

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Construcción y prueba de un modelo de sistema propulsor para
determinar las reacciones en los cojinetes empleando
extensómetros

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Kelly Alexandra Idrovo Arellano

Geovanny Alberto Galarza Benavides

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DEDICATORIA

Este proyecto se lo quiero dedicar principalmente a mi madre Kelly Arellano, quien ha sido el pilar fundamental de todos mis logros y quien me ha brindado su amor incondicional y el ejemplo de sacrificio y superación; a mi padre Segundo Idrovo (†), quien desde el cielo sigue guiando mis pasos; A mis hermanos Benjamín Idrovo y David Idrovo, que han sabido brindarme su apoyo incondicional.

A la Ab. Jacqueline Suárez quien ha sido un apoyo muy grande para mí, brindándome su ayuda y cariño incondicional.

Finalmente, a mis demás familiares y amigos, por haber formado parte de este logro.

Kelly Idrovo Arellano

DEDICATORIA

A la memoria de mi madre, Beatriz Benavides (†).

A mi amado padre, Ramiro Galarza, a mis hermanos, Carol y César Galarza por su apoyo incondicional. A la familia Cabrera Izurieta, por su solidaridad. A mis queridos amigos (Los Rex's) y demás familiares. Gracias por haber formado parte del proceso.

Geovanny Galarza Benavides

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarnos paciencia y perseverancia para poder culminar esta importante meta. A nuestros padres, amigos y demás familiares, por su comprensión y apoyo durante este trayecto.

A nuestro tutor José R. Marín López por la formación brindada académicamente y el apoyo en el desarrollo de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Kelly A. Idrovo y Geovanny A. Galarza* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Kelly Alexandra Idrovo Arellano



Geovanny Alberto Galarza Benavides

EVALUADORES

.....
MSc. David A. Plaza M.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
PhD. José R. Marín L.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Una incorrecta alineación de un sistema propulsor marino puede generar una sobrecarga sobre los cojinetes o soportes. Por este motivo, es recomendable verificar la distribución de las reacciones que se generan en los soportes, que no pueden ser determinadas analíticamente porque no se conocen sus posiciones verticales. Debido a esto, surge la necesidad de implementar una metodología que permita determinar experimentalmente las reacciones en los descansos de un sistema propulsor.

En el presente trabajo se determinaron las reacciones en los soportes del modelo de un sistema propulsivo aplicando el método de los extensómetros. El modelo que se construyó en base al B/T "Isla Puná" de la empresa TRANSNAVE tiene un eje de acero de 2.7 m de longitud y 1.9 cm de diámetro, discos de acero para representar los componentes del sistema (volante del motor, brida de acople y hélice) y soportes móviles que permitieron realizar desplazamientos verticales y laterales. El problema se analizó estáticamente y se empleó teoría de vigas para efectos de confirmación de resultados.

Se registraron deformaciones unitarias en tres puntos a lo largo del eje. Con estos valores se obtuvieron experimentalmente los momentos flectores y finalmente las reacciones en los soportes del modelo. Además, siguiendo este procedimiento, se calcularon las reacciones considerando levantamientos verticales y desplazamientos transversales de dos soportes del sistema para verificar la influencia de su posicionamiento. Por último, se calcularon los coeficientes de influencia con la variación de las reacciones por unidad de elevación de los soportes. Comparando estos parámetros con los obtenidos teóricamente, muestran una diferencia menor al 3% que confirma la precisión del método.

Con la experiencia adquirida, se puede implementar esta metodología a futuro para calcular reacciones en embarcaciones reales.

Palabras Clave: Alineamiento, coeficientes de influencia, deformación unitaria, reacciones.

ABSTRACT

An incorrect alignment of a marine propulsion system can generate an overload on its components. For this reason, it is advisable to verify the distribution of the reactions that are generated in the supports. Due to this, the need arises to implement a methodology that allows to determine experimentally the reactions in the breaks of a propulsion system.

In the present work, the reactions in the supports of a model propulsive system were determined by applying the strain gauge method. The model was built based on the B/T "Isla Puná". It was formed by a steel shaft of 2.7 m in length and diameter of 1.9 cm, steel discs to represent the components of the system (engine flywheel, coupling flange and propeller) and mobile supports that allowed vertical and lateral displacements. The problem was statically analyzed, and beam theory was employed.

Strain was recorded at three points along the axis. With these values were obtained experimentally reactions in the supports of the model. In addition, following this procedure, the reactions were calculated considering vertical lifts and transverse displacements of two supports of the system to verify the influence of their positioning.

Finally, the coefficients of influence were calculated with the variation of the reactions per unit elevation of one of the supports. As a result, the experimental part was compared with what was obtained numerically, both results differ by less than 3%. With the experience gained, this methodology can be implemented in the future to calculate reactions in real vessels.

Keywords: Alignment, influence coefficients, strain, reaction forces.

ÍNDICE GENERAL

_Toc127381606RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURA.....	VII
Índice de tablas	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Características del buque referencial.....	3
1.4.2 Sistema propulsivo del buque referencial BT “Isla Puná”	1
1.4.3 Teoría de vigas	1
1.4.4 Condiciones de frontera.....	5
1.4.5 Método de los extensómetros para determinar reacciones	6
1.4.6 Coeficientes de influencia	9
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología	12
2.1 Construcción del equipo	13
2.1.1 Descripción del banco de pruebas.....	13
2.1.2 Detalle de los elementos del sistema propulsivo	14

2.2	Equipo de adquisición de datos.....	16
2.2.1	Medición de deformaciones unitarias.....	16
2.2.2	Medición de desplazamientos.....	18
2.3	Descripción de la experimentación.....	19
2.3.1	Método para obtener reacciones	19
CAPÍTULO 3.....		20
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	20
3.1	Consistencia de resultados	20
3.2	Resultados experimentales	21
3.2.1	Deformaciones Unitarias del eje	22
3.2.2	Momento flector y fuerzas de reacción	22
3.3	Coefficientes de influencia.....	25
3.4	Comparación con otros métodos.....	27
CAPÍTULO 4.....		30
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
4.1	Conclusiones.....	30
4.2	Recomendaciones.....	31
5.	Bibliografía.....	32
APÉNDICE		33

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
Lab.	Laboratorio
PrOce	Procesos Oceanográficos
FIMCM	Facultad de ingeniería marítima y ciencias del mar
TRANNAVE	Transportes Navales del Ecuador
CPNV	Capitán de navío
CPFG	Capitán de fragata
B/T	Buque Tanquero

SIMBOLOGÍA

Al	Aluminio
Ni	Níquel
m	Metro
mm	milímetro
i	i-ésimo elemento
j	j-ésimo elemento
Mov	Movimiento
ε	Deformación unitaria

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1.1 Plano de distribución general (TRANSNAVE, 2022)	1
Figura 1.2 Esquema del sistema propulsor BT “Isla Puná” (TRANSNAVE, 2022)	1
Figura 1.3 Viga y elementos de viga entre secciones adyacentes (Fuente propia).....	2
Figura 1.4 Deformación de una viga en flexión (Popov, 1999)	3
Figura 1.5 Empotramiento del extremo (Fuente propia)	6
Figura 1.6 Extremo libre (Fuente propia).....	6
Figura 1.7 Esquema de la línea de eje mostrando extensómetros (A, B & C) y el diagrama de cuerpo libre CCGS Earl Grey (Bruce Cowper, Al DaCosta, Stephen Bobyn, 1999)...	7
Figura 1.8 Esquema del sistema propulsivo del BT “Isla Puná”	11
Figura 2.1 Esquema de la metodología utilizada	12
Figura 2.2 Modelamiento 3D del sistema propulsor marino modelo.....	13
Figura 2.3 Eje de acero inoxidable	14
Figura 2.4 Mecanismo de movimiento vertical y transversal (soporte).....	15
Figura 2.5 Discos de acero inoxidable usados para representar las cargas externas...	15
Figura 2.6 Modelo construido de sistema propulsor marino	16
Figura 2.7 Partes de un extensómetro	17
Figura 2.8 Posición longitudinal de los extensómetros a lo largo del eje.....	17
Figura 2.9 Esquema de conexiones del equipo de adquisición de datos Instrunet	18
Figura 2.10 Indicador de caratula “MYTUTOYO”2.10	18
Figura 3.1 Micro deformación vs Tiempo – Extensómetro 1 (Fuente propia).....	21
Figura 3.2 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 2 – Alineación N°2	24
Figura 3.3 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 3– Alineación N°5	25
Figura 3.4 Influencia del desplazamiento transversal – Soporte 2	26
Figura 3.5 Influencia del desplazamiento transversal – Soporte 3	27
Figura 3.6 Modelo geométrico – Ansys Workbench R17.2.....	28
Figura 3.7 Variación de momento flector por efecto del levantamiento del soporte 3 – teoría de vigas	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características principales BT “Isla Puná”	3
Tabla 1.2 Características principales – Sistema Propulsivo B/T “Isla Puná”	1
Tabla 2.1 Dimensiones y pesos - B/T “Isla Puná” – Modelo	14
Tabla 2.2 Dimensiones de discos para simular carga externa	16
Tabla 2.3 Dimensiones de discos para simular carga externa	17
Tabla 2.4 Posición de los elementos del sistema propulsivo modelo	17
Tabla 2.5 Desplazamientos verticales y transversales - soporte N°2 y soporte N°3	19
Tabla 3.1 Valores registrados del cambio de micro deformación con desplazamiento vertical del soporte N°3	22
Tabla 3.2 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 5	22
Tabla 3.3 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 6	22
Tabla 3.4 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 7	23
Tabla 3.5 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 2	23
Tabla 3.6 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 3	23
Tabla 3.7 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 4	23
Tabla 3.8 Comparación de coeficientes de influencia – Soporte 2	25
Tabla 3.9 Comparación de coeficientes de influencia – Soporte 3	26
Tabla 3.10 Comparación de los coeficientes de influencia – Soporte 2	28
Tabla 3.11 Comparación de los coeficientes de influencia – Soporte 3	28

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La empresa naviera estatal TRANSNAVE, es la única autorizada para transportar combustible a las islas Galápagos. Este servicio se lleva a cabo con el buque tanquero “Isla Puná”, el cual se incorporó a la empresa en el año 2008. La embarcación tiene una eslora de 87.91 metros y una capacidad de carga de aproximadamente cien mil galones. Esta embarcación cubre la ruta Libertad (Santa Elena) – Punta Arenas (Guayas) – Baltra (Archipiélago de las Galápagos) y realiza un flete mensual (CPNV-EMS Fernando Villacís Malo, Gerente General TRANSNAVE, 07 de noviembre de 2021). Esta información refleja la importante labor que desempeña este buque para poder brindar los servicios de transporte comercial de hidrocarburos en Ecuador.

