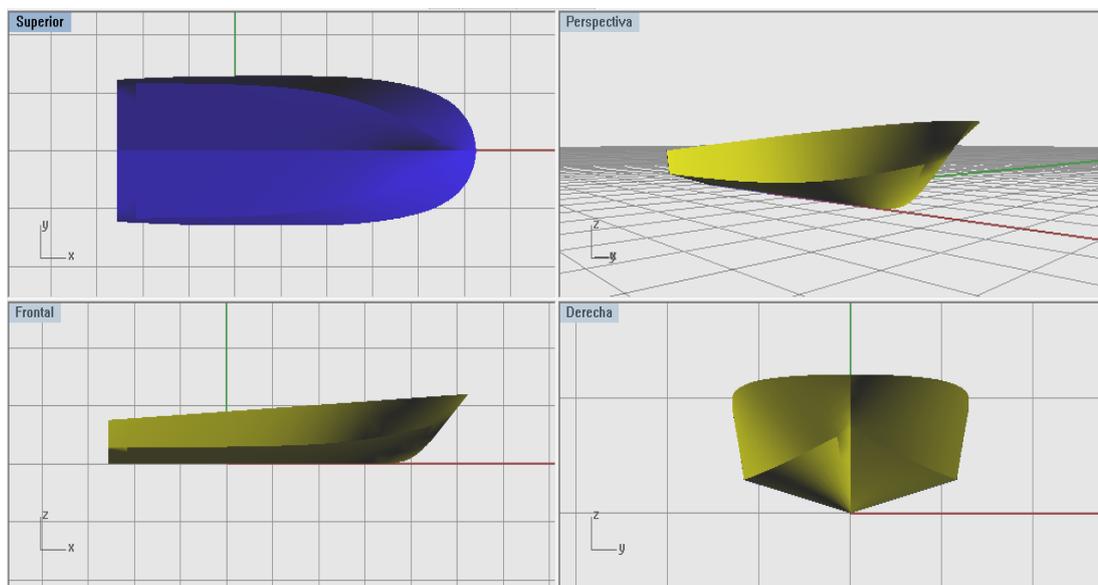


Figura 58: Embarcación Planeadora modelada en 3D

Además en la Figura 59 se presentan las curvas hidrostáticas de la embarcación utilizando [12]. De estas curvas se toman las características para las condiciones de carga a ser analizadas:

CURVAS HIDROSTÁTICAS

lancha

TRIMADO: 0.00

⊙D_{es} 1=2.5 ▲10KMT 1=12.5 ✦KML 1=12.5 ✕APF 1=12.5 ✧KB 1=1.2 +SMoj 1=12.5 ✖R_{max} 1=1.2

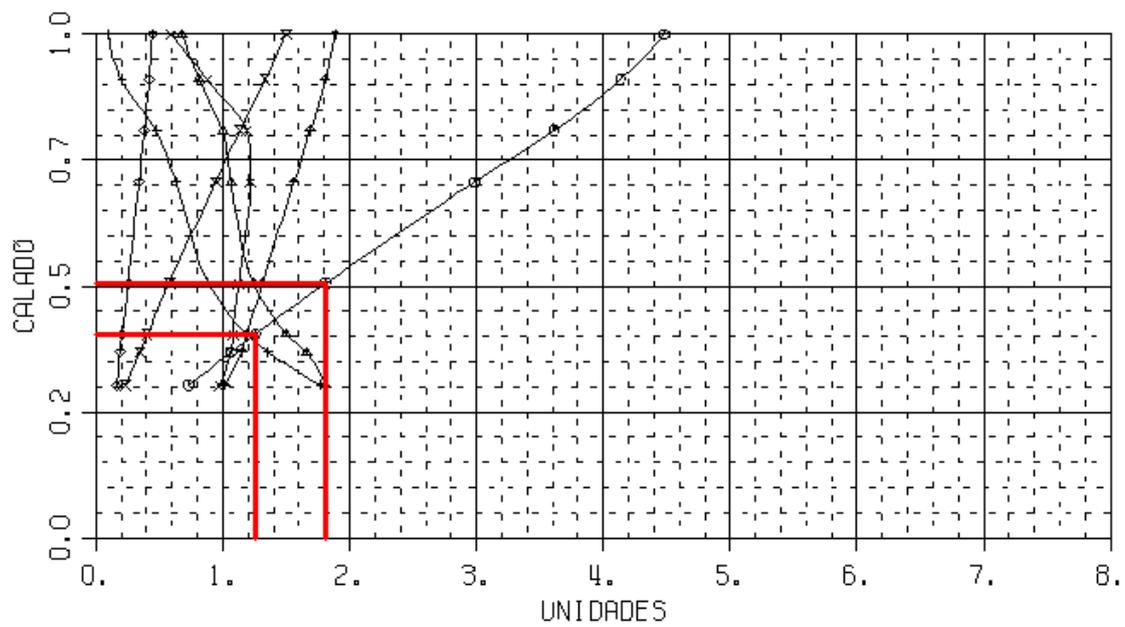


Figura 59: Curvas Hidrostáticas de la Embarcación

4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS FOLIOS

A partir del esquema empleado para el Sistema de Folios empleado previamente para sustentar el modelo, se asigna las dimensiones para la embarcación prototipo. Manteniendo el perfil con base plana y parte superior con forma de arco circular, se determinan las dimensiones de los Folios aplicando la Teoría Bidimensional. Se consideran ángulos de ataque efectivos de 10° en Proa y de 5° en Popa. Finalmente se establecen las velocidades de despegue de la embarcación para dos condiciones de carga diferentes.

Manteniendo el esquema del sistema de folios que se utilizó previamente para sustentar experimentalmente el modelo, se realiza un dimensionamiento para la embarcación mencionada anteriormente. Asignando las dimensiones en base a los requerimientos de sustentación para la condición de carga y a las características de la embarcación como se aprecia en la Figura 60. En la Figura 61 se puede apreciar una representación de la Fuerza de sustentación, generada por cada folio y la ubicación del LCG de la embarcación.

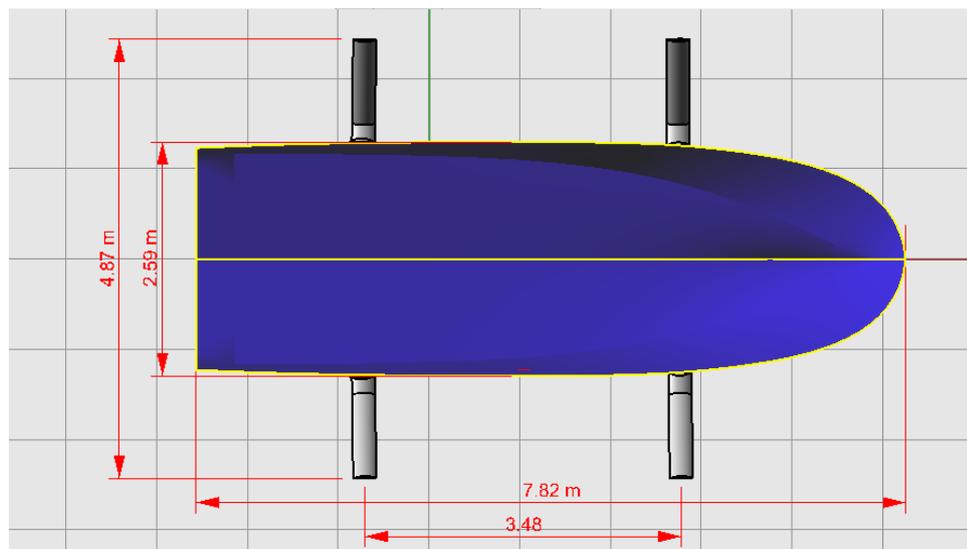


Figura 60: Dimensiones de los folios y la embarcación.

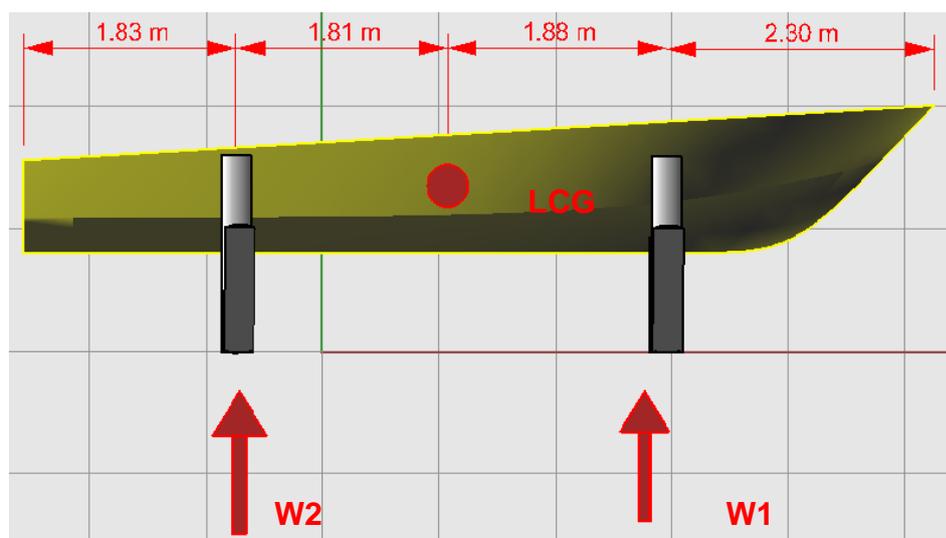


Figura 61: Representación de las Fuerzas Actuantes durante la Sustentación, y la ubicación del LCG de la Embarcación

El dimensionamiento de los folios se resume en la tabla siguiente, para la condición de carga máxima. Luego se evalúa las dimensiones para una condición de carga media. A continuación se presentan las tablas con las fuerzas que debe generar cada folio en cada condición de carga.

		Condición de Carga 1	Condición de Carga 2	
	Peso Total	4400	3100	kg
	Eslora Total	7,82	7,82	m
Medido desde Sec. Media	LCG (+ Proa)			m
	LCG (- Popa)	0,32	0,27	m
	LCG medido desde Proa	4,23	4,18	m
Medido desde Proa	Ubicación Folio Proa	2,3	2,3	m
	Ubicación Folio Popa	5,99	5,99	m
Medido desde LCG	Ubicación Folio Proa	1,93	1,88	m
	Ubicación Folio Popa	1,76	1,81	m
Sustentación Requerida	w2	2301,36	1579,40	kg
	w1	2098,64	1520,60	kg

Tabla XVI: Condiciones de Carga de la Embarcación

		C_L	C_D
Ang. ataque Proa	10	0,8654	0,08333
Ang. ataque Popa	5	0,8636	0,01902
Manga	2,59	m	
Long. Folio	2,7	m	
Cuerda	0,25	m	

Tabla XVII: Dimensiones Principales y Condiciones de Trabajo de los Folios.

Con los datos presentados anteriormente se grafica la Sustentación Total generada por los folios diferentes velocidades de avance; se incluyen en las gráficas líneas constantes horizontales correspondientes a los pesos para cada condición de carga. De esta forma se determinan las velocidades de despegue de la embarcación para cada condición de carga (16,7 nudos para la Cargada y 14,2 nudos para la Reducida).

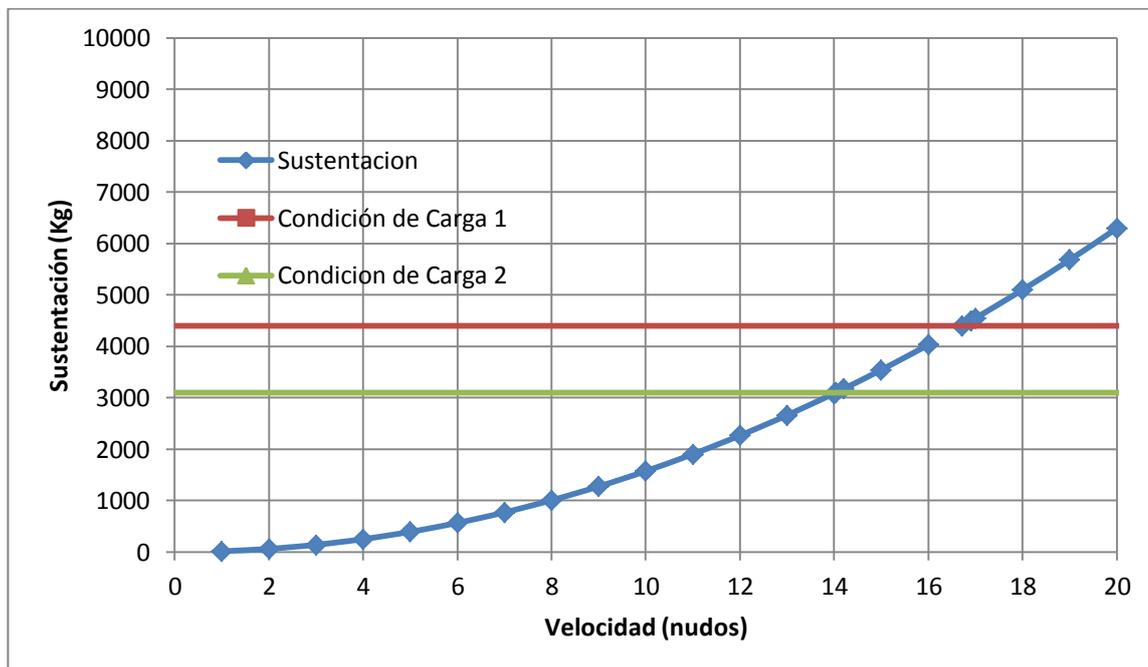


Figura 62: Velocidad vs Sustentación de los folios de la Embarcación

4.3. ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FOLIOS INSTALADOS EN LA EMBARCACIÓN.