1.1 Descripción del problema

En los últimos seis años el buque tanquero “Isla Puná”, perteneciente a la empresa TRANSNAVE, ha presentado problemas en su sistema propulsivo. Según reporta su capitán “en el año 2015 el buque encalló, por lo tanto, es posible que parte de la estructura de la popa del casco se haya deformado. Además, en el año 2020 parte del eje de cola se partió y se cayó en el mar. Luego de estos problemas la embarcación se encuentra fuera de servicio en espera del nuevo eje propulsor” (CPFG. Cristóbal Ortiz, entrevista al Ingeniero a cargo del BT Isla Puná, 7 de noviembre de 2022). Por lo tanto, luego de la instalación del nuevo eje será necesario medir las reacciones en los cojinetes para evitar futuros daños en el sistema propulsor.

En la actualidad, la industria naval local no tiene experiencia en la aplicación del método de los extensómetros para medir reacciones en los cojinetes de un sistema propulsor. Esta metodología se ha empleado con éxito en diferentes astilleros norteamericanos a partir del año 1978 [7]. El procedimiento de los extensómetros tiene una serie de ventajas que lo convierten en una alternativa atractiva con respecto a los demás procedimientos de medición más utilizados. Se puede tomar

un conjunto completo de lecturas de deformación unitaria en menos de una hora, además la facilidad de la toma de lecturas (es decir, sin una estructura de soporte como con la técnica del gato hidráulico) permite realizar mediciones en el mar en condiciones de lastre y de carga completa [2]. Por lo tanto, ganar experiencia en la aplicación de este procedimiento permitirá a futuro, medir las reacciones en los cojinetes con eficiencia y precisión en nuestro medio.

1.2 Justificación del problema

Cuando la popa del buque encalla, existe la posibilidad de que la estructura del casco se deforme parcialmente, provocando cambios en la posición de los elementos del sistema propulsivo. Esta variación de posición influye directamente sobre la alineación del eje propulsor y por ende sobre las fuerzas de reacción desarrolladas por los cojinetes. Por lo tanto, luego de este tipo de percance, las sociedades de clasificación comúnmente requieren verificar que las reacciones en los cojinetes sean adecuadas para evitar futuros daños significativos en el sistema propulsor del buque.

Daños en los elementos del sistema propulsivo pueden afectar prolongadamente la operatividad de una embarcación. Por lo general, elementos como el eje propulsor o hélices de mediano o gran tamaño, no se encuentran en stock en mercado y requieren ser fabricados bajo pedido del armador. Esto se traduce en pérdidas para la empresa dueña de la embarcación, pues los tiempos de adquisición y los costos de importación, reparación e instalación son considerables. Por esta razón se propone el siguiente trabajo, el cual se enfoca en la medición de las reacciones sobre los cojinetes en un sistema propulsor a escala empleando extensómetros para comprobar su alineamiento.

Al finalizar este trabajo, se habrá familiarizado con el procedimiento, y comprobado la eficacia y validez de la aplicación del método de los extensómetros para medir las fuerzas de reacción sobre los cojinetes. Dado que el soporte del modelo del sistema propulsor que se desea construir permitirá analizar distintas configuraciones del eje, se podrá verificar la influencia de la posición vertical y transversal de los cojinetes sobre las fuerzas de reacción que soportan. Por lo tanto,

se obtendrá la experiencia y el conocimiento necesario para una futura aplicación del método de los extensómetros a un sistema propulsivo real de una embarcación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar experimentalmente las fuerzas de reacción en los cojinetes del modelo de un sistema propulsivo, empleando extensómetros y teoría de vigas para la futura aplicación local en la verificación del alineamiento de sistemas de propulsión marina.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un banco de pruebas para determinar las reacciones en los soportes de un modelo de sistema propulsor, tomando como referencia la configuración del sistema propulsivo del BT “Isla Puná”.
- Determinar las reacciones en los cojinetes del modelo empleando las mediciones de deformación unitaria, las ecuaciones de equilibrio estático de vigas y resultados con elementos finitos.
- Analizar la variación de las fuerzas de reacción considerando diferentes configuraciones de posición vertical y lateral de los cojinetes.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Características del buque referencial

La embarcación referencial para el desarrollo de este proyecto es el BT “Isla Puná” de la empresa TRANSSNAVE. El material de construcción del buque es acero y se construyó el 15 de octubre del 2005 en el astillero Hae Yang Metal en Corea. Las características principales del buque se muestran en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.1, se adjunta el plano de distribución general.

Tabla 1.1 Características principales BT “Isla Puná”

Fuente: Propia

Eslora [m]	87.81
Manga [m]	14.00
Puntal [m]	7.30
Capacidad de carga [gal]	1'003.968
Velocidad Máxima [knots]	12.7

Además, la Figura 1.1 muestra el plano de distribución general de B/T “Isla Puná”.

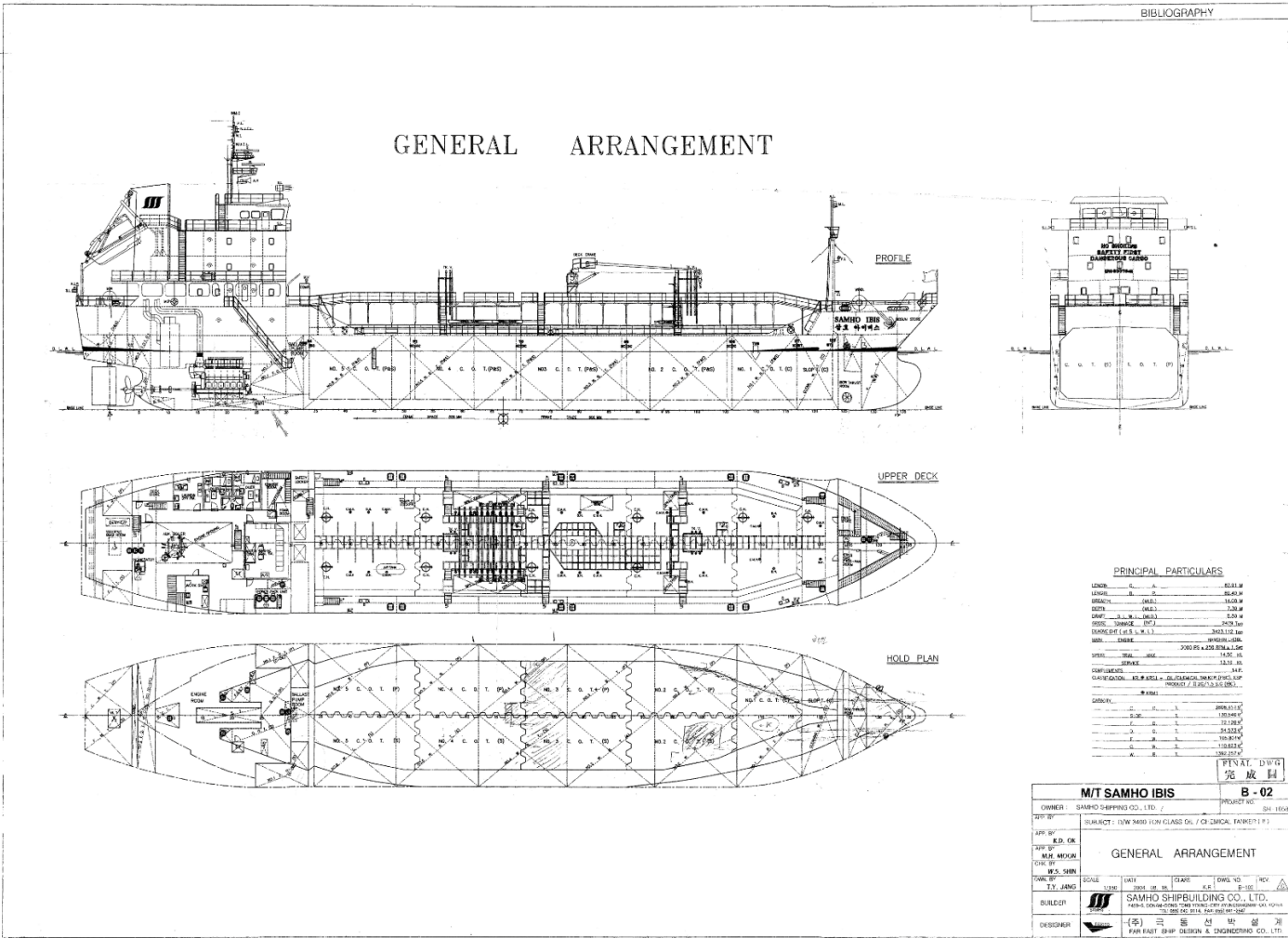


Figura 1.1 Plano de distribución general (TRANSSAVE, 2022)

1.4.2 Sistema propulsivo del buque referencial BT “Isla Puná”

El sistema propulsivo del BT “Isla Puná” es de tipo monohélice y el propulsor se conecta directamente al motor. El eje se divide en tres secciones: cola, intermedio y del motor. El eje de cola se soporta en los bocines de codaste y de prensaestopa. El eje intermedio se une al eje de cola mediante una brida de acople y cuenta con un cojinete de descanso intermedio. Por último, en la sección del motor se encuentra el volante, el cojinete de empuje y la bancada del motor. A continuación, en la Figura 1.2, se muestra el esquema del sistema propulsor del BT “Isla Puná”.

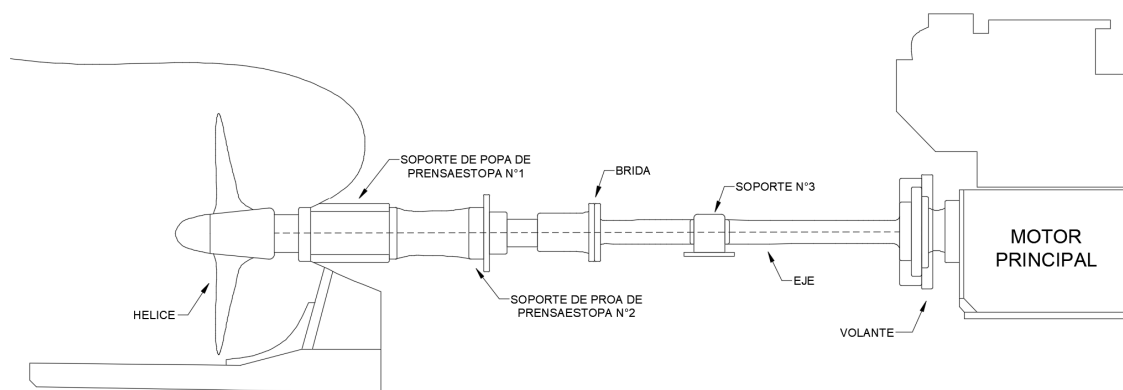


Figura 1.2 Esquema del sistema propulsor BT “Isla Puná” (TRANNAVE, 2022)

En la Tabla 1.2, se resumen las características más importantes de los componentes del sistema propulsivo del B/T “Isla Puná”

Tabla 1.2 Características principales – Sistema Propulsivo B/T “Isla Puná”

Fuente: Propia

Ítem	Descripción/Material	Peso [kg]
Motor	HANSHIN 6L38, 6 cilindros, 3000 BHP, 250 RPM	-
Eje	Longitud 7.5 m, diámetros 27 cm, acero Inoxidable	343.4
Brida de acople	Acero inoxidable	208.7
Hélice	4 aspas, paso fijo de 1.8 [m], 3 [m] diámetro / Ni-Al-Bronce	2137.9

1.4.3 Teoría de vigas

Equilibrio estático

Una viga es un elemento estructural muy largo capaz de soportar carga lateral. Para analizar el equilibrio de un elemento diferencial de viga de longitud Δx , se debe incluir las fuerzas internas en las secciones donde se realizaron los cortes, es decir, fuerza

cortante $V(x)$ y momento flector $M(x)$ y también las fuerzas externas $q(x)$ (peso de los elementos y reacciones de los soportes). La convención de signos empleada en este trabajo para la deducción de las relaciones se muestra en la Figura 1.3.