Considerando que se opera a la velocidad de despegue de la embarcación, se calcula la resistencia generada por los folios mediante la Teoría Bidimensional utilizando un coeficiente de arrastre constante. Luego se determina la resistencia del casco mediante el método de Savitsky para compararla con los resultados de bote con folios en las dos condiciones de carga. Finalmente se realiza una comparación de los valores de potencia al eje y consumo de combustible para una ruta de 200 millas náuticas. Se determina que al usar folios, la Potencia requerida se reduce a la mitad aproximadamente.

Resistencia a partir de la Teoría Bidimensional de Folios

El incrementar la velocidad, luego de alcanzar la de despegue en una embarcación equipada con un sistema de folios, no es recomendable debido a la reducida profundidad a la cual se encuentran sumergidos los folios lo cual posiblemente lleve a una pérdida en eficiencia por la aparición de cavitación. Además, mientras más cerca se encuentren los folios de la superficie del agua, es mayor la probabilidad de perder el control de la embarcación, lo cual se apreció durante las pruebas experimentales. Por esta razón la velocidad de despegue se tomará para calcular la Resistencia Total.

Siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó para calcular la resistencia al avance del sistema de folios en el modelo, véase el subcapítulo 3,3 se presentan los valores de Resistencia al avance en la siguiente tabla.

	Velocidad (nudos)	Sustentación Total (kg)	Resistencia Total (kg)
Condición de Carga 1	14,2	3173,8	187,9
Condición de Carga 2	16,72	4400,2	681,6

Tabla XVIII: Resistencia Generada para cada Condición de Carga

Resistencia a partir del Método de Savitsky

Comúnmente en nuestro medio, para realizar la estimación de la resistencia al avance en lanchas planeadoras se utiliza el método de Savitsky, y para aplicarlo se hace uso de los uno de los programas desarrollados en el curso de Programación Aplicada I que se dicta en la Facultad, [15]. Los resultados para las dos condiciones de carga del modelo se presentan a continuación.

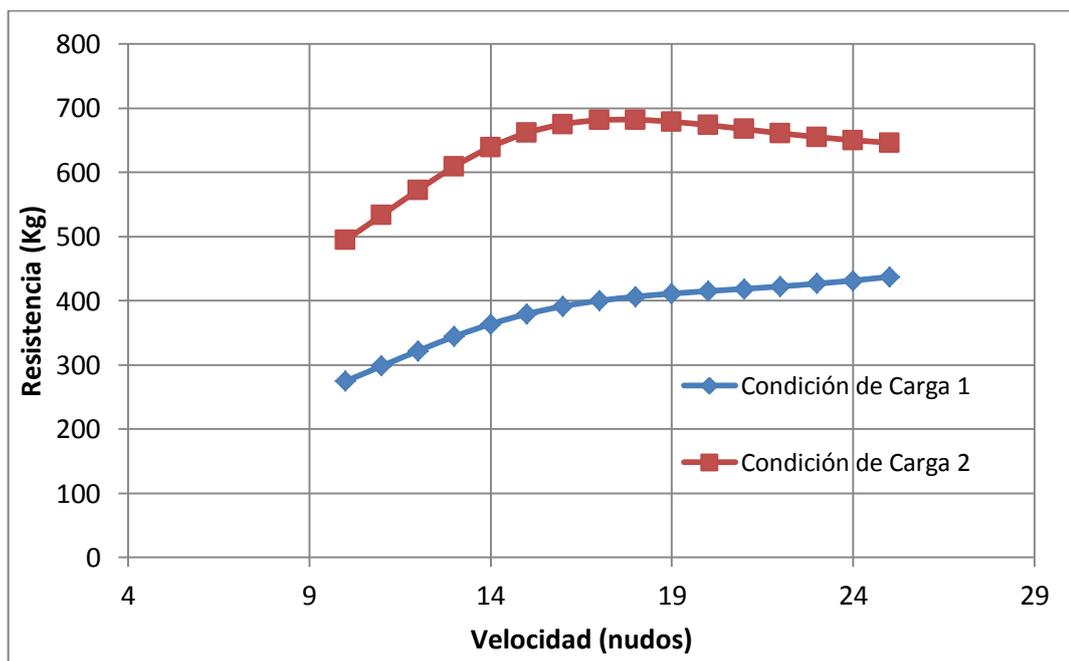


Figura 63: Resistencia al Avance para las dos Condiciones de Carga

Comparación de los Valores de Potencia al Eje

A partir de los valores de resistencia obtenidos previamente se calcula la potencia al eje necesaria para impulsar la embarcación, asumiendo una eficiencia propulsiva de 0,5, con los siguientes resultados:

Cond. de Carga	Velocidad (nudos)	SHP Folios	SHP Casco Sumergido.
Cond. 1	14	34	70
Cond. 2	17	57	156,8

Tabla XIX: Potencia al Eje para las diferentes Condiciones de Trabajo

Como se puede apreciar para las dos condiciones de carga, la potencia al eje necesaria se reduce aproximadamente a la mitad, consistente con lo que menciona [2]. Se nota un aumento de potencia requerida para la condición de carga 2, ya que tiene mayor peso.

Estimación del Consumo de Combustible

A partir de la información brindada por los fabricantes de motores fuera de borda Mercury, [17], asumiendo que la hélice es la adecuada y que el motor alcanza a entregar toda la potencia disponible se tienen los siguientes datos.

	SHP Asignado (HP)	Consumo de Combustible (GPH)	Forma de Trabajo
Condición de Carga 1	60	4,9	Sin Folios
	40	3,6	Con Folios
Condición de Carga 2	180	15,8	Sin Folios
	60	4,9	Con Folios

Tabla XX: Desempeño de los Motores Fuera de Borda para cada Condición de Carga

Con la información presentada anteriormente se realiza una estimación del combustible consumido, para un recorrido de 200 millas náuticas como se aprecia en la tabla a continuación:

	Tiempo de Navegación (horas)	Consumo de Combustible (Galones)	Condición de Trabajo
Condición de Carga 1	14,28	70	Sin Folios
		51,4	Con Folios
Condición de Carga 2	11,75	185,65	Sin Folios
		57,5	Con Folios

Tabla XXI: Consumo de Combustible para diferentes Condiciones de Trabajo

Por lo tanto se puede decir que para la Condición de Carga 1 el ahorro de combustible es de aproximadamente 18,6 galones y para la Condición de Carga 2 es de 128,17 galones, en la trayectoria de 200 millas náuticas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se calcula de manera teórica y experimental la implementación de un sistema de folios para sustentar una embarcación y su influencia en la Resistencia al Avance. Los resultados teóricos se los calculan mediante la teoría Bidimensional de los folios, que se basa en el Coeficiente de Sustentación de la sección y no considera la influencia de la Cavitación. Los resultados experimentales se obtuvieron con pruebas de remolque realizadas en aguas tranquilas halando lateralmente el modelo desde una lancha. Finalmente, se comparan estos resultados para determinar los beneficios que se obtendrían en la embarcación.

1. El proceso de diseño seguido aplicando la teoría Bidimensional fue de fácil implementación, y aunque los resultados teóricos se diferenciaron de los experimentales, resulta en una opción viable a nivel de diseño Preliminar
2. El proceso de cálculo numérico del flujo viscoso 2D alrededor de la sección del folio produjo resultados poco confiables. La variación de los resultados en diferentes tiempos de simulación es muy alta entre sí. Además, para ciertos ángulos de ataque, los resultados para un tiempo de simulación de 10 segundos, considerado razonablemente largo, son muy diferentes a los de otros. Por ello, debido a la limitada experiencia en el uso de técnicas de CFD en nuestra comunidad técnica, todavía tendremos que esperar más experiencias antes de confiar en resultados numéricos para analizar flujos viscosos.
3. El proceso experimental para determinar la resistencia del modelo con sistema de folios instalados resultó adecuado en este nivel que puede considerarse como Preliminar. Durante las pruebas la evidencia muestra claramente el proceso de avanzar desde un régimen de casco sumergido hasta alcanzar el despegue. Al comparar las velocidades

de despegue, los valores experimentales son menores que los teóricos. Por otro lado al comparar los valores de resistencia generados al momento que la embarcación se encuentra fuera del agua, los valores experimentales son aproximadamente 5 veces más a los determinados de manera teórica; se piensa que en esta diferencia incide fuertemente el cambio en ángulo de ataque debido al asiento que alcanzaba el modelo. Finalmente al comparar los valores experimentales del modelo con y sin el Sistema de Folios se obtiene que los valores de resistencia son ligeramente menores cuando el modelo se encuentra sin Sistema de Folios, encontrando una diferencia mayor cuando el modelo se encuentra en la Condición de Carga 2.

4. Basándose en los parámetros y resultados obtenidos en el diseño de sistema de folios para el modelo se realizó un diseño conceptual para una lancha prototipo. Comparando los resultados obtenidos en el diseño conceptual con los obtenidos en los realizados en el modelo, se observó gran similitud. Llevando los resultados a la aplicación profesional, se determinó una reducción en potencia requerida para propulsión y por ende en consumo de combustible al utilizar el sistema de folios a la velocidad máxima; se determinó que cuando la embarcación va descargada esta reducción es de 27% y cuando está cargada 69% aproximadamente. Esto hace que la instalación de folios

en una embarcación rápida sea atractiva al momento de vender esta idea.

RECOMENDACIONES

1. Para pruebas posteriores sería recomendable utilizar un medidor de ángulos de inclinación durante las pruebas de arrastre del modelo con folios, ya que el asiento varía a lo largo de la corrida hasta que la embarcación logra sustentarse completamente fuera del agua. Este ángulo permitirá desarrollar un análisis más detallado acerca de la Sustentación que genera cada folio ya que a medida que cambia el ángulo de inclinación de la embarcación, cambia también el ángulo de ataque de los folios variando entonces la sustentación que generan.
2. Además para pruebas posteriores sería conveniente evaluar el comportamiento del modelo cuando se encuentra escorado, para evaluar el adrizamiento del modelo debido a la inmersión de área extra de los folios. Esto permitiría analizar el tipo de folios, Surface-Piercing como Sistema de Control actual.

3. Al momento de diseñar un Sistema de Folios, se establece una velocidad de trabajo determinada para que la embarcación consiga sustentarse completamente fuera del agua. Se puede variar la velocidad máxima de operación de la embarcación pero esto depende implementar un sistema de control automático para variar el ángulo de ataque de los folios. Sería recomendable investigar la forma de poder producir de manera sencilla esta variación de ángulo de ataque.
4. Resultaría de gran conveniencia realizar un análisis utilizando métodos numéricos, acerca de la influencia del folio de proa cuando genera la estela y como afecta está el comportamiento y desempeño del folio de popa, para tenerlo en cuenta para diseños posteriores al momento del dimensionamiento.
5. Finalmente para justificar el uso del perfil que se utilizó durante estas pruebas sería conveniente realizar un análisis detallado de la distribución de presiones para identificar si existe riesgo de cavitación cuando se utiliza este tipo de perfil en el prototipo.

ANEXOS

ANEXO A

DETERMINACION DE LA RIGIDEZ FLEXURAL DE LA SECCION

Para determinar la Rigidez Flexural de la sección, se utiliza una probeta de 23 cm de longitud con igual sección transversal a la utilizada en el sistema de folios, la cual es sometida a una carga puntual en el punto Medio. Se utilizan dos métodos para encontrar resultados y finalmente compararlos para comprobar su valor de verdad. El primer método a utilizarse será el de los desplazamientos, y sabiendo que el momento Flector es igual a:

$$M(x) = \frac{F}{2}x - F\left(x - \frac{L}{2}\right)E\left(x - \frac{L}{2}\right) = EIv_{,xxx}$$

Luego integrando dos veces, el desplazamiento es igual a:

$$EIv(x) = \frac{F}{12}x^3 - \frac{F}{6}\left(x - \frac{L}{2}\right)^3 E\left(x - \frac{L}{2}\right) + Ax + B$$

Aplicando condiciones de Frontera para una viga simplemente soportada se tiene que:

$$A = -\frac{FL^2}{16}, \quad B = 0$$

Finalmente el desplazamiento en Sección Media es igual a:

$$EIv\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{FL^3}{48}$$

Sabiendo que la pendiente en un gráfico de F vs $v\left(\frac{L}{2}\right)$ es la siguiente:

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = -F\left(\frac{L^3}{48EI}\right)$$

Luego después de encontrar la pendiente a partir de resultados experimentales, y despejando formulas se tiene que la rigidez flexural es:

$$EI = \frac{L^3}{48m_1}$$

siendo:

F: Fuerza aplicada.