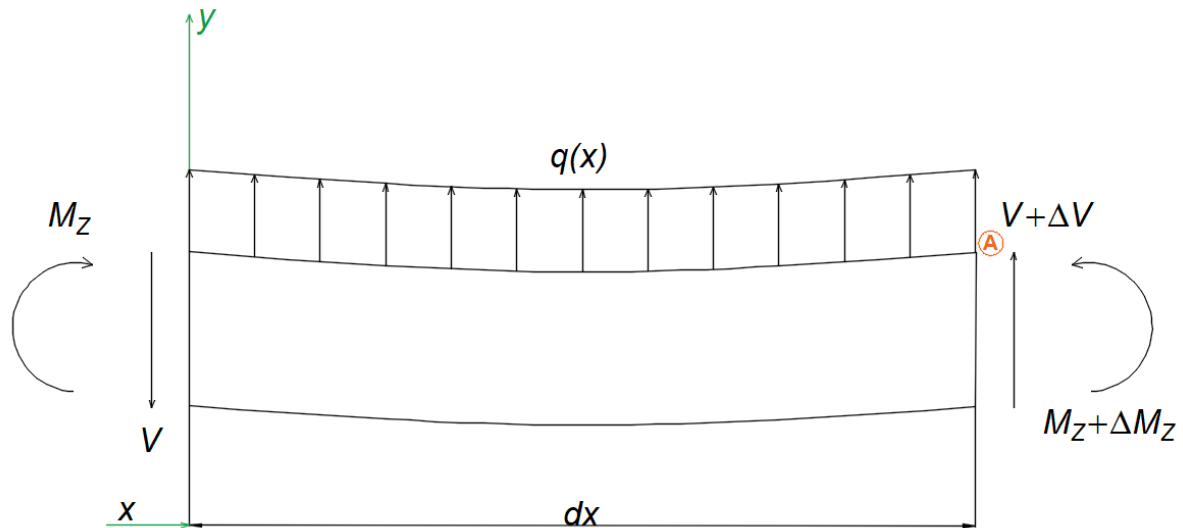


Figura 1.3 Viga y elementos de viga entre secciones adyacentes (Fuente propia)

La fuerza cortante y el momento flector cambian de una sección a la siguiente en función de la carga externa, $q(x)$. Note que, en la Figura 1.2 sobre el lado derecho del elemento diferencial, esas cantidades son designadas respectivamente como $V + \Delta V$ y $M_z + \Delta M_z$. Además, el sentido positivo de la fuerza externa por unidad de longitud $q(x)$, se hace coincidir con el sentido del eje y positivo. De la condición de equilibrio de fuerzas verticales y momentos con respecto al eje que pasa por el punto A del elemento diferencial cuando Δx tiende a cero, se obtiene que:

$$\sum F_y = 0 \uparrow^+ \rightarrow \frac{dV}{dx} = -q(x) \quad (1)$$

$$\sum M_A = 0 \curvearrowright^+ \rightarrow \frac{dM}{dx} = -V(x) \quad (2)$$

Combinando (1) y (2) se obtiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria para el equilibrio de un elemento diferencial de viga:

$$\frac{d^2 M_z}{dx^2} = q(x) \quad (3)$$

Esta ecuación permite calcular la fuerza cortante $V(x)$ y el momento flector $M_z(x)$ a lo largo del eje para casos estáticamente determinados.

Hipótesis Cinemática

La hipótesis cinemática (Figura 1.4) establece que, durante la flexión las secciones planas en la viga rotan, pero permanecen planas. Esta asunción también se puede expresar como una relación entre la curvatura de la curva de deflexión elástica, k , y la deformación unitaria ε mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\rho} = k = -\frac{\varepsilon}{y} \quad (4)$$

Donde “y” es la distancia desde el eje neutro de la sección hacia el punto más alejado.

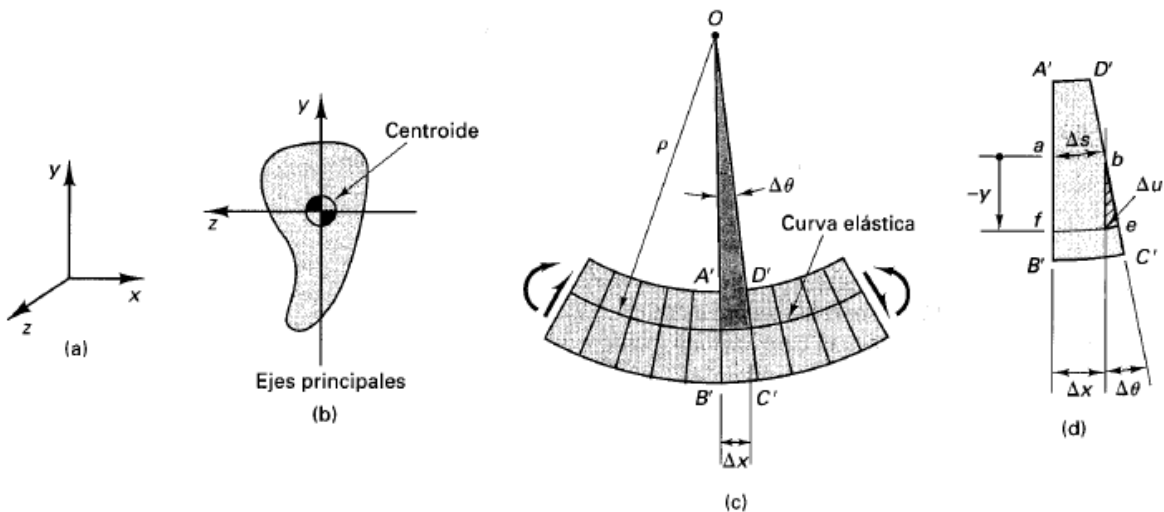


Figura 1.4 Deformación de una viga en flexión (Popov, 1999)

Note que ninguna propiedad del material interviene en la ecuación (4), por lo tanto, esta relación puede usarse tanto en problemas elásticos como inelásticos. Considerando que la curvatura de la elástica de la viga puede aproximarse como su segunda derivada ($k = v_{,xx}$), se establece la siguiente aproximación para la

deformación unitaria, $\varepsilon_x \approx -v_{,xx} y^1$. Incluyendo la ley de Hooke en la expresión anterior se obtiene la siguiente ecuación para el esfuerzo normal en una sección de la viga:

$$\sigma_x = -E v_{,xx} y \quad (5)$$

Donde y es la distancia vertical medida desde el eje neutro de la sección de viga, $v(x)$ es la función deflexión de la viga y E corresponde al módulo de elasticidad del material.

Distribución de esfuerzos normales en flexión

Los esfuerzos normales en una sección de la viga, producidos por un momento flector se conocen como esfuerzos por flexión. Al integrar el primer momento de la distribución de esfuerzos normales en una sección de viga, se debe recuperar el valor del momento flector que actúa sobre dicha sección y se obtiene la siguiente expresión:

$$M_z(x) = E I_C v_{,xx} \quad (6)$$

Donde $I_C = \iint y^2 dA$, representa el segundo momento de inercia de la sección. Reemplazando (6) en (5) se obtiene la siguiente ecuación que permite evaluar el esfuerzo normal en cualquier sección de la viga:

$$\sigma_x(x) = -\frac{M_z(x)y}{I_C} \quad (7)$$

Por último, combinando la ecuación del momento flector (6) y esfuerzo normal (7) resulta la siguiente ecuación diferencial de equilibrio para una viga con sección transversal constante:

$$E I_C \frac{d^4 v}{dx^4} = q(x) \quad (8)$$

La ecuación (8) es una ecuación diferencial ordinaria, lineal, de cuarto orden, de coeficientes constantes, no homogénea y su solución permite analizar problemas estática e inestáticamente equilibrados. Dado que es lineal, permite aplicar el principio

¹ Los subíndices xx denotan la segunda derivada respecto de x .

de superposición y dado que es de cuarto orden, para obtener su solución se requiere establecer dos condiciones de frontera en cada extremo ($x = 0$ y $x = L$) del dominio. Note que no se ha considerado el esfuerzo cortante en la deflexión de la viga, por ende, este análisis corresponde a flexión pura de vigas.

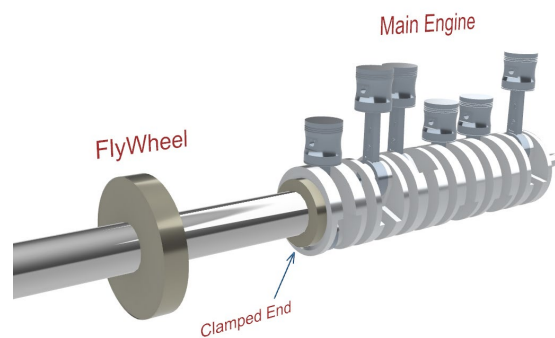
En el caso de considerar el peso distribuido del eje, w_{shaft} , los pesos de los acoples y volante como puntuales, W_i , y las fuerzas de reacción en los soportes, R_j , la función carga externa por unidad de longitud, $q(x)$, se puede expresar como:

$$q(x) = -w_{shaft}(x) - \sum_{i=1}^m W_i \delta(x - x_i) + \sum_{j=1}^n R_j \delta(x - x_j); \quad [F/L] \quad (9)$$

Donde, $\delta(x - a)$ representa la función delta Dirac. Esta función tiende a infinito cuando se evalúa en $x = a$ y es cero para cualquier otro valor de x , pero el área bajo la curva es igual a 1.0.

1.4.4 Condiciones de frontera

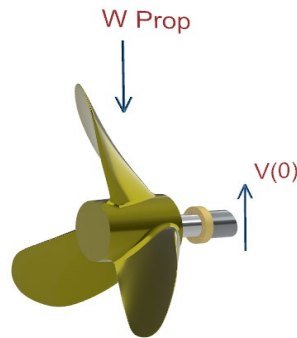
Para el cálculo de la distribución de momento flector en vigas se deben prescribir condiciones de frontera. En este caso se considera el extremo de la hélice como extremo libre con una fuerza concentrada, y la frontera entre el eje y el motor como extremo empotrado debido a que en esta sección el volante del motor se conecta firmemente con el eje, lo que evita desplazamiento y rotación. En el caso del empotramiento el desplazamiento v y la pendiente, $v_{,x} = dv/dx$, deben ser cero (Figura 1.5).



$$\begin{cases} v(L) = 0 \\ v_{,x}(L) = 0 \end{cases}$$

Figura 1.5 Empotramiento del extremo (Fuente propia)

Para un extremo libre, el momento flector es cero. En nuestro caso, si realizamos un corte muy cercano a la hélice, la fuerza cortante corresponderá al peso del propulsor, ver (Figura 1.5).



$$\begin{cases} M_z(0) = EIv_{,xx}(0) = 0 \\ V(0) = EIv_{,xxx}(0) = W_{PROP} \end{cases}$$

Figura 1.6 Extremo libre (Fuente propia)

Integrando dos veces la ecuación diferencial de equilibrio (3), aparecen dos constantes de integración, $M_z(x) = \iint q(x) + Ax + B$. Estas constantes pueden determinarse considerando el origen del sistema de coordenadas en el extremo de la hélice. Considerando las condiciones previamente mencionadas obtenemos los siguientes valores para las constantes: $A = -W_{PROP}$, $B = 0$. Si se conocieran las posiciones verticales de cada soporte, $v(x_i)$, se podría integrar la ecuación (8) y obtener las reacciones de los soportes. En un sistema propulsor real las posiciones verticales de los soportes no se conocen, y por ello se deben determinar valores del momento flector para a través de ellos calcular las reacciones.

1.4.5 Método de los extensómetros para determinar reacciones

Durante décadas se han desarrollado procedimientos para medir las fuerzas de reacción en los cojinetes de sistemas de propulsión marinos para comprobar su alineamiento. Uno de los métodos es el de gata hidráulica, que requiere levantar el punto del soporte y registrar la fuerza requerida para ello [5]. Otra opción es el método de los extensómetros. Las ventajas de este último método para medir reacciones han

sido demostradas en algunos trabajos tales como [2], [1] y [4]. Ellos verificaron que, por su simplicidad, la aplicación del método de los extensómetros resulta exitosa y renTabla para realizar este tipo de mediciones.

Por ejemplo, el sistema propulsivo del buque CCGS Earl Grey (Figura 1.7) de la Armada de EEUU consta de dos líneas de ejes idénticas de 16,9 metros de longitud e incluye dos cojinetes de bocina lubricados con aceite y un cojinete intermedio. Para evaluar el estado de alineación de las líneas de eje instaladas, [1] usaron 3 extensómetros y se instalaron en los puntos A, B y C respectivamente, ver (Figura1.7). Finalmente se logró realinear el eje empleando las mediciones de deformación medidas por los extensómetros.

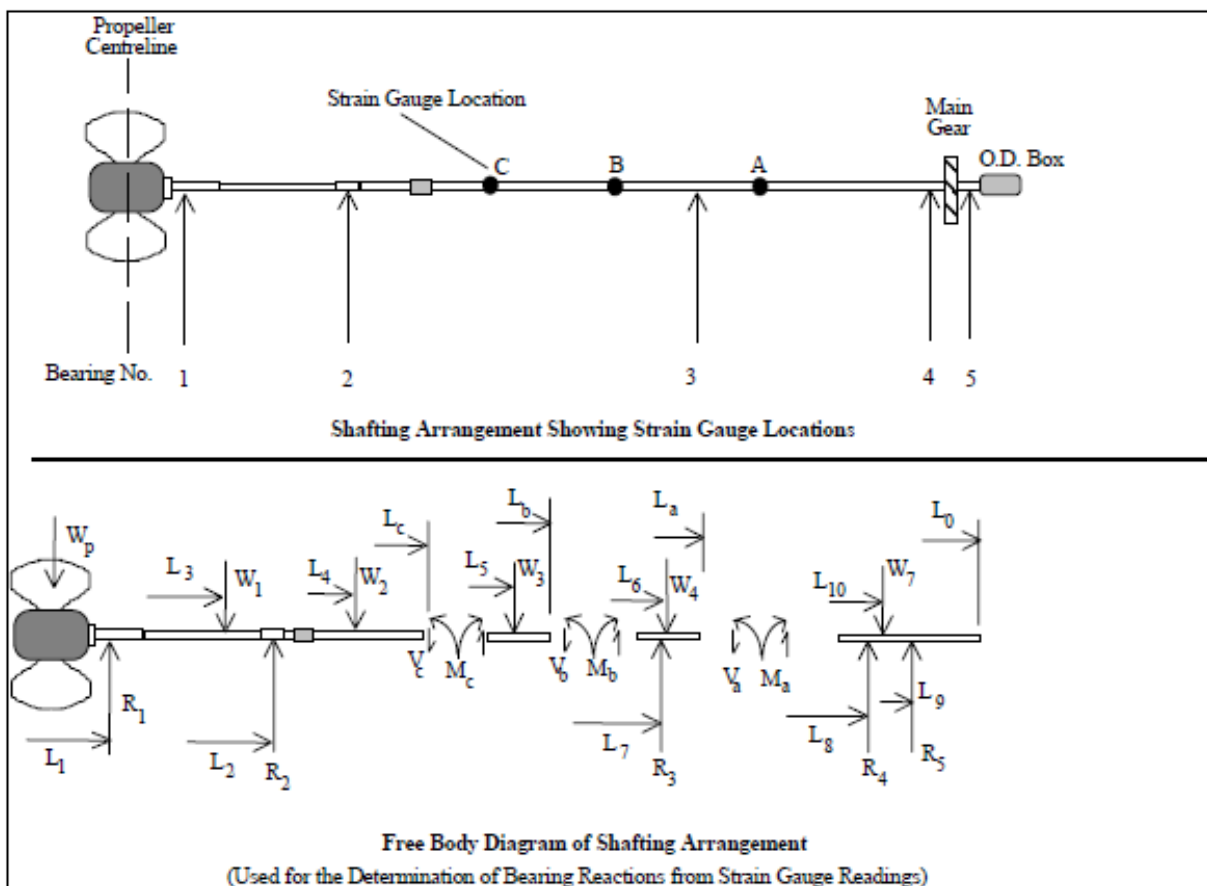


Figura 1.7 Esquema de la línea de eje mostrando extensómetros (A, B & C) y el diagrama de cuerpo libre CCGS Earl Grey (Bruce Cowper, Al DaCosta, Stephen Bobyn, 1999)

Debido a la eficiencia de la técnica de medición de las reacciones usando extensómetros, los astilleros norteamericanos comúnmente aplican el método directamente a los sistemas propulsores marinos [7]. En el presente caso, el

experimento propuesto consiste en medir las reacciones de un modelo de sistema propulsor basado en la configuración del BT “Isla Puná” (Figura 1.7). La influencia que tiene la posición vertical y lateral de los soportes sobre las reacciones generadas servirá para corroborar los valores a obtenerse.

A continuación, se explican las ecuaciones resultantes de la aplicación de la teoría de vigas que se emplearán para el cálculo experimental de las reacciones en los cojinetes del modelo.

El momento flector en un punto a lo largo de la viga puede ser evaluado a través de la deformación unitaria en dicha sección. En un punto $x(i)$, la diferencia entre la deformación unitaria medida en la parte superior, ε_x^{Sup} y en la inferior de la sección, ε_x^{Inf} , permite aproximar el momento flector en esa posición mediante la ecuación (9). Específicamente para el caso de un eje propulsor, la distancia vertical entre las posiciones superior e inferior es igual a $2R$. Estas deformaciones unitarias pueden obtenerse con un extensómetro y rotando lentamente el eje para registrar los valores extremos.

$$M_z(x(i)) = \frac{(\varepsilon_x^{Inf} - \varepsilon_x^{Sup})EI_C}{2R} \quad (9)$$

Evaluando el momento flector en diferentes posiciones a lo largo del eje, es posible formar un sistema algebraico de ecuaciones para determinar las reacciones en los soportes. El momento flector debe ser evaluado después de cada soporte, de tal manera que se incluyan las fuerzas de reacción correspondientes al dominio de análisis. Si se realiza la medición del momento flector en la posición $x(SG1)$ como se muestra en la Figura (1.7), obtenemos la siguiente expresión al integrar la ecuación de equilibrio (3) hasta dicha posición:

$$\{(x(SG1) - x(1)) \quad (x(SG1) - x(2)) \quad 0\} \begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix} = \left\{ M_z(x(SG1)) + w_s \frac{(x(SG1))^2}{2} + W_{Prop}x(SG1) \right\} \quad (10)$$

Para calcular la reacción en el segundo soporte, se debe medir el momento flector en la posición $x(SG2)$, como se muestra en la Figura (1.7). Aplicando el mismo

procedimiento se puede obtener una expresión que incluya la reacción en el tercer soporte. En el caso explicado, determinando el valor del momento flector en la posición $x(SG3)$, se obtiene el siguiente sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, correspondientes a las reacciones de los cojinetes.

$$\{A\}[Ri] = \{B\} \quad (11)$$

A continuación, se detallan cada componente de la ecuación (11).

$$\{A\} = \begin{Bmatrix} (x(SG1) - x(1)) & (x(SG1) - x(2)) & 0 \\ (x(SG2) - x(1)) & (x(SG2) - x(2)) & 0 \\ (x(SG3) - x(1)) & (x(SG3) - x(2)) & (x(SG3) - x(3)) \end{Bmatrix}$$

$$[Ri] = \begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix}$$

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} M_Z(x(SG1)) + w_s \frac{(x(SG1))^2}{2} + W_{Prop} x(SG1) \\ M_Z(x(SG2)) + w_s \frac{(x(SG2))^2}{2} + W_F(x(SG2) - x(F)) + W_{Prop} x(SG2) \\ M_Z(x(C)) + w_s \frac{(x(SG3))^2}{2} + W_F(x(SG3) - x(F)) + W_{Prop} x(SG3) \end{Bmatrix}$$

donde W_F es el peso de la brida de acople y w_s representa el peso por unidad de longitud del eje. Además, R_1 , R_2 y R_3 son las fuerzas de reacción en los cojinetes y $x(1)$, $x(2)$ y $x(3)$ corresponden a la posición de los soportes 1, 2 y 3 respectivamente.

1.4.6 Coeficientes de influencia

Los coeficientes de influencia permiten calcular el cambio en las reacciones de los soportes de un sistema propulsivo en función de la variación en la posición vertical de un soporte en específico. Conociendo los valores de los coeficientes de influencia para cada soporte al considerar un cambio en su posición vertical, es posible generar la matriz de coeficientes de influencia. Esta matriz permite verificar la susceptibilidad de una línea de ejes al realizar diferentes variaciones en la posición vertical de los soportes [9]. Los cambios de posición de los soportes se originan por desgaste debido

al tiempo de uso, deformación de la estructura del casco y en ciertos casos deformaciones térmicas. De esta manera, el incremento de carga en el i -ésimo soporte debido a una variación en la posición vertical del j -ésimo soporte corresponde a la diferencia $R_{ji} - R_i$. Finalmente, el coeficiente de influencia se obtiene al dividir la reacción resultante para el incremento vertical $v(x(i))$, del i -ésimo soporte:

$$C_{ij} = \frac{R_{ji} - R_i}{v(x(i))} \quad (12)$$

Si las elevaciones de los cojinetes no exceden el ámbito lineal, este parámetro puede calcularse teóricamente aplicando teoría de vigas, ó bien modelando el sistema propulsor aplicando elementos finitos. Esto permitirá corroborar las mediciones de las reacciones empleando el método de extensómetros.