E: Módulo de Young.

I: Inercia

EI: Rigidez Flexural

L: Longitud de la probeta

m_1 : Pendiente de la curva F vs $v\left(\frac{L}{2}\right)$

$M=EIv_{,xx}$: Momento Flector

El segundo método que empleado es el de las deformaciones unitarias, a partir de la Ley de Hooke se tiene lo siguiente:

$$\sigma_x = \varepsilon_x E$$

Teniendo en cuenta también que:

$$\varepsilon_x = \frac{Mc}{IE}$$

Además teniendo en cuenta que:

$$M = \frac{F}{2}x - F\left(x - \frac{L}{2}\right)E\left(x - \frac{L}{2}\right)$$

$$M\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{FL}{4}$$

Luego igualando las ecuaciones se tiene lo siguiente:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = F\left(\frac{Lc}{4IE}\right)$$

Llamando m_2 la pendiente de la relación F vs ε_x :

$$m_2 = \frac{Lc}{4IE}$$

Finalmente despejando la ecuación se obtiene la expresión para obtener la rigidez flexural a partir del método de la deformación unitaria que es la siguiente:

$$EI = \frac{Lc}{4m_2}$$

siendo

c : Distancia medida desde el eje neutro hasta la fibra más alejada.

m_2 : Pendiente medida en gráfico de F vs ϵ_x

Para simular la carga puntual en la viga con sección del folio se debe construir un accesorio que se acople a la superficie superior del folio ya que esta es irregular, por lo cual se eligió madera para fabricar el molde como se puede apreciar en la figura:

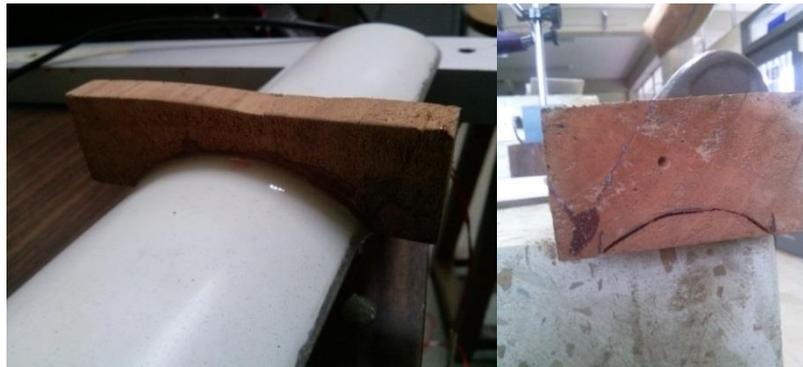


Figura 64: Accesorio para Simulación de Carga Puntual

Luego de deben preparar los equipos para la prueba de flexión, para los desplazamientos se utiliza el medidor de caratula con su respectiva base como se puede ver en la figura. Para las deformaciones unitarias se utiliza el equipo de medición de Deformaciones Unitarias marca (“InstruNet”) para la adquisición de los datos enviados por el extensómetro como se puede apreciar en las figuras.



Figura 65: Indicador de Caratula



Figura 66 Extensómetro Instalado y Dispositivo para Adquisición de Datos.

Establecido el marco teórico y los equipos a utilizarse, se realizó la prueba de flexión como se puede apreciar en la figura:

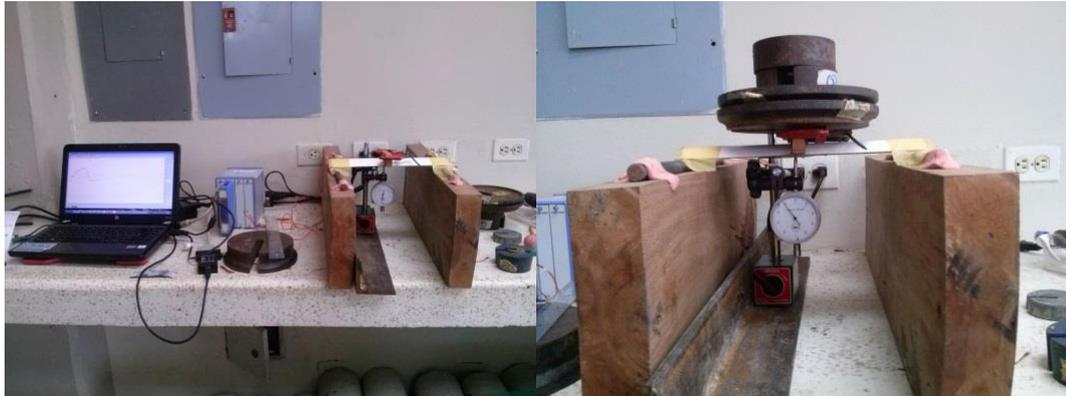


Figura 67: Equipos Instalados para la Prueba de Flexión

Obteniendo los siguientes resultados después de aplicar carga de manera periódica sobre la viga folio como se aprecia en la Figura 67.

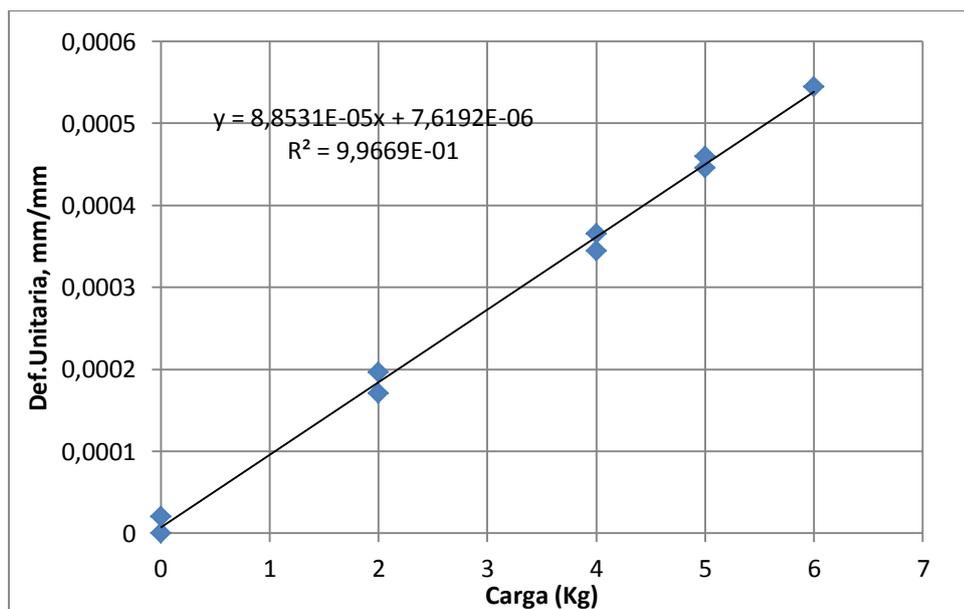


Figura 68: Curva de Deformaciones Unitarias vs Carga Aplicada

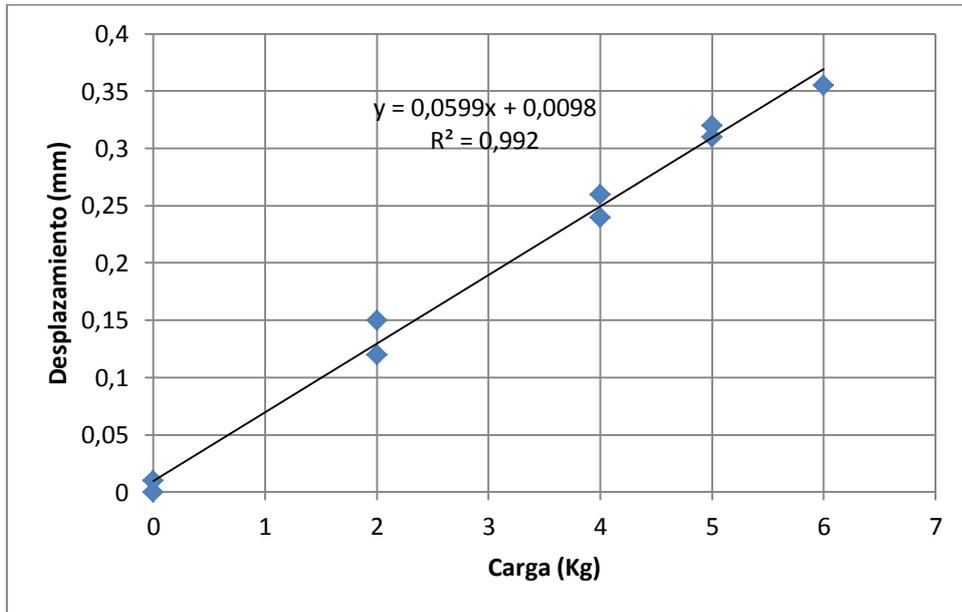


Figura 69: Curva de Desplazamientos vs Carga Aplicada

A partir de la información obtenida en la gráfica y las formulaciones descritas anteriormente se determina que la rigidez flexural obtenida a partir de las deformaciones unitarias es $4.02e4 \text{ Kg.cm}^2$ y por desplazamientos es igual a $4.51e4 \text{ Kg.cm}^2$ se toma un valor promedio de $4.265e4 \text{ Kg.cm}^2$ con el que se realiza el cálculo estructural.

ANEXO B

RESUMEN PRUEBAS EXPERIMENTALES

En el mes de noviembre del 2013 se realizaron las pruebas experimentales para determinar la resistencia de un modelo equipado con un sistema de folios. Se graficaron y promediaron los datos obtenidos en mili-Voltios usando Excel. Cada medición registraba 60 datos por segundo, durante 20 segundos, dando un total de 1200 datos por corrida. Para cada condición de trabajo se registró un mínimo de 3 mediciones para cada velocidad. Recordando lo establecido de en el capítulo 3, se presenta la nomenclatura utilizada para cada condición de carga.

Condición de Carga 1 (15.8 kg)	Con Sistema de Folios	F. Proa 10° F. Popa 5°	C1F10A5
		F. Proa 5° F. Popa 0°	C1F5A0
	Sin Sistema de Folios		C1WF
Condición de Carga 2 (18.55 kg)	Con Sistema de Folios	F. Proa 10° F. Popa 5°	C2F10A5
		F. Proa 5° F. Popa 0°	C2F5A0
	Sin Sistema de Folios		C2WF

Tabla XXII: Condiciones de trabajo para las pruebas de Resistencia.

A continuación se presentan una graficas de cada rango de velocidad para condición de carga, luego se presenta un resumen de los datos y finalmente un grafica de resistencia total para condición de carga individualmente.

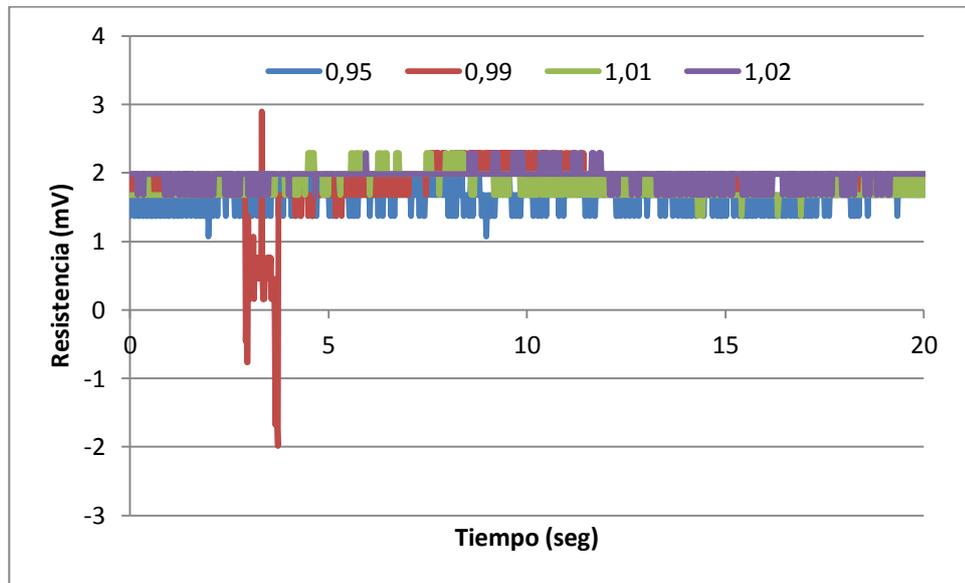


Figura 70: Resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 1

Lectura en mV				
promedio	1,666	1,855	1,837	1,958
varianza	0,023	0,150	0,029	0,012
max	1,984	2,899	2,289	2,289
min	1,068	-1,984	1,373	1,678
Velocidad (m/s)	0,95	0,99	1,01	1,02