Hélice

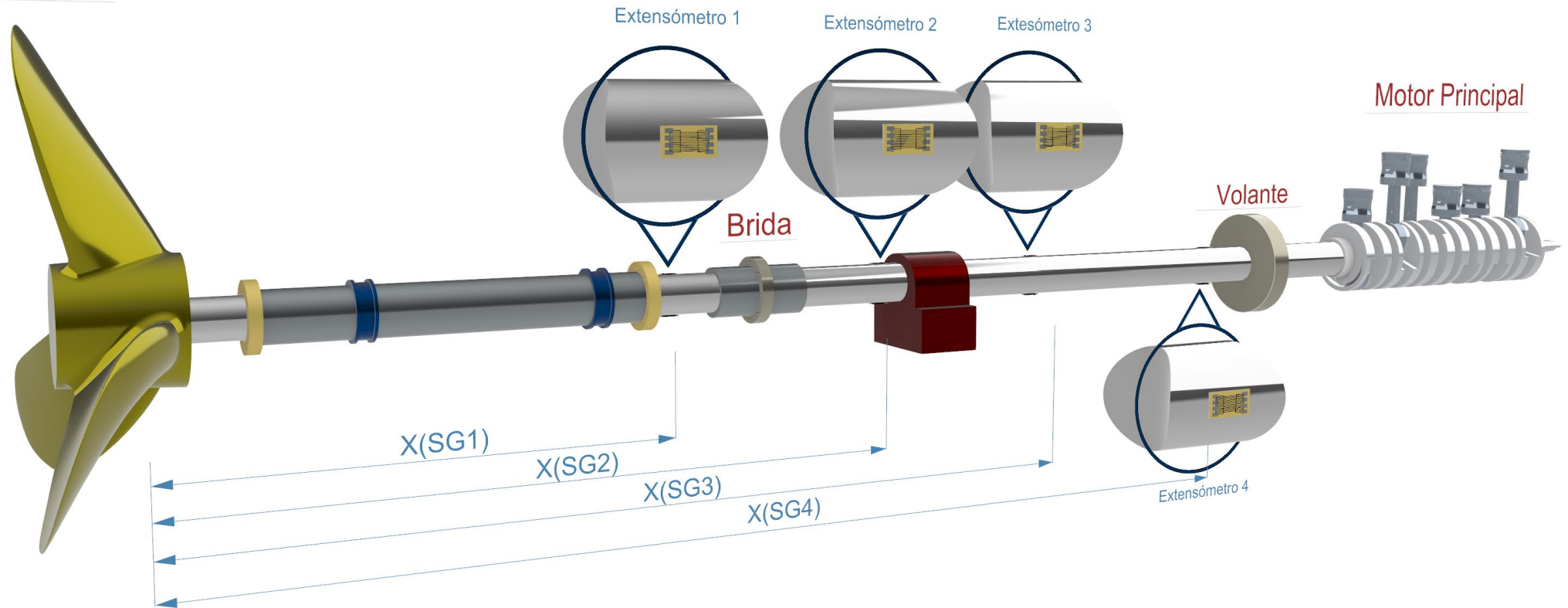


Figura 1.8 Esquema del sistema propulsivo del BT "Isla Puná"

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para determinar las reacciones en los cojinetes de un sistema de propulsión marina, se va a emplear el método de los extensómetros sobre un modelo de sistema de propulsión. El modelo está conformado por un eje de acero, discos de acero para simular las cargas de los componentes del sistema, y cojinetes móviles que permiten desplazamientos verticales y transversales del mismo. El movimiento vertical y lateral de los cojinetes permitió verificar la influencia de su posición sobre las reacciones desarrolladas y corroborar la efectividad del método. La medición de la diferencia de la deformación unitaria del punto superior e inferior en una sección del eje permite determinar el momento flector en dicha posición y finalmente determinar las fuerzas de reacción que se generan sobre los cojinetes de soportes. Para confirmar los resultados experimentales se puede aplicar teoría de vigas para determinar el cambio en las reacciones en los cojinetes debido a una elevación dada de uno de ellos. Las pruebas mencionadas con el modelo de sistema propulsivo se realizaron en el laboratorio PrOce de la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM). A continuación, en la Figura 2.1 un esquema de la metodología utilizada.

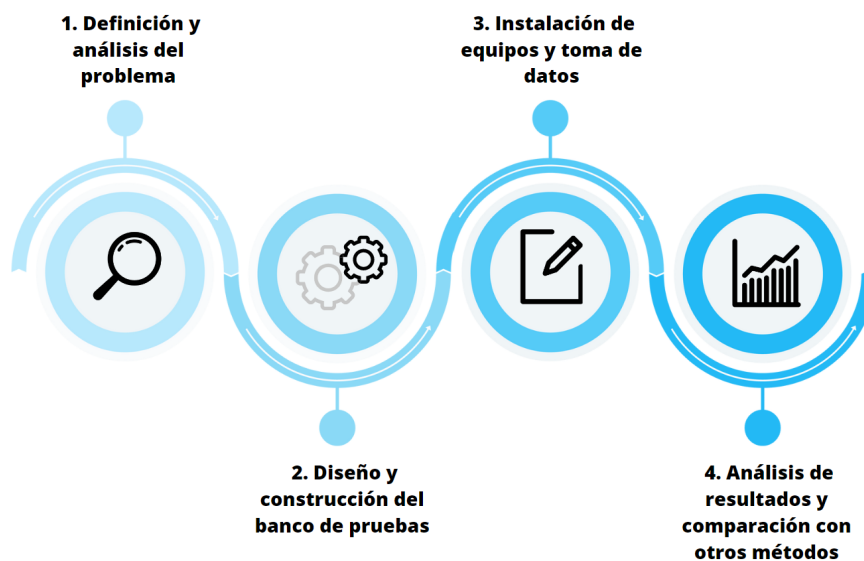


Figura 2.1 Esquema de la metodología utilizada

2.1 Construcción del equipo

2.1.1 Descripción del banco de pruebas

La medición de reacciones se desarrolló sobre un modelo de propulsión marina adecuado sobre un marco estructural con los equipos necesarios para simular distintas alineaciones del eje. Para esto se instalan sobre el eje, diferentes extensómetros para medir la diferencia en deformación unitaria entre la posición superior e inferior del eje en una sección dada. Además, se emplearon otras herramientas como medidores de carátula para verificar los desplazamientos verticales y transversales de los soportes. A continuación, en la Figura 2.2, se presentará un modelamiento 3D del banco de pruebas.

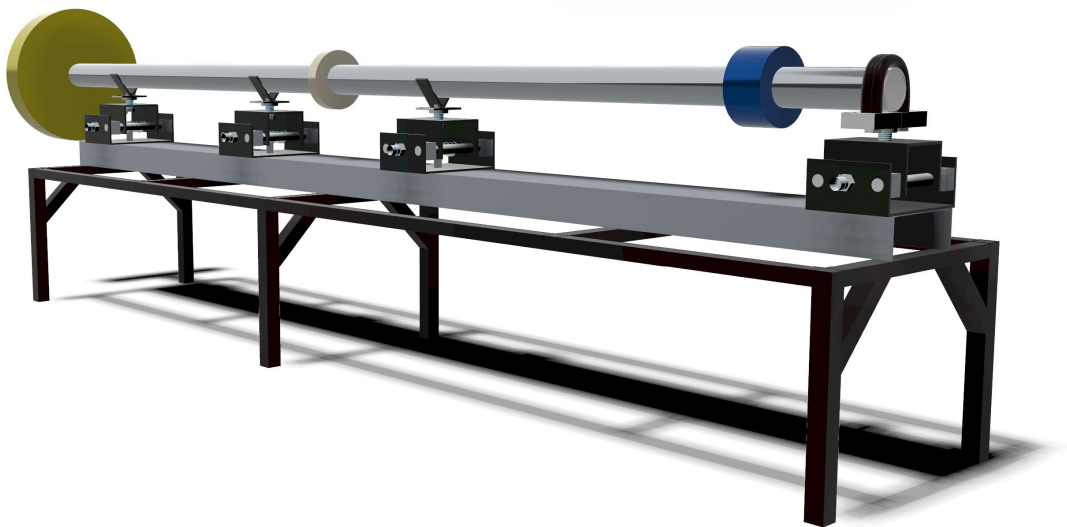


Figura 2.2 Modelamiento 3D del sistema propulsor marino modelo

En la Tabla 2.1, se detallan las dimensiones y el peso de los componentes del sistema propulsivo del B/T “Isla Puná” y del modelo. El proceso de selección de dimensiones y pesos para el modelo se detallará en el siguiente subcapítulo.

Tabla 2.1 Dimensiones y pesos - B/T "Isla Puná" – Modelo

Fuente: Propia

	B/T "Isla Puná"	Modelo	Unidades
Longitud del eje	7.5	2.7	[m]
Peso del eje	3.4E04	0.59	[kg]
Peso de la Hélice	2.1E04	3.8	[kg]
Peso de la brida	2.1E03	0.36	[kg]
Peso del volante	2.4E04	4.2	[kg]

2.1.2 Detalle de los elementos del sistema propulsivo

A continuación, se detalla las características de los componentes que conforman el sistema propulsivo modelo.

Eje

Para representar el eje, se utilizó un eje de acero de 2.7 metros de longitud disponible en el laboratorio PrOce. La longitud y el peso de este sirvieron como punto de partida para el dimensionamiento de los demás componentes de sistema propulsor.

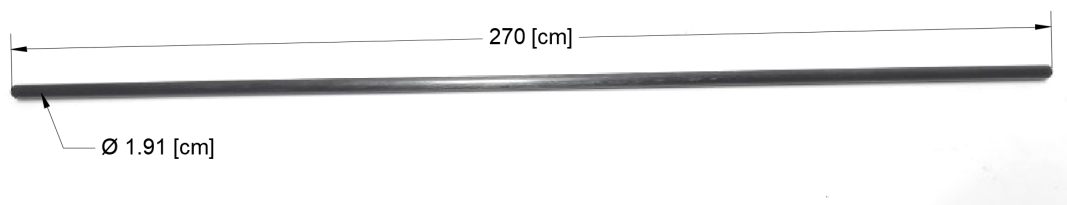


Figura 2.3 Eje de acero inoxidable

Algunas de las propiedades mecánicas del acero son, su densidad 8000 [kg/m³] y su módulo de elasticidad (Young) $2.07 \text{ E}11$ [kg/m²]

Soportes

Se construyeron 3 soportes móviles para simular una condición de frontera de apoyo simple. Cada dispositivo se conforma por una estructura con sección transversal tipo C (120x60x6 mm), dos ejes de acero que simulan 2 rieles para evitar que el soporte rote y dos pernos sin fin de acero, los cuales permiten el desplazamiento vertical y lateral de los descansos, ver Figura 2.4. Este mecanismo permitió determinar las reacciones con distintas configuraciones de la línea de eje. Los soportes se fijaron a

una viga de 2.5 metros de longitud con sección transversal en C (100x40x6 mm) acorde al sistema propulsivo del B/T “Isla Puná”.