Tabla XXIII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 1

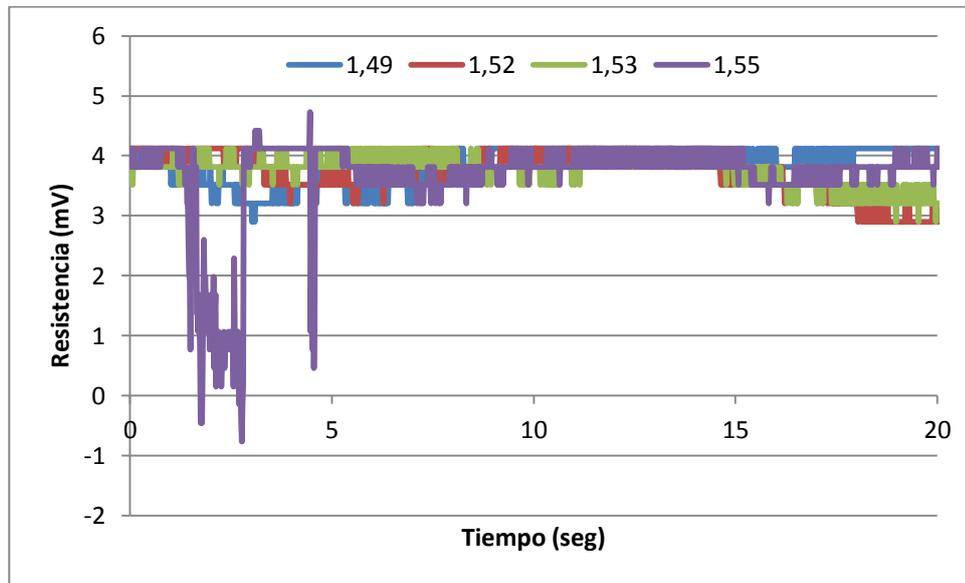


Figura 71: Resultados de Resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 2

Lectura en mV				
promedio	3,813	3,726	3,781	3,653
varianza	0,090	0,126	0,061	0,608
max	4,120	4,120	4,120	4,730
min	2,899	2,899	2,899	-0,763
Velocidad (m/s)	1,49	1,52	1,53	1,55

Tabla XXIV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 2

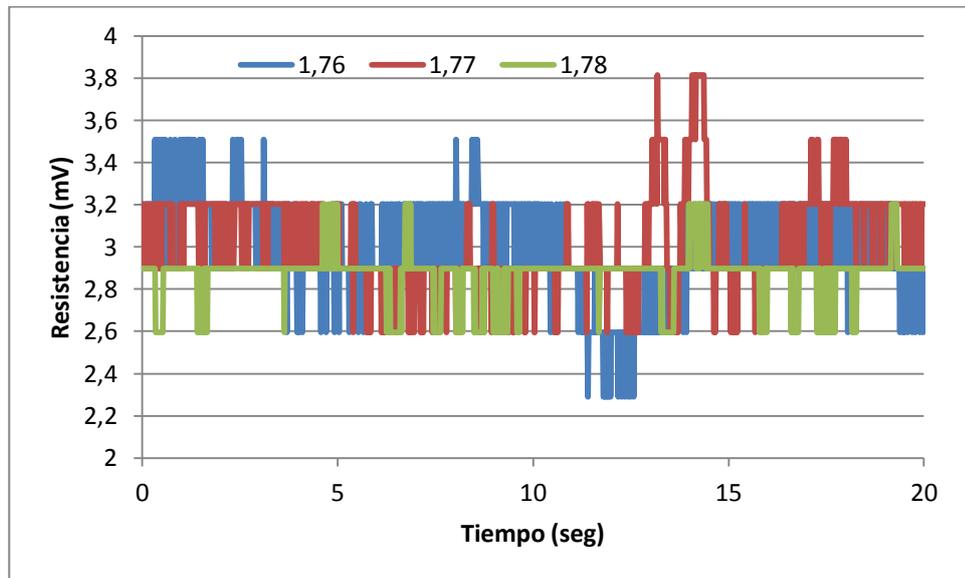


Figura 72: Resultados de Resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 3

Lectura en mV			
promedio	2,999	3,015	2,872
varianza	0,051	0,052	0,015
max	3,510	3,815	3,204
min	2,289	2,594	2,594
Velocidad (m/s)	1,76	1,77	1,78

Tabla XXV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1F10A5, velocidad 3

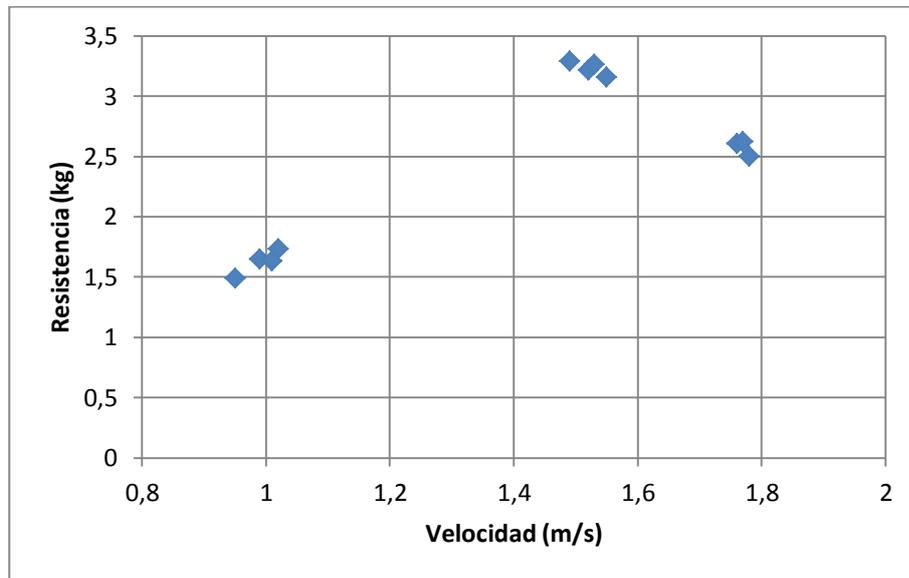


Figura 73: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C1F10A5

C1F10A5	Velocidad (m/s)	0,993	1,523	1,770
	Froude	0,278	0,427	0,496
	Resistencia (kg)	1,630	3,234	2,580

Tabla XXVI: Resumen de resultados C1F10A5

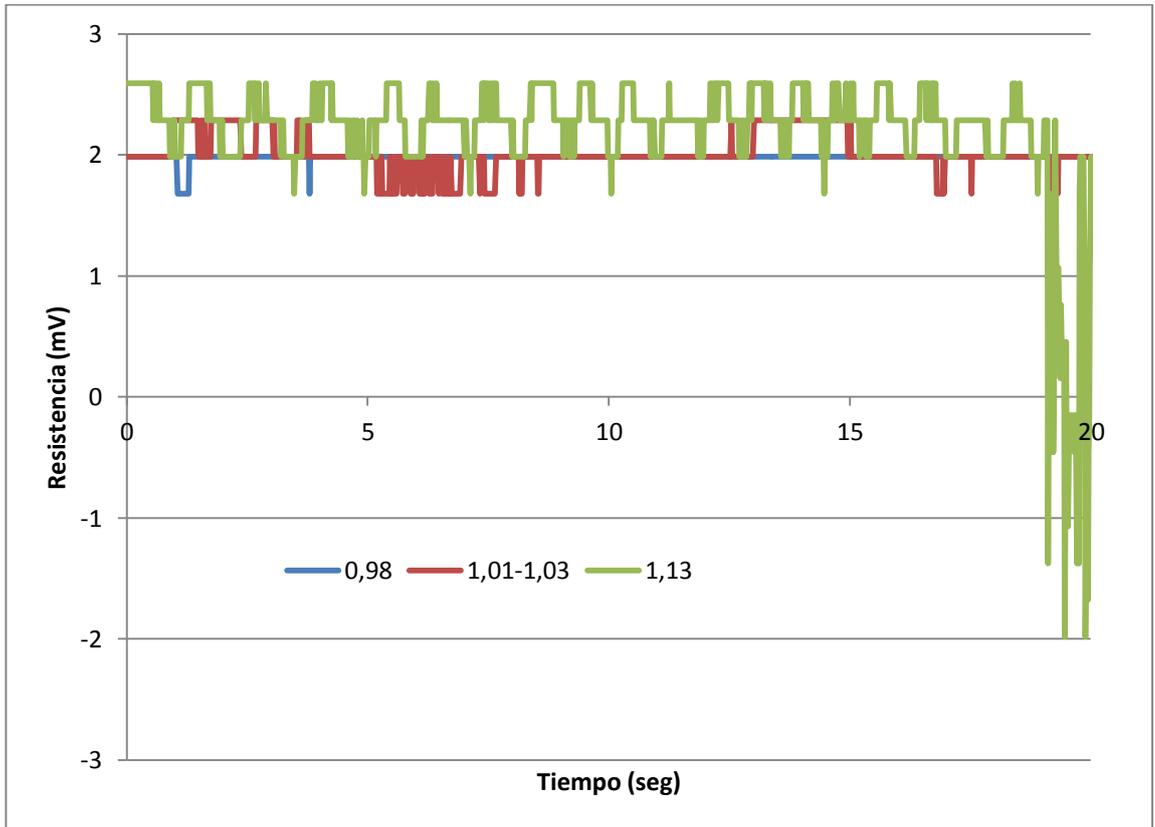


Figura 74: Resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 1

Lectura en mV			
promedio	1,980	2,015	2,295
varianza	0,001	0,024	0,044
max	1,984	2,289	2,594
min	1,678	1,678	-1,984
velocidad (m/s)	0,98	1,02	1,13

Tabla XXVII: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 1

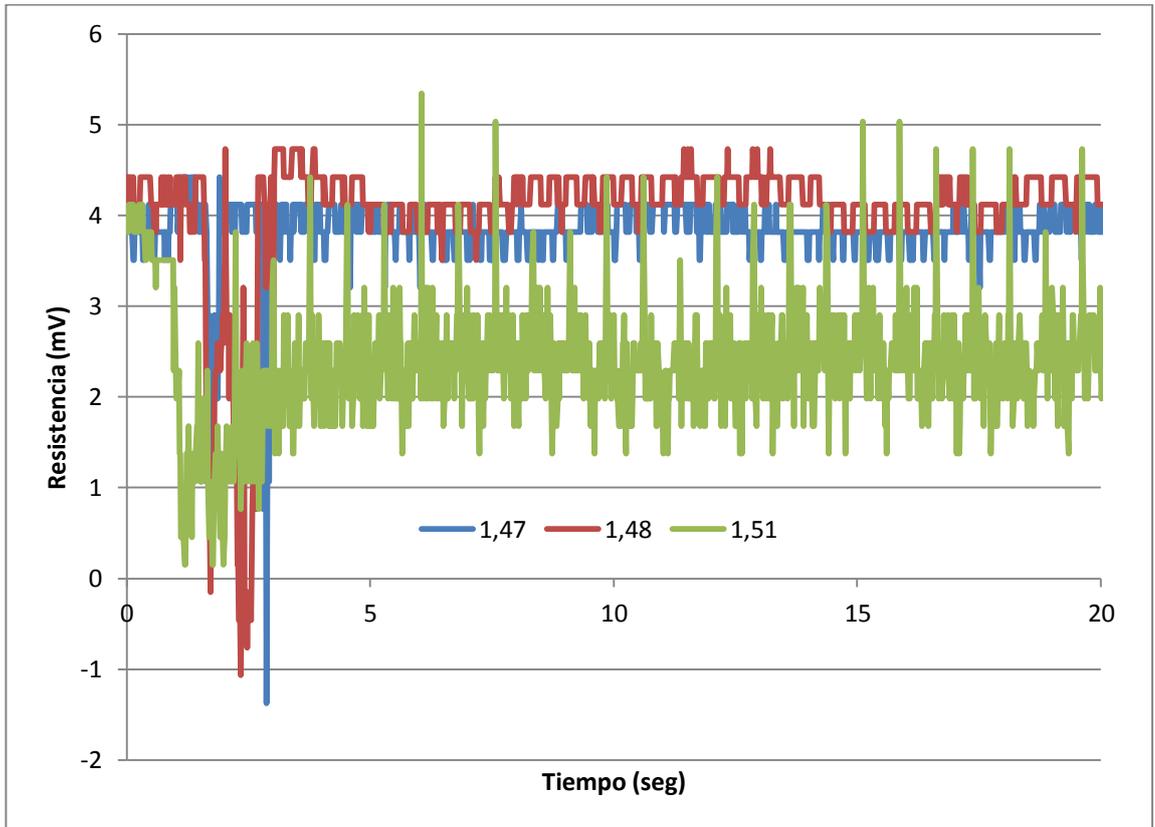


Figura 75: Resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 2

Lectura en mV			
promedio	3,843	4,056	3,715
varianza	0,136	0,540	0,456
max	4,425	4,730	5,341
min	-1,373	-1,068	0,153
velocidad (m/s)	1,47	1,48	1,51