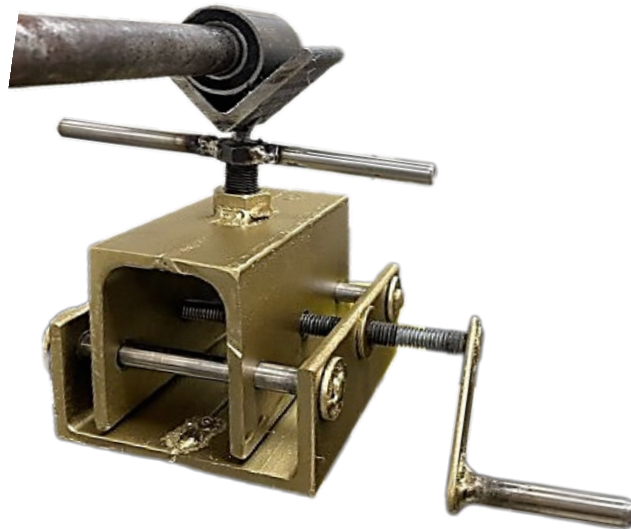


Figura 2.4 Mecanismo de movimiento vertical y transversal (soporte)

Cargas Externas

Para representar el peso de los elementos que conforman el sistema propulsivo real, se utilizaron discos de acero, Figura 2.5. El sistema se conforma por el volante del motor, la brida de acople y la hélice.



Figura 2.5 Discos de acero inoxidable usados para representar las cargas externas

Para dimensionar dichos elementos, se mantuvo la relación porcentual entre el peso de cada elemento con respecto al peso del eje que tiene el buque real. Las dimensiones de cada disco se detallan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Dimensiones de discos para simular carga externa

Fuente: Propia

Elemento	Diámetro [cm]	Espesor [cm]	Peso [Kg]	Peso total %
Volante	18	2.5	4.49	69%
Brida	11	0.5	0.36	6%
Hélice	16.8	2.2	2.47	61%

Estructura de apoyo

Se empleó una base estructural como soporte general del modelo de sistema propulsivo. El sistema incluye, el eje, el conjunto de soportes móviles, los discos empleados para simular carga externa y la viga C. El banco de pruebas construido se muestra la Figura 2.6.

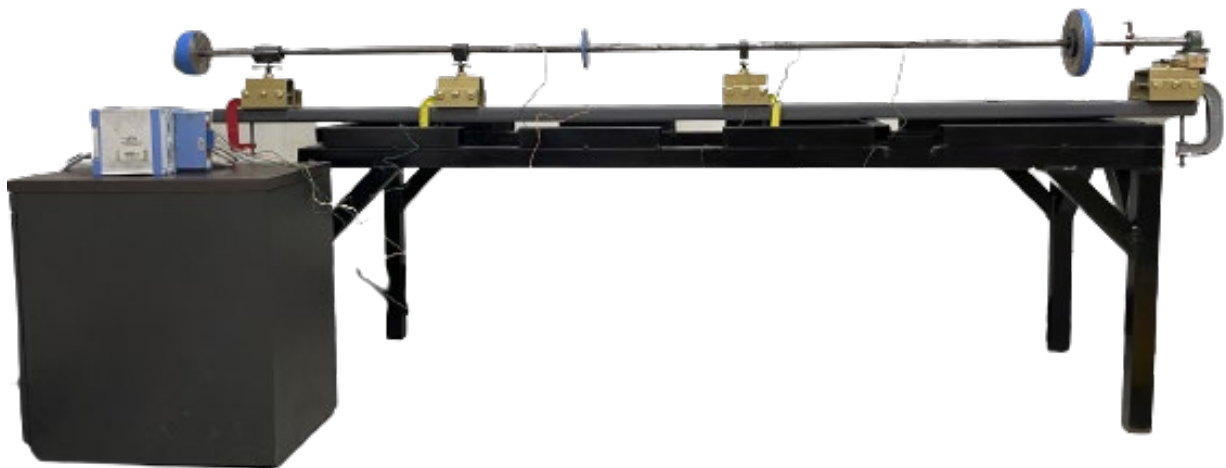


Figura 2.6 Modelo construido de sistema propulsor marino

2.2 Equipo de adquisición de datos

2.2.1 Medición de deformaciones unitarias

Extensómetros

Para medir las micro deformaciones del eje, se utilizaron extensómetros, ver Figura 2.7. Los extensómetros se colocaron en dirección longitudinal, en la parte superior de la superficie del eje. Para esta experimentación se emplearon extensómetros para acero, las especificaciones técnicas se resumen en la Tabla 2.3. Además, la posición longitudinal de los extensómetros se define como se muestra en la Figura 2.8.

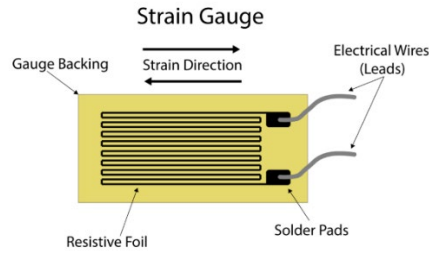


Figura 2.7 Partes de un extensómetro

Tabla 2.3 Dimensiones de discos para simular carga externa

Fuente: Propia

Strain-gauge		
Gage Factor	2.135 +/- 0.5%	
Resistance	120 +/- 0.15%	[Ohms]

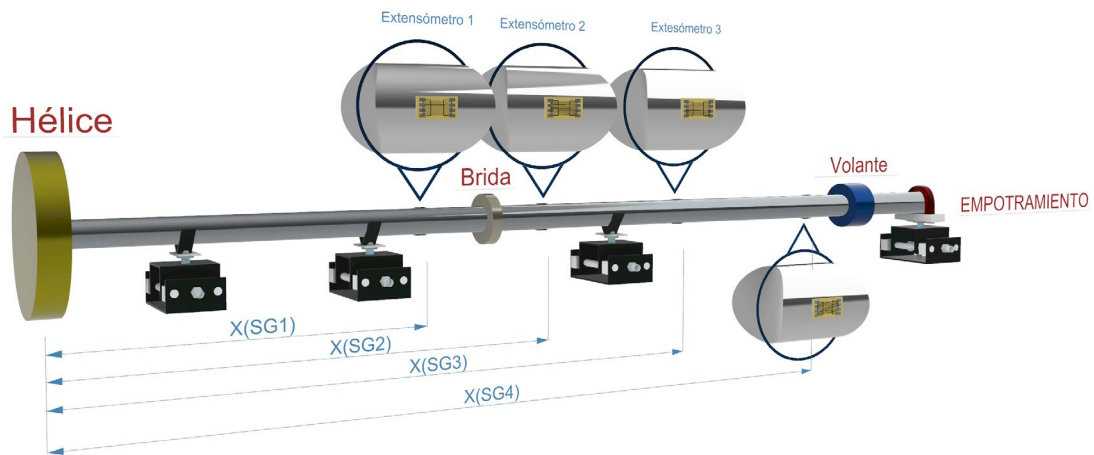


Figura 2.8 Posición longitudinal de los extensómetros a lo largo del eje

Tabla 2.4 Posición de los elementos del sistema propulsivo modelo

Fuente: Propia

Elemento	Distancia	Unidades
X(soporte1)	23.5	[cm]
X(soporte2)	81.4	[cm]
X(extensómetro1)	93.1	[cm]
X(Brida)	115.4	[cm]
X(extensómetro2)	136	[cm]
X(soporte3)	154.9	[cm]
X(extensómetro3)	161.7	[cm]
X(extensómetro4)	215	[cm]
X(Volante)	242.5	[cm]
X(total)	270	[cm]

Equipo para medir deformaciones unitarias

Las micro deformaciones del eje se registraron en el tiempo empleando el equipo de adquisición de datos de marca InstruNet y una computadora con el software iNet32. Debido a que nuestro análisis es estático, se empleó un scan rate bajo, de 50 scans/segundo. En la Figura 2.9 se muestra el esquema de conexiones empleado, junto con el equipo.

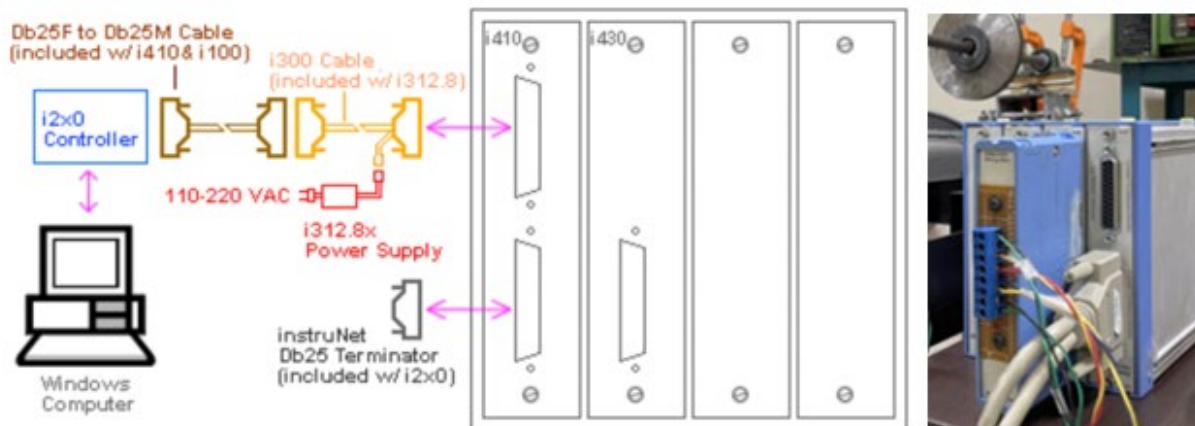


Figura 2.9 Esquema de conexiones del equipo de adquisición de datos InstruNet

2.2.2 Medición de desplazamientos

Para medir los desplazamientos se utilizó un indicador de caratula. Este equipo permitió cuantificar de manera análoga magnitudes muy pequeñas en el orden de centésimas de milímetro. El equipo se muestra en la Figura 2.10.

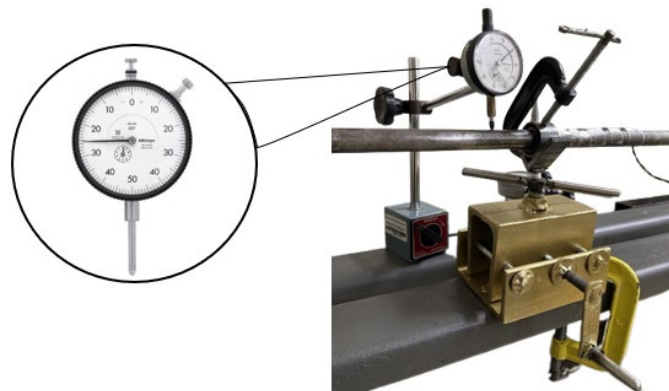


Figura 2.10 Indicador de caratula "MYTUTOYO"2.10

2.3 Descripción de la experimentación

2.3.1 Método para obtener reacciones

Una vez que el banco de pruebas esté armado con todos sus componentes y los extensómetros estén instalados en el eje, se procede a realizar la toma de datos. Esta toma de datos consiste en rotar el eje, lentamente y de manera continua, por 360 grados en sentido horario y posteriormente antihorario, hasta volver a la posición original. Una vez obtenidas las diferentes medidas de micro deformaciones se procede a determinar la diferencia entre los valores cuando el extensómetro se encuentra en 0 y 180 grados. Posteriormente se reemplazan estos valores en las ecuaciones definidas en el capítulo 1 para calcular los momentos flectores, se arma el sistema de ecuaciones y su solución provee las fuerzas de reacción en los soportes.

Para verificar la influencia de la posición vertical de los soportes sobre las reacciones, se configuraron diferentes alineaciones del eje. Para esta etapa, los soportes N°2 y N°3 fueron desplazados independientemente tanto vertical como transversalmente. El detalle de los movimientos se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 2.5 Desplazamientos verticales y transversales - soporte N°2 y soporte N°3

Fuente: Propia

Alineación	Soporte	Descripción
1	1 – 2 – 3	Posición inicial - "Alineación original"
2	2	Mov. Vertical (0.3, 0.6 y 0.9 mm)
3	2	Mov. Lateral (0.2 mm) + Movimiento vertical (0.3, 0.6 y 0.9 mm)
4	2	Mov. Lateral (0.4 mm) + Movimiento vertical (0.3, 0.6 y 0.9 mm)
5	3	Mov. Vertical (0.3, 0.6 y 0.9 mm)
6	3	Mov. Lateral (0.2 mm) + Mov. Vertical (0.3, 0.6 y 0.9 mm)
7	3	Mov. Lateral (0.4 mm) + Mov. Vertical (0.3, 0.6 y 0.9 mm)

Es importante mencionar que mientras un soporte era desplazado, los otros 2 permanecían en su posición original, para analizar la influencia que tiene el desplazar un soporte sobre el sistema.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se describen los resultados experimentales obtenidos al implementar el método de los extensómetros en el modelo simplificado de propulsión marina. Las reacciones en los soportes se determinaron empleando los valores de micro deformación registrados por los extensómetros al rotar el eje una vuelta completa y regresar a su posición original. Además, se presentan gráficas en donde se ilustra la variación de las reacciones sobre los soportes de la línea de eje, considerando las configuraciones presentadas en el Capítulo 2 (Tabla 2-4). Por último, se muestra la diferencia porcentual entre los valores de coeficientes de influencia obtenidos experimental, analítica y numéricamente (utilizando el programa Ansys).

3.1 Consistencia de resultados

Para verificar la consistencia de las mediciones de microdeformación, se realizaron 3 pruebas por cada configuración de los soportes del sistema propulsivo; en cada prueba se registraron las lecturas de los cuatro extensómetros instalados. Por ejemplo, la Figura 3.1, muestra los valores de microdeformación registrados por el extensómetro 1 al rotar el eje 360°. Note que en los tres casos, las gráficas tienen la misma tendencia, los valores extremos son muy cercanos entre sí y al final del proceso el valor final vuelve al inicial. De esta manera verificamos la correcta lectura y funcionamiento de los extensómetros.

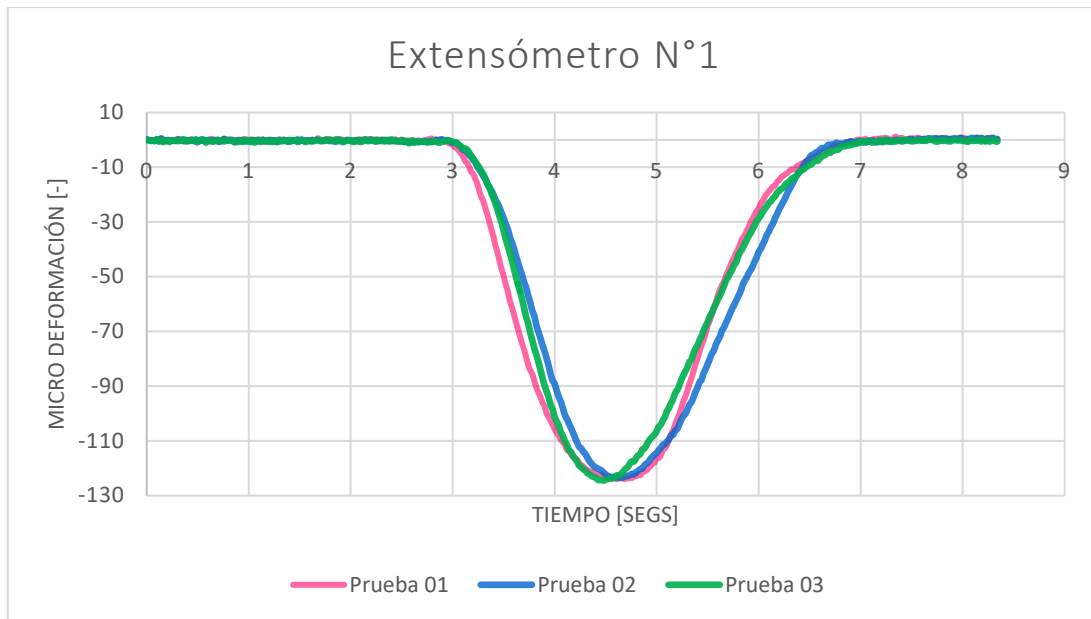


Figura 3.1 Micro deformación vs Tiempo – Extensómetro 1 (Fuente propia)

En Apéndice III, se adjuntan las gráficas correspondientes a las lecturas de los extensómetros 2, 3 y 4 para cada una de las pruebas realizadas. Cabe recalcar que en general, en todas las pruebas, las curvas de deformación unitaria convergen hacia el mismo valor máximo.

3.2 Resultados experimentales

Experimentalmente las reacciones se determinaron resolviendo el sistema de ecuaciones algebraicas (11). Los valores de microdeformación fueron registrados mediante extensómetros en tres puntos a lo largo del eje, cuando se lo rota una vuelta completa y se lo regresa a la posición original. Empleando estos valores y la ecuación (9), se estimó el momento flector correspondiente. Finalmente, los valores obtenidos a solucionar el sistema de ecuaciones corresponden a las reacciones en los soportes interiores (que representan los del túnel del eje y el intermedio) del modelo. De acuerdo con el equilibrio estático, la fuerza de reacción en el cojinete de empuje, que se encuentra en el extremo de Proa, se calcula como la diferencia entre la suma de los pesos totales, y la suma de las tres reacciones ya calculadas.

3.2.1 Deformaciones Unitarias del eje

En la tabla 3-1 se muestran las lecturas de deformación registradas por los extensómetros considerando la alineación 1, detallada en el Capítulo 2 (Tabla 2-4). Los movimientos verticales corresponden a 0.3 mm en cada etapa que corresponden a 12 milésimas de pulgada. Nótese que el valor de la microdeformación unitaria varía entre -37 y 150.

Tabla 3.1 Valores registrados del cambio de micro deformación con desplazamiento vertical del soporte N°3

Fuente: Propia

	Deformaciones unitarias Alineación N°6				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Extensómetro 1	-1.5E-04	-1.4E-04	-1.3E-04	-1.1E-04	με
Extensómetro 2	-6.9E-05	-8.0E-05	-9.1E-05	-1.0E-04	με
Extensómetro 3	-3.7E-05	-5.6E-05	-7.6E-05	-1.0E-04	με
Extensómetro 4	8.5E-05	7.6E-05	6.8E-05	5.8E-05	με

3.2.2 Momento flector y fuerzas de reacción

En la Tabla 3-2, se muestran los valores de momento flector ($M_z(i)$), obtenidos en función de los respectivos valores de micro deformación registrados previamente por los extensómetros (Tabla 3-1).

Tabla 3.2 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 5

Fuente: Propia

	Momento flector Alineación N°5				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Mz 1	-10.7	-9.8	-8.6	-7.8	N-m
Mz 2	-5.0	-5.9	-6.7	-7.6	N-m
Mz 3	-2.9	-4.3	-6.0	-7.6	N-m

Tabla 3.3 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 6

Fuente: Propia

	Momento flector Alineación N°6				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Mz 1	-10.8	-9.8	-8.8	-7.9	N-m
Mz 2	-4.8	-5.6	-6.4	-7.3	N-m

Mz 3	-2.6	-3.9	-5.3	-7.1	N-m
-------------	------	------	------	------	-----

Tabla 3.4 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 7

Fuente: Propia

	Momento flector Alineación N°7				Unidades
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	
Mz 1	-10.7	-9.7	-8.7	-7.9	N-m
Mz 2	-4.8	-5.8	-6.8	-7.5	N-m
Mz 3	-2.9	-4.2	-5.9	-7.5	N-m

Tabla 3.5 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 2

Fuente: Propia

	Momento flector Alineación N°2				Unidades
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	
Mz 1	-10.7	-13.0	-15.1	-17.0	N-m
Mz 2	-5.0	-4.6	-4.5	-4.8	N-m
Mz 3	-2.9	-1.6	-0.3	0.1	N-m

Tabla 3.6 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 3

Fuente: Propia

	Momento flector Alineación N°3				Unidades
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	
Mz 1	-10.9	-13.1	-15.1	-17.0	N-m
Mz 2	-4.6	-4.3	-4.4	-4.9	N-m
Mz 3	-2.5	-1.0	-0.2	0.2	N-m

Tabla 3.7 Momentos Flectores en las posiciones x1, x2 y x3 – Alineación 4

Fuente: Propia

	Momento flector Alineación N°4				Unidades
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	
Mz 1	-10.5	-13.2	-15.0	-17.0	N-m
Mz 2	-5.0	-4.6	-4.5	-4.8	N-m
Mz 3	-2.7	-1.4	-0.4	0.1	N-m

En la figura 3.2, se muestra la variación de las reacciones determinadas experimentalmente en los soportes para el Alineación 1 (Tabla 2-4). Note que a

medida que el soporte 2 se levanta, la reacción en este soporte incrementa, mientras que en los adyacentes (soportes 1 y 3) las reacciones tienden a disminuir. Esto tiene total sentido físico, dado que, si un soporte se encuentra relativamente más arriba que los demás, absorberá mayor carga y por ende desarrollará mayor reacción.