Tabla XXVIII: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 2

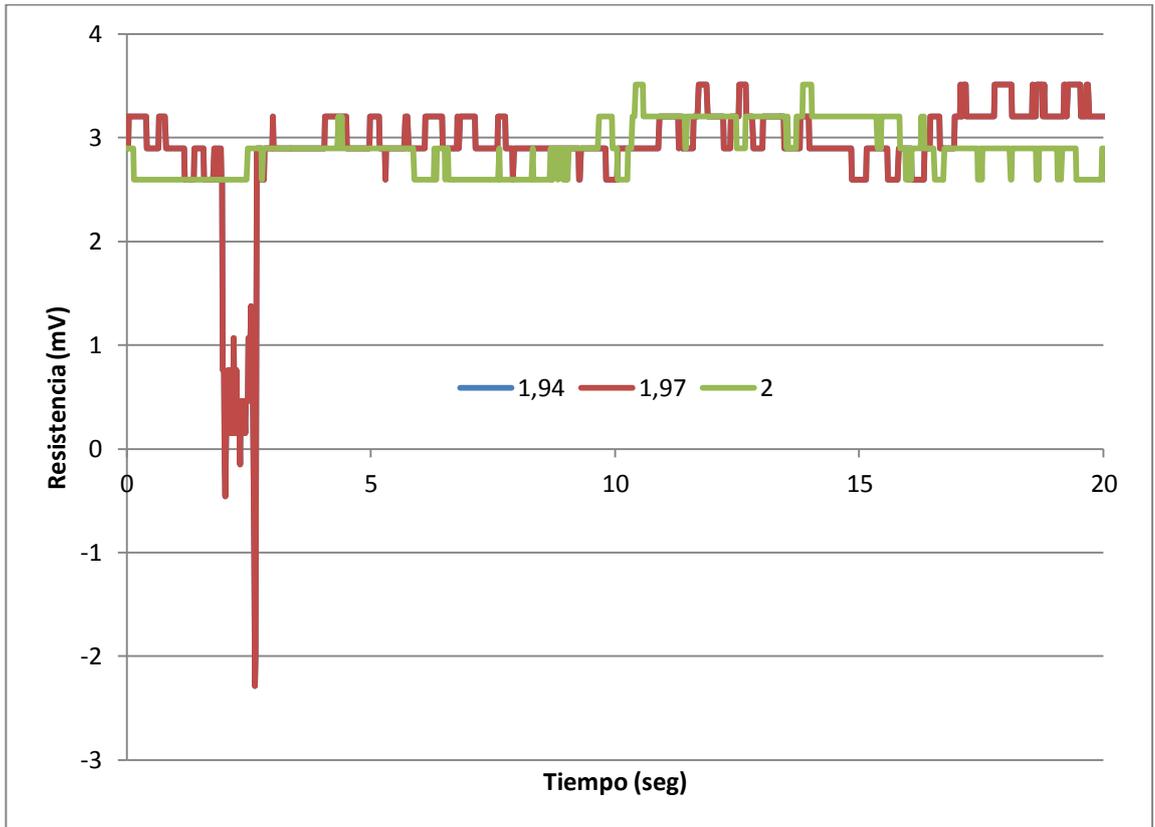


Figura 76: Resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 3

Lectura en mV			
promedio	2,919	2,919	2,901
varianza	0,310	0,310	0,059
max	3,510	3,510	3,510
min	-2,289	-2,289	2,594
velocidad (m/s)	1,94	1,97	2

Tabla XXIX: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C1F5A0, velocidad 3

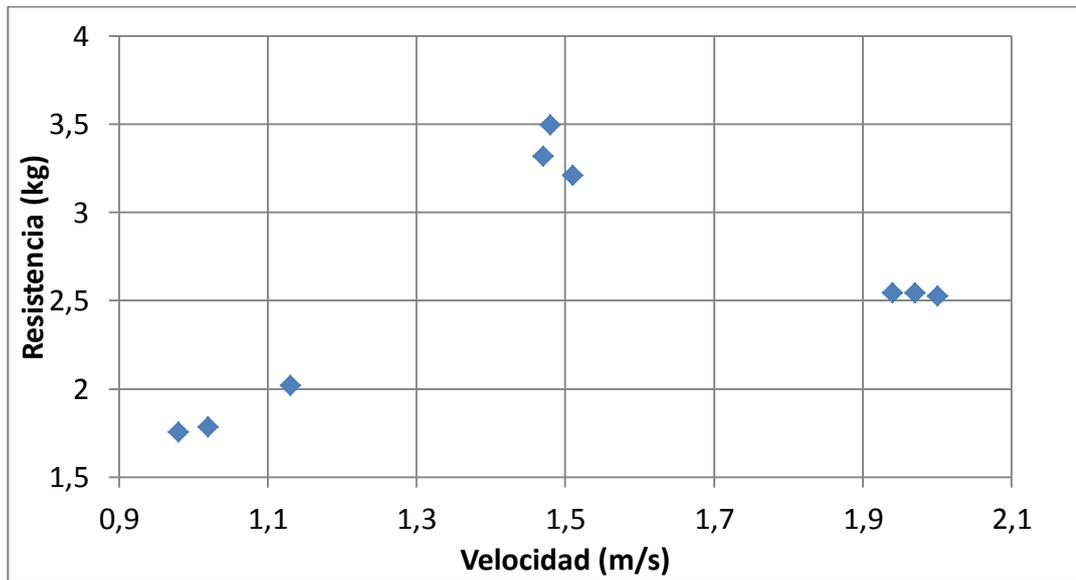


Figura 77: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C1F5A0

C1F5A0	Velocidad (m/s)	1,043	1,487	1,970
	Froude	0,292	0,417	0,552
	Resistencia (kg)	1,854	3,342	2,539

Tabla XXX: Resumen de resultados C1F5A0

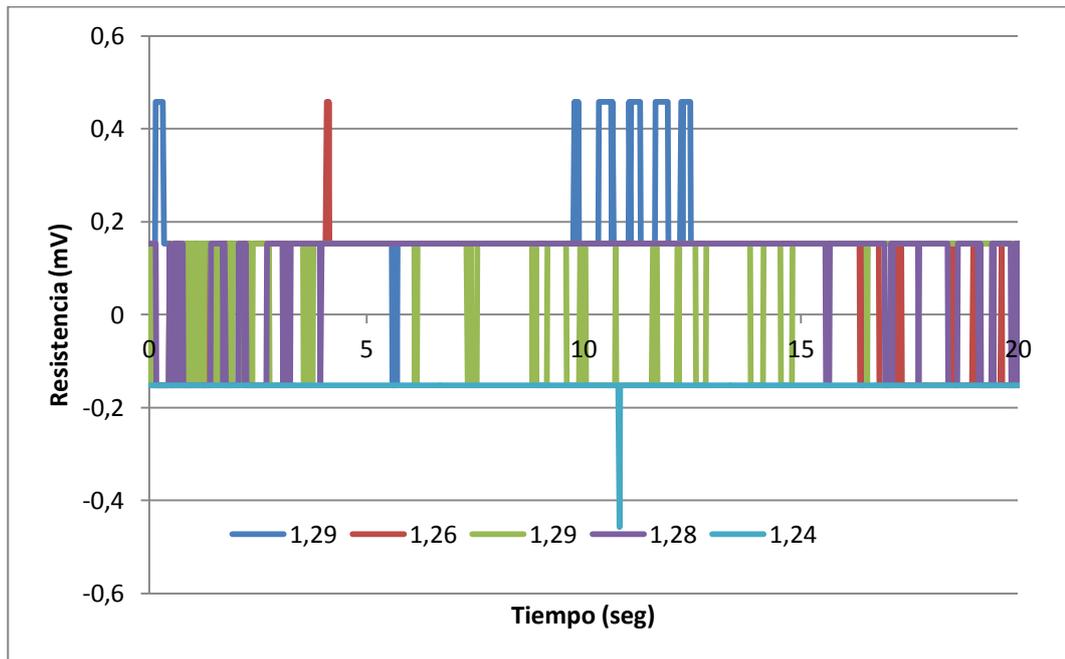


Figura 78: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 1

Lectura en mV					
promedio	0,171	0,087	0,068	0,108	0,095
varianza	0,006	0,016	0,019	0,012	0,000
max	0,458	0,458	0,153	0,153	-0,153
min	-0,153	-0,153	-0,153	-0,153	-0,458
Velocidad (m/s)	1,29	1,26	1,29	1,28	1,24

Tabla XXXI: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 1

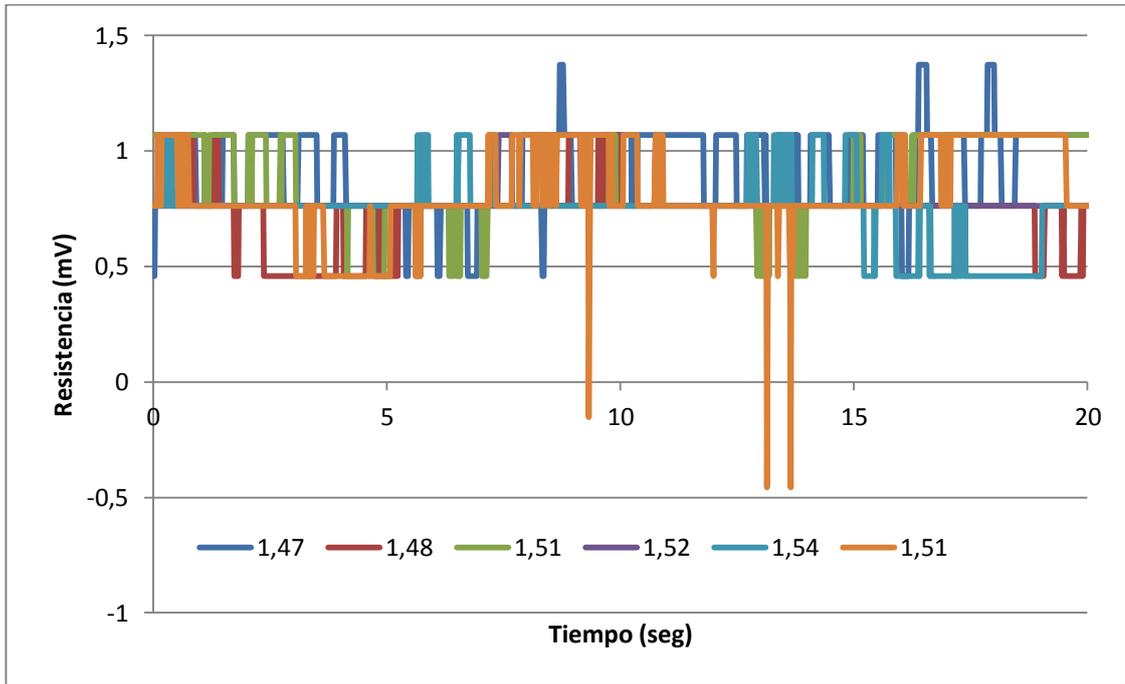


Figura 79: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 2

Lectura en mV						
promedio	0,910	0,742	0,853	0,768	0,742	0,824
varianza	0,032	0,023	0,027	0,002	0,021	0,036
max	1,373	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
min	0,458	0,458	0,458	0,763	0,458	-0,458
Velocidad (m/s)	1,47	1,48	1,51	1,52	1,54	1,51

Tabla XXXII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 2

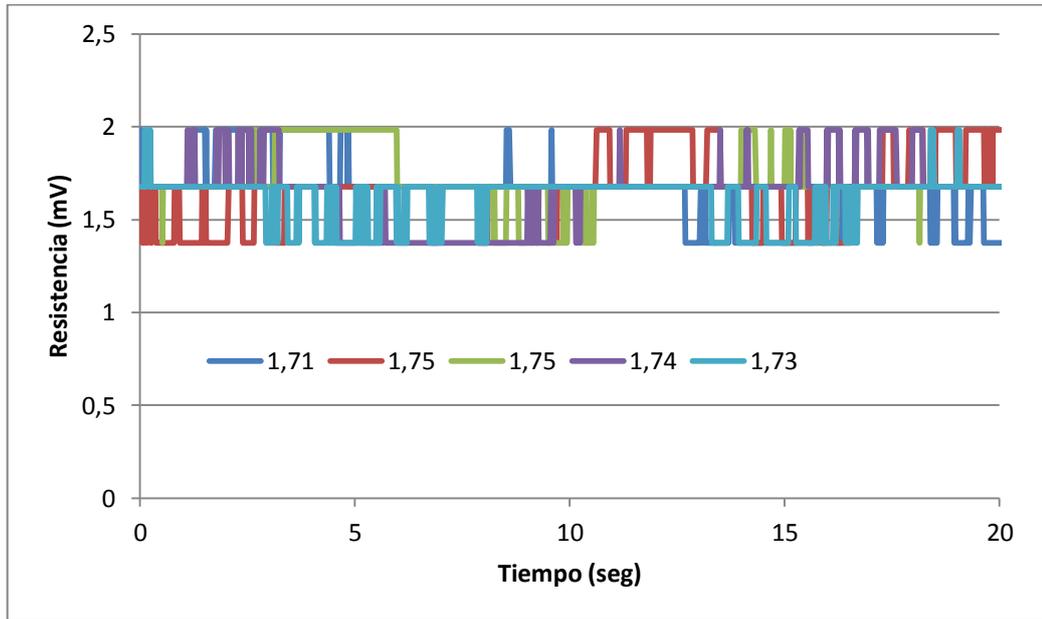


Figura 80: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 3

Lectura en mV					
promedio	1,659	1,682	1,709	1,640	1,614
varianza	0,034	0,035	0,021	0,033	0,018
max	1,984	1,984	1,984	1,984	1,984
min	1,373	1,373	1,373	1,373	1,373
Velocidad (m/s)	1,71	1,75	1,75	1,74	1,73

Tabla XXXIII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 3

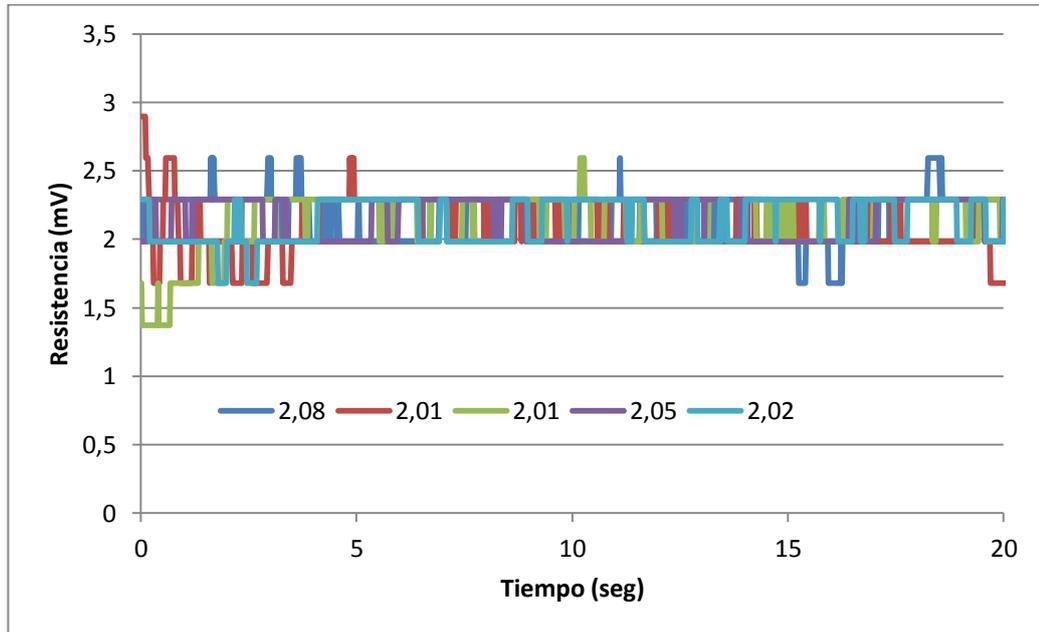


Figura 81: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 4

Lectura en mV					
promedio	2,184	2,098	2,124	2,143	2,134
varianza	0,031	0,043	0,051	0,023	0,027
max	2,594	2,899	2,594	2,289	2,289
min	1,678	1,678	1,373	1,984	1,678
Velocidad (m/s)	2,08	2,01	2,01	2,05	2,02

Tabla XXXIV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 4

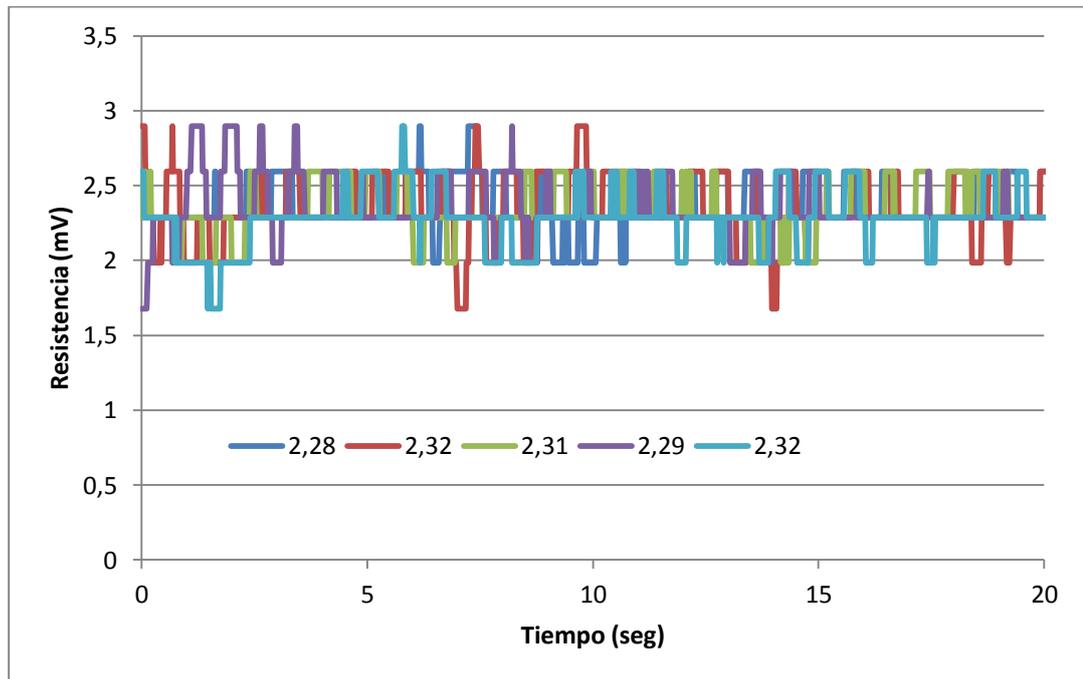


Figura 82: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 5

Lectura en mV					
promedio	2,362	2,352	2,330	2,342	2,278
varianza	0,028	0,048	0,027	0,035	0,035
max	2,899	2,899	2,594	2,899	2,899
min	1,984	1,678	1,984	1,678	1,678
Velocidad (m/s)	2,28	2,32	2,31	2,29	2,32

Tabla XXXV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 5

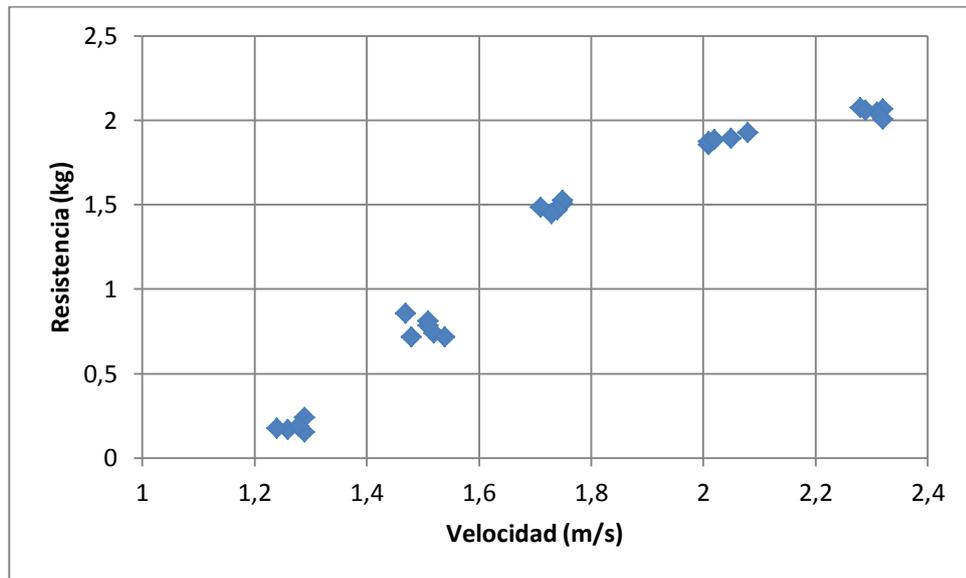


Figura 83: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C1WF

C1WF	Velocidad (m/s)	1,272	1,505	1,736	2,034	2,304
	Froude	0,356	0,422	0,486	0,570	0,646
	Resistencia (kg)	0,185	0,773	1,489	1,887	2,052

Tabla XXXVI: Resumen de resultados C1WF

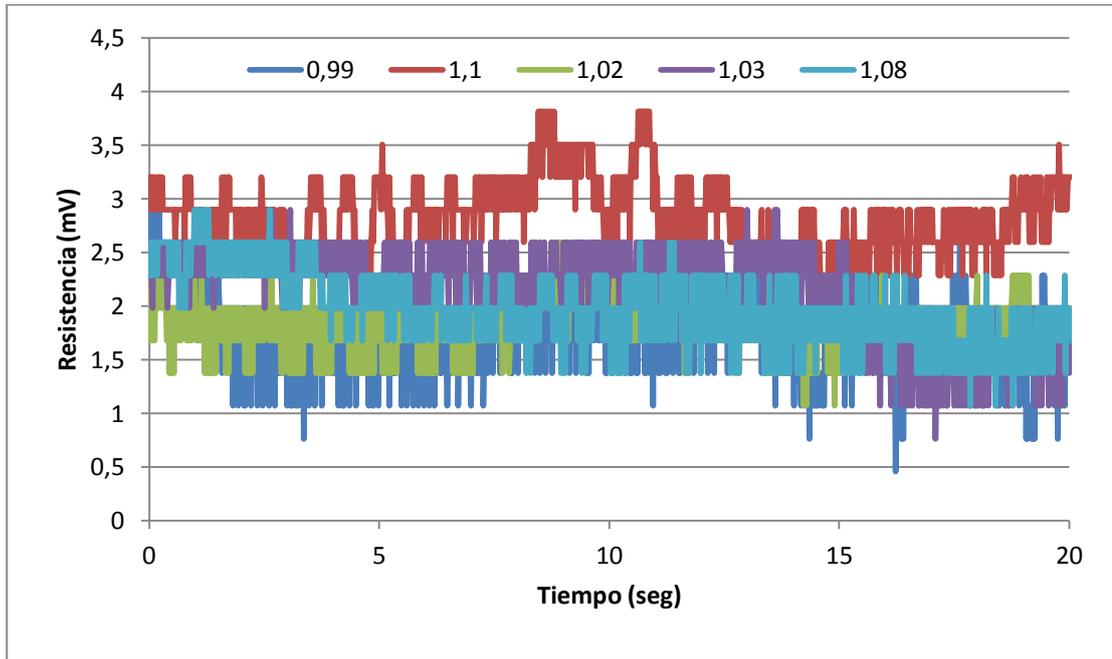


Figura 84: Resultados de Resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 1

Lectura en mV					
promedio	1,737	2,851	1,886	2,14312958	2,007
varianza	0,140	0,120	0,077	0,17628034	0,112
max	2,899	3,815	2,594	2,899214	2,899
min	0,458	1,984	1,068	0,7629511	1,068
Velocidad (m/s)	0,99	1,1	1,02	1,03	1,08

Tabla XXXVII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 1

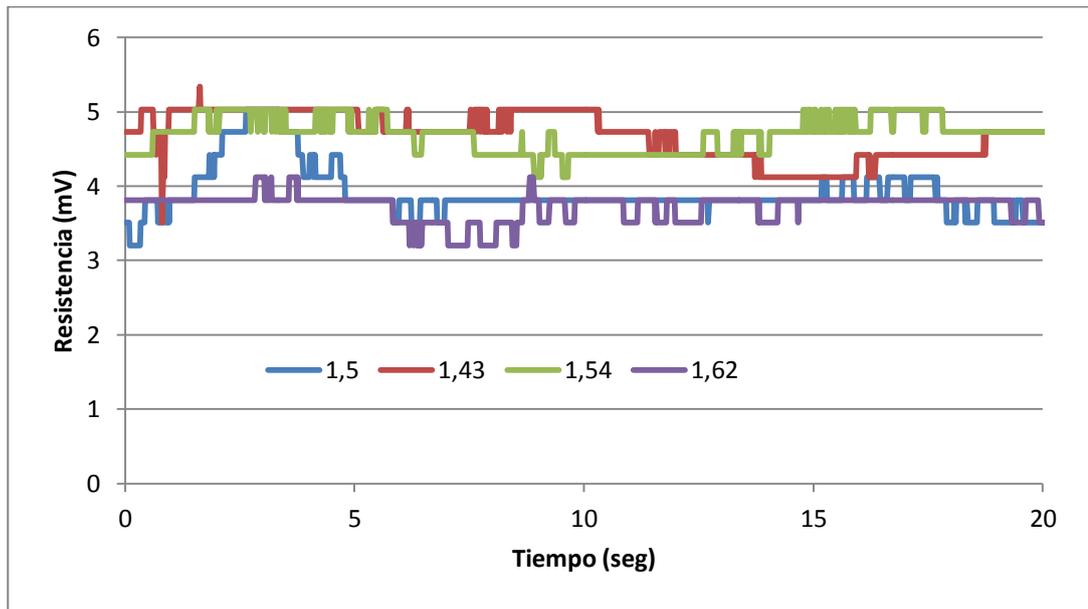


Figura 85: Resultados de Resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 2

Lectura en mV				
promedio	3,917	4,692	4,697	3,72752441
varianza	0,120	0,097	0,052	0,03316497
max	5,035	5,341	5,035	4,119936
min	3,204	3,510	4,120	3,204395
velocidad (m/s)	1,5	1,43	1,54	1,62

Tabla XXXVIII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 2

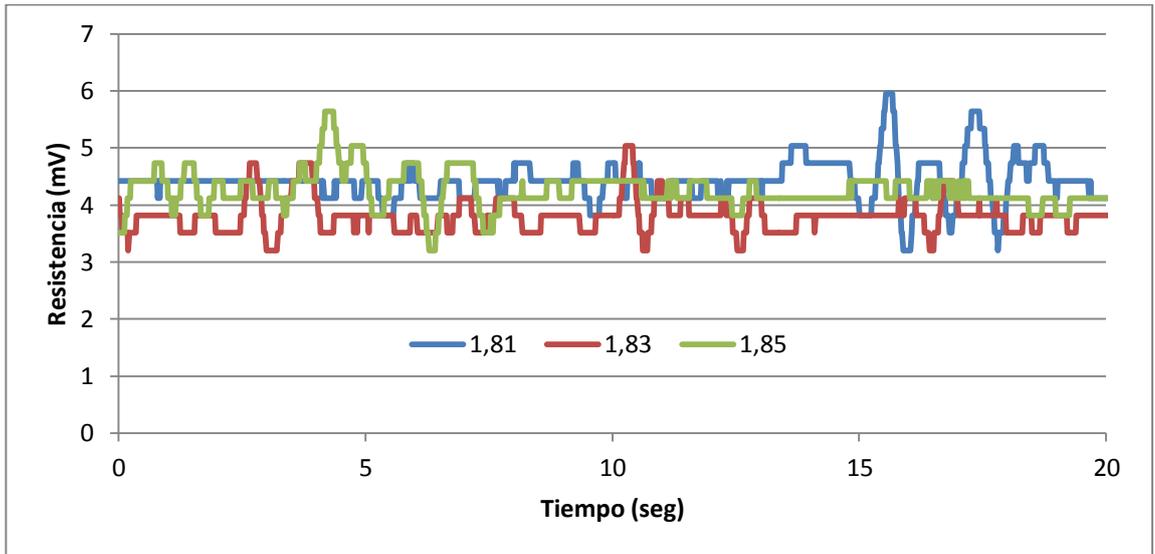


Figura 86: Resultados de Resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 3

Lectura en mV			
promedio	4,400	3,804	4,253
varianza	0,132	0,089	0,106
max	5,951	5,035	5,646
min	3,204	3,204	3,204
Velocidad (m/s)	1,81	1,83	1,85

Tabla XXXIX: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2F10A5, velocidad 3

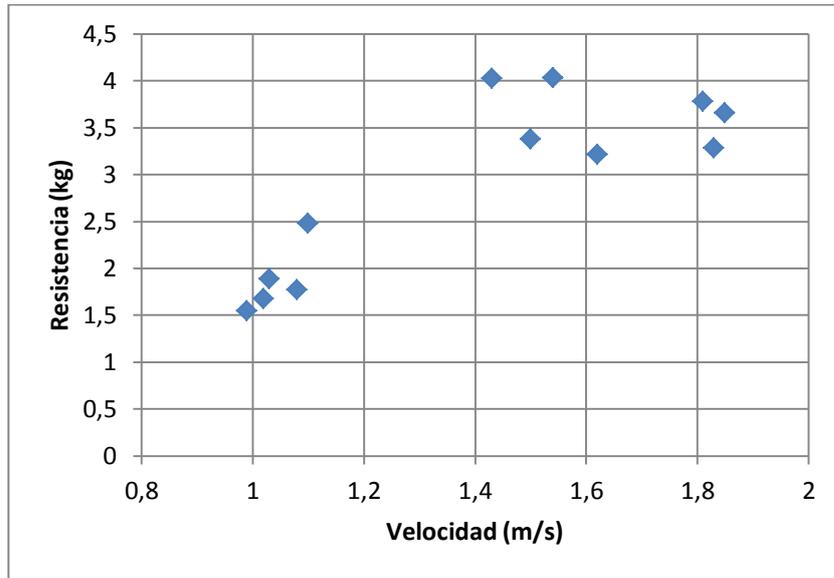


Figura 87: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C2F10A5

C2F10A5	Velocidad (m/s)	1,044	1,523	1,830
	Froude	0,292	0,427	0,513
	Resistencia (kg)	1,878	3,666	3,578

Tabla XL: Resumen de resultados C2F10A5

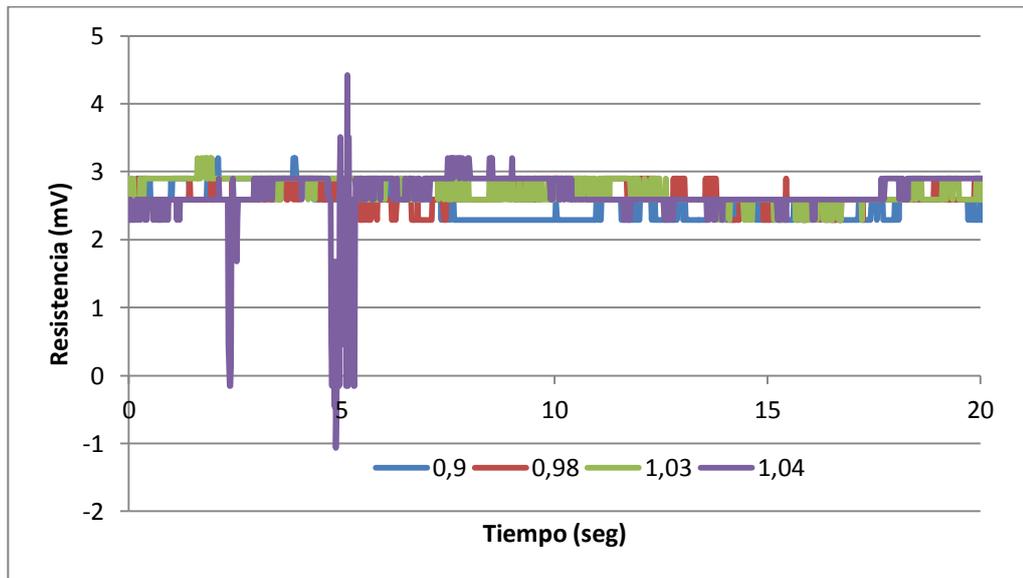


Figura 88: Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 1

Lectura en mV				
promedio	2,550	2,643	2,731	2,65761306
varianza	0,053	0,028	0,031	0,18222448
max	3,204	2,899	3,204	4,425117
min	2,289	2,289	2,289	-1,068132
Velocidad (m/s)	0,9	0,98	1,03	1,04

Tabla XLI: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 1

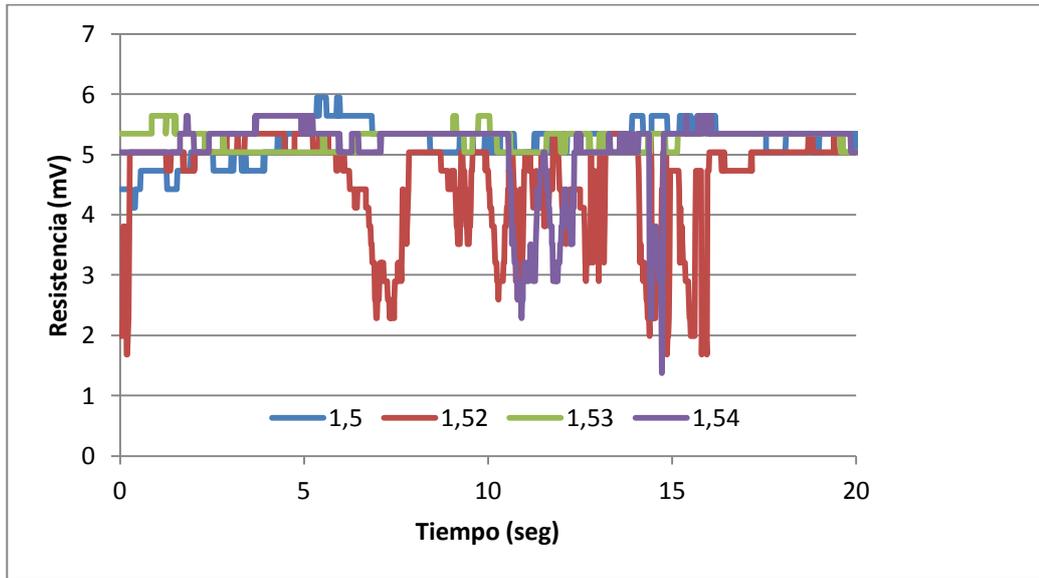


Figura 89: Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 2

Lectura en mV				
promedio	5,222	4,951	5,234	5,10058252
varianza	0,104	0,729	0,030	0,37917308
max	5,951	5,341	5,646	5,645838
min	4,120	1,678	5,035	1,373312
Velocidad (m/s)	1,5	1,52	1,53	1,54

Tabla XLII: Resumen de Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 2

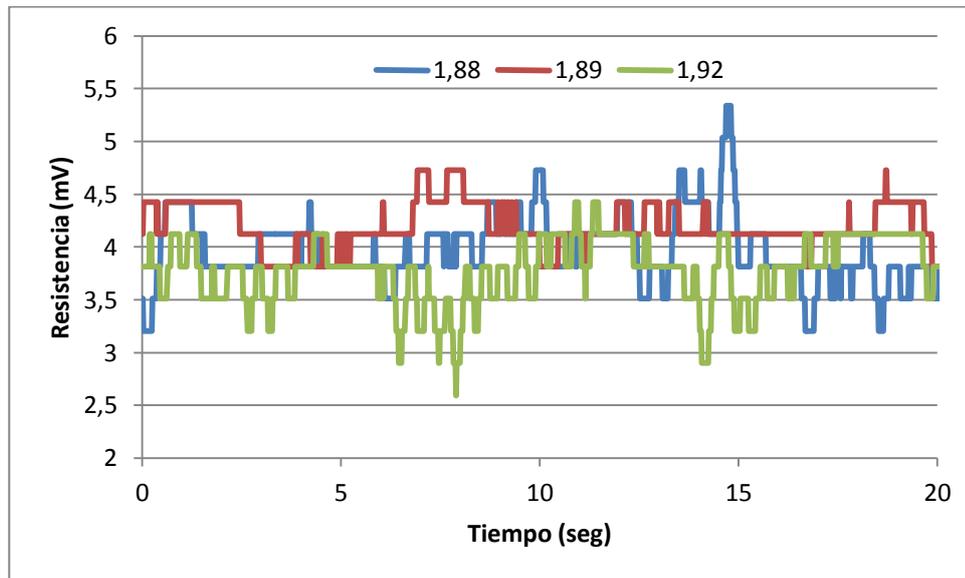


Figura 90: Resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 3

Lectura en mV			
promedio	3,974	4,193	3,775
varianza	0,111	0,047	0,096
max	5,341	4,730	4,425
min	3,204	3,815	2,594
Velocidad (m/s)	1,88	1,89	1,92

Tabla XLIII: Resumen de resultados de Resistencia al Avance C2F5A0, velocidad 3

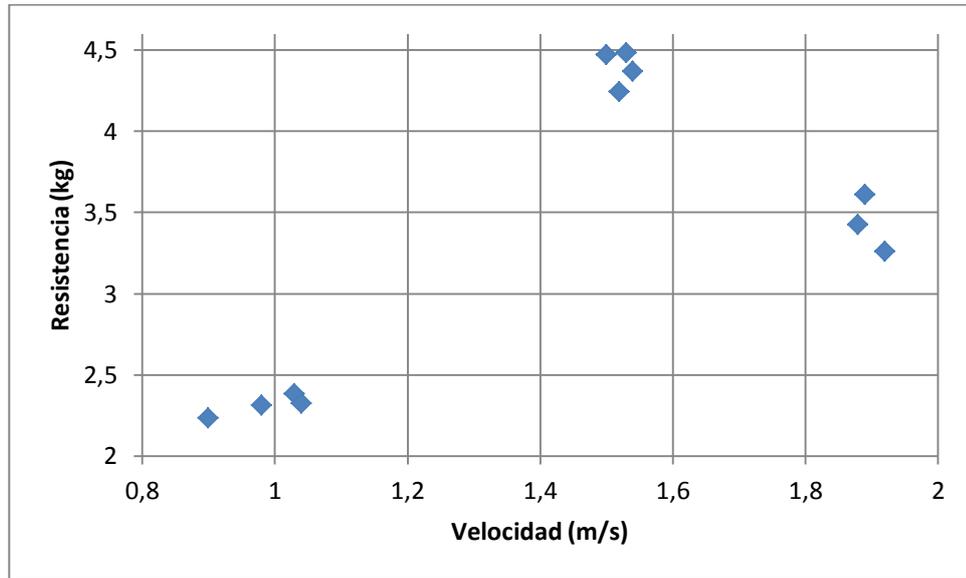


Figura 91: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C2F5A0

C2F5A0	Velocidad (m/s)	0,988	1,523	1,897
	Froude	0,277	0,427	0,531
	Resistencia (kg)	2,314	4,394	3,433

Tabla XLIV: Resumen de resultados C2F5A0

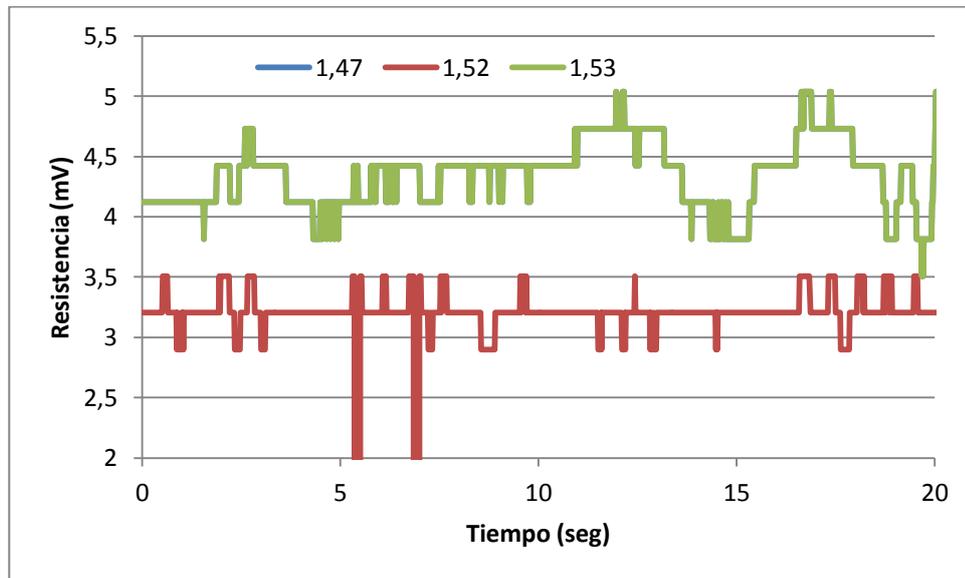


Figura 92: Resultados de Resistencia al Avance C2WF, velocidad 1

Lectura en mV			
promedio	3,202	3,209	4,342
varianza	0,032	0,016	0,078
max	3,510	3,510	5,035
min	2,594	2,899	3,510
Velocidad (m/s)	1,47	1,52	1,53

Tabla XLV: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C2WF, velocidad 1

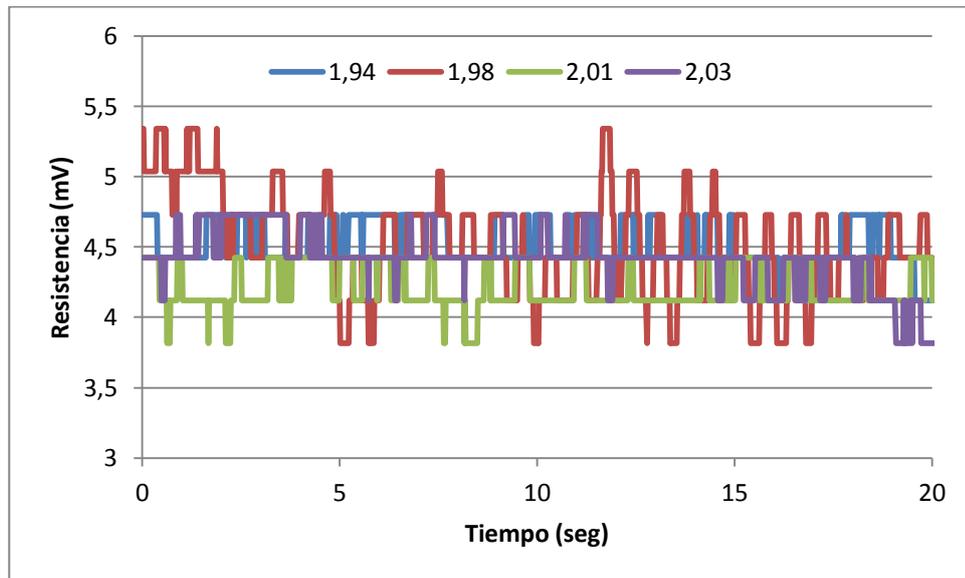


Figura 93: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 2

Lectura en mV				
promedio	4,548	4,424	4,211	4,422
varianza	0,022	0,105	0,025	0,041
max	4,730	5,341	4,425	4,730
min	4,425	3,815	3,815	3,815
Velocidad (m/s)	1,94	1,98	2,01	2,03

Tabla XLVI: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 2

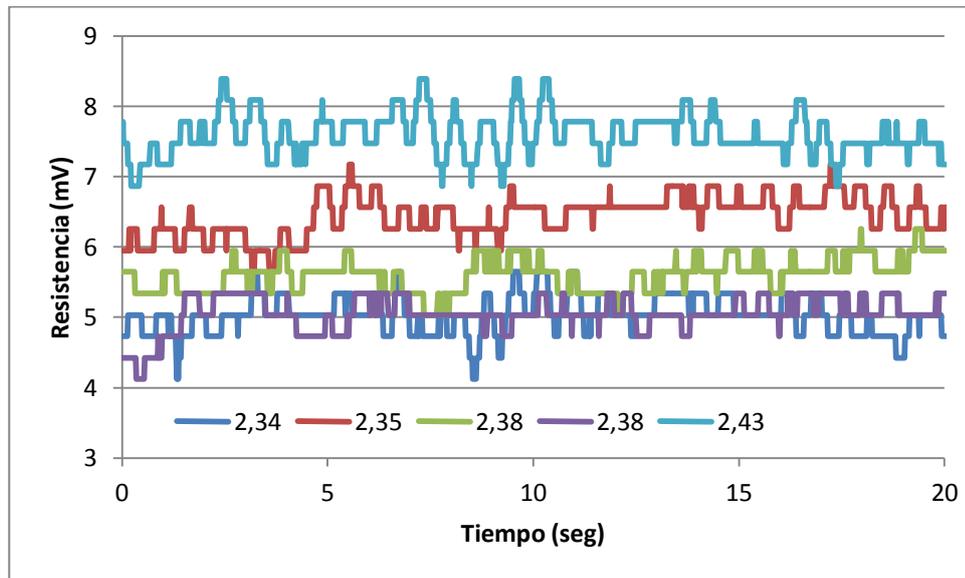


Figura 94: Resultados de Resistencia al Avance C1WF, velocidad 3

Lectura en mV					
promedio	5,196	6,529	5,600	5,053	7,598
varianza	0,052	0,047	0,058	0,060	0,094
max	5,646	7,172	6,256	5,341	8,392
min	4,730	5,951	5,035	4,120	6,867
Velocidad (m/s)	2,34	2,35	2,38	2,38	2,43

Tabla XLVII: Resumen de Resultados de resistencia al Avance C1WF, velocidad 3

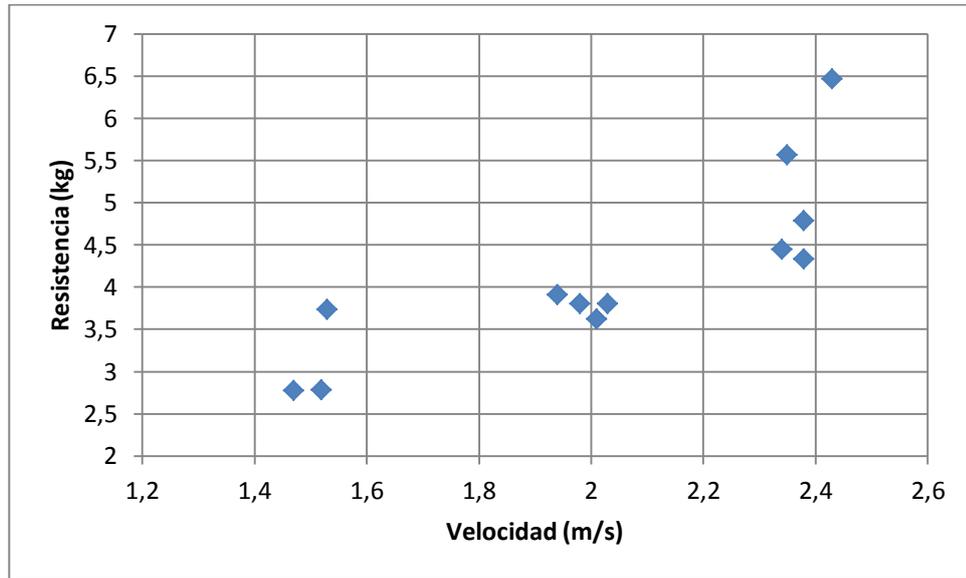


Figura 95: Resultados Finales de Resistencia al Avance para C2WF

C2WF	Velocidad (m/s)	1,507	1,990	2,376
	Froude	0,422	0,558	0,666
	Resistencia (kg)	3,101	3,786	5,122

Tabla XLVIII: Resumen de resultados C2WF

ANEXO C

PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE FOLIOS

Como se mencionó anteriormente el proceso de diseño de los folios es de fácil aplicación, después de elegir el tipo de perfil que se va a utilizar. A continuación se presenta un diagrama con el proceso del diseño que se va utilizar para el Sistema de Folios.

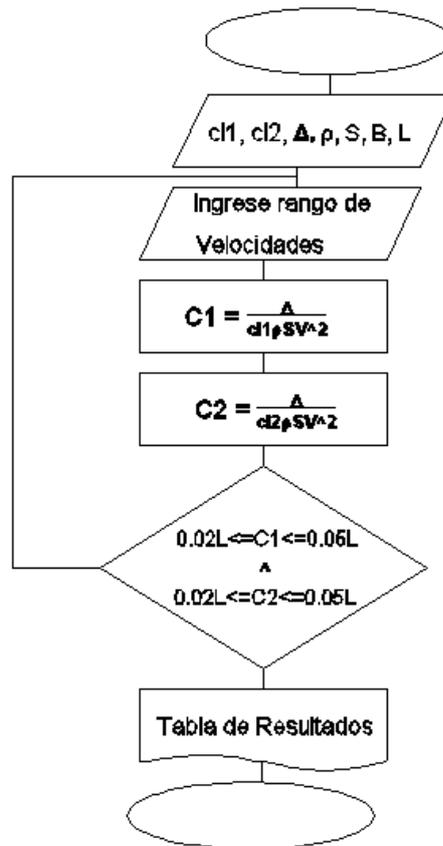


Figura 96: Proceso de Diseño del Sistema de Folios

Antes de empezar el proceso de Diseño se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Al momento de elegir el Coeficiente de Sustentación para cada folio, se debe tener en cuenta el ángulo de parada del folio. En base a esto se debe tomar un margen de seguridad y trabajar con un ángulo menor.
- Se debe tener en cuenta la ubicación del LCG de la embarcación, de preferencia se debería encontrar desplazado ligeramente hacia popa

de Sección Media. Esto ayuda a la embarcación en el momento de la Sustentación, facilitando el despegue fuera del agua.

- Además al momento de asignar la velocidad de operación, es recomendable considerar un margen de tolerancia al momento del dimensionamiento.
- Es recomendable que la longitud del Spam, se encuentre en un rango desde el ancho de la manga hasta 1.2 de ella. Se limita la longitud por motivo de proteger estos apéndices al momento de atracar la embarcación, para protegerlos de un posible impacto.
- Finalmente se debe recordar que con la velocidad estimada se debe calcular el arrastre generado, tomando los valores de coeficiente arrastre en base a los ángulos de ataque estimados anteriormente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Faltinsen, Odd M., Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles. Cambridge University Press, 2005
- [2] Lewis, Edward V., Principles of Naval Architecture, Second Revision Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration. SNAME, 1988
- [3] Abbot & Doenhoff, Theory of Wing Sections. Dover Publications, 1949
- [4] Du Cane, Peter, High Speed Small Craft. Temple Press, 1974
- [5] Gerr, Dave, The Elements of Boat Strength for Builders, Designers and Owners. Adlard Cole Nautical, 1999
- [6] Scott, Robert J., Fiberglass Boat Design and Construction, Second Edition. SNAME, 1996
- [7] Pytel, Andrew & Singer, Ferdinand L., Resistencia de Materiales. Cambridge University Press, 1994
- [8] Pigazzini, R., Mani, M., Mani, S. & Danzi, M., Summer Project 2009: Surfboard with T Foils. Swiss Experimental Hydrofoils, 2009
- [9] International Organization for Standardization, Hull construction-Scantlings-Part 5: Design Pressures for Monohulls, Design Stresses, Scantling Determination. Normas ISO, 2004
- [10] BUREAU VERITAS, Reglas y regulaciones para la clasificación de naves construidas en fibra de vidrio. BV, 1996
- [11] Marín, J.R, GFORMAS, Programa para Generación de Formas de Buques. 2001

- [12] US-NAVY, SHCP, Ship Hull Characteristics Program. 1965
- [13] Mark Drela, XFOIL 6.9, Programa para Análisis y diseño de Aero Folios Sub-Sónicos. 2001
- [14]
- http://www.daviddarling.info/childrens_encyclopedia/flight_Chapter2.html
- [15] SALAZAR, P., PORRAS, J. Y SANCHEZ, L., "Savitsky64" Program, Proyecto del Curso Programación Aplicada I, FIMCBOR-ESPOL, 2010
- [16] MUÑOZ N., Caracterización Numérico Experimental del Flujo Bidimensional alrededor de la Sección Transversal de una Tobera, Tesis de Grado, FIMCBOR-ESPOL, 2009
- [17] www.mercurymarine.com/engines/enginestests
- [18] COMSOL AB, COMSOL Multiphysics User's Guide, Version 3.4, 2007