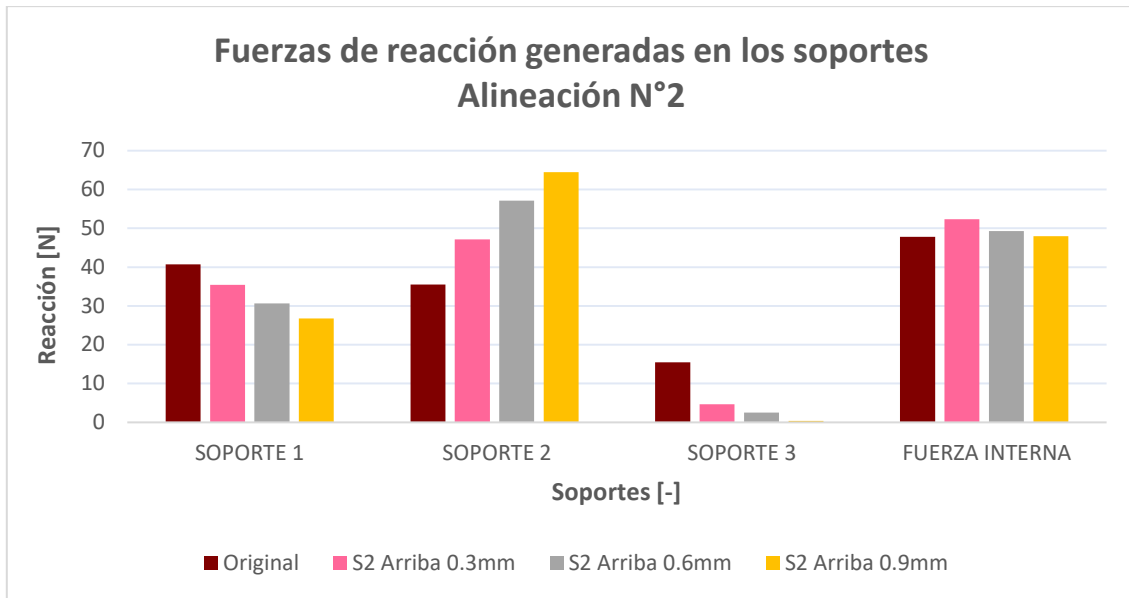


Figura 3.2 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 2 – Alineación N°2

El mismo fenómeno físico ocurre al levantar el soporte 3. A medida que la posición vertical del soporte aumenta, este absorbe mayor carga, reduciendo así la carga soportada por los soportes adyacentes.

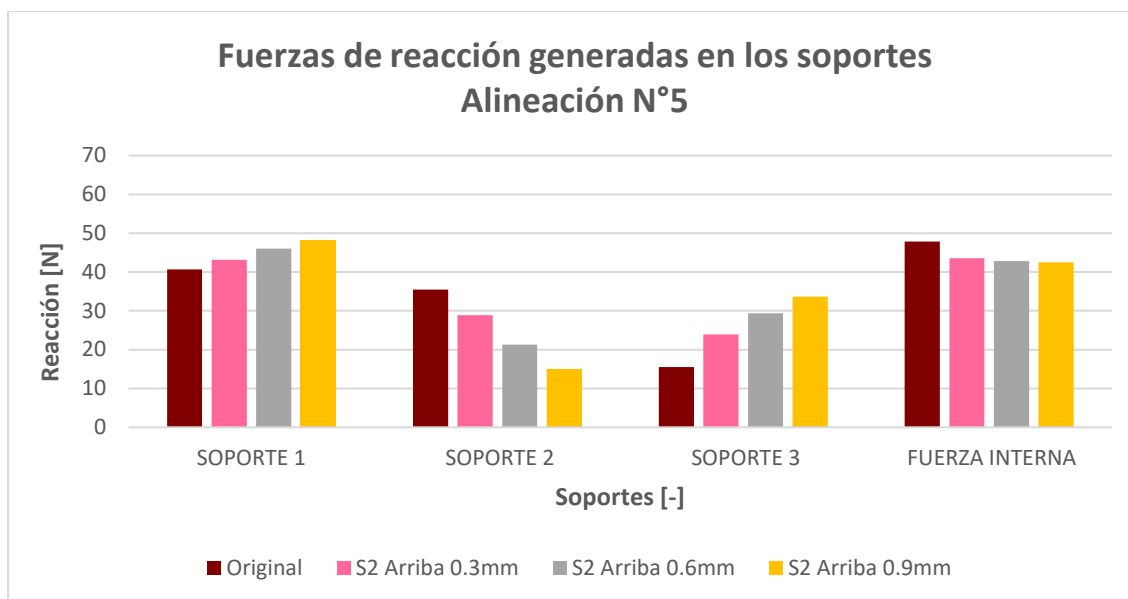


Figura 3.3 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 3– Alineación N°5

3.3 Coeficientes de influencia

Para calcular los coeficientes de influencia se realizó la diferencia entre las reacciones obtenidas de cada movimiento vertical con respecto a las reacciones obtenidas cuando el sistema estaba en su posición inicial, y se las dividió para el desplazamiento realizado en cada movimiento. En este punto se van a comparar los coeficientes de influencia obtenidos experimentalmente con los resultados teóricos. En la Tabla 3-8 y Tabla 3-9, se muestra la diferencia entre dichos valores para los soportes 2 y 3 respectivamente. Note que, en ambos casos la máxima diferencia entre los coeficientes de influencia es menor al 3%. Esto indica que las reacciones calculadas a partir del método de los extensómetros son válidas.

Tabla 3.8 Comparación de coeficientes de influencia – Soporte 2

Fuente: Propia

Soporte 2 Experimental [N/mm]	Analítico [N/mm]	Diferencia Porcentual Experimental/Analítico
-18,7	-19,1	2,1%
41,3	42,2	2,1%
-30,2	-30,8	2,1%

Tabla 3.9 Comparación de coeficientes de influencia – Soporte 3

Fuente: Propia

Soporte 3 Experimental [N/mm]	Analítico [N/mm]	Diferencia porcentual Experimental/Analítico
10,8	11,1	2,0%
-30,2	-30,8	2,1%
32,3	33,0	2,1%

Para verificar la influencia del desalineamiento transversal, se consideraron desplazamientos de 0.2 y 0.4 mm sobre los soportes 2 y 3. Luego de cada desplazamiento lateral se ejecutaron elevaciones verticales y se determinó los coeficientes de influencia realizando el cociente entre la diferencia de reacciones y la distancia desplazada. En la Figura 3.4 y Figura 3.5, se muestran la variación entre los coeficientes de influencia para el soporte 2 y soporte 3 respectivamente. El Arreglo 2 significa que los soportes se encuentran en la posición original, es decir el desplazamiento lateral es cero, y luego los arreglos 3 y 4 indican que dicho soporte se desplazó lateralmente las cantidades previamente mencionadas.

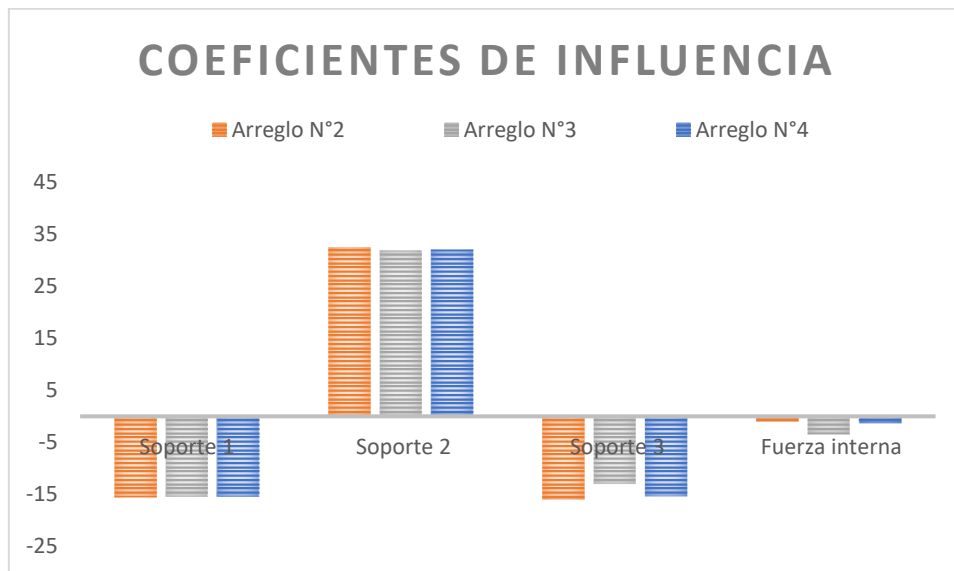


Figura 3.4 Influencia del desplazamiento transversal – Soporte 2

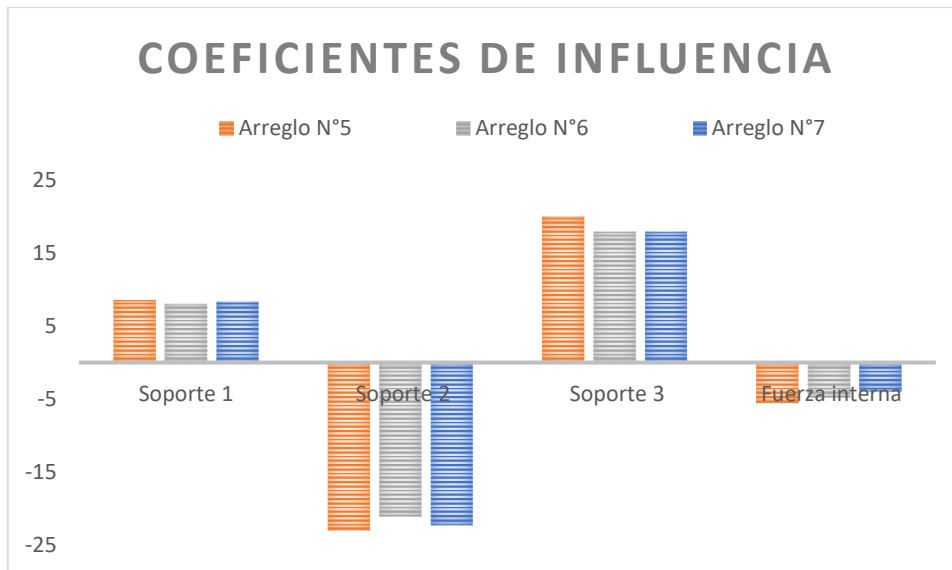


Figura 3.5 Influencia del desplazamiento transversal – Soporte 3

Note que, en ambos casos, los valores de los coeficientes de influencia presentan pequeñas variaciones. La máxima variación calculada a partir de los resultados experimentales es del 10%, por lo tanto, se puede inferir que, experimentalmente un desalineamiento lateral de 0.4 mm no altera de manera significativa las reacciones en los soportes.

3.4 Comparación con otros métodos

Resolviendo la ecuación diferencial de flexión (8) presentada en el capítulo 1, asumiendo que todos los soportes están en la misma línea horizontal se pueden calcular las reacciones. Luego elevando uno de los soportes una distancia dada, se pueden volver a calcular dichas fuerzas, considerando que el problema matemático aplicado es lineal. Finalmente se puede calcular los coeficientes de influencia como el cociente entre el cambio de las fuerzas en cada soporte dividido para la distancia levantada. Este proceso nos produciría una columna de la matriz de coeficientes, correspondiente al soporte levantado. Este proceso también se puede desarrollar aplicando el método de elementos finitos, al modelo estructural del sistema propulsor. Para el desarrollo del MEF se utilizó el programa ANSYS y se modeló al eje utilizando elementos sólidos como se muestra en la Figura 3.6.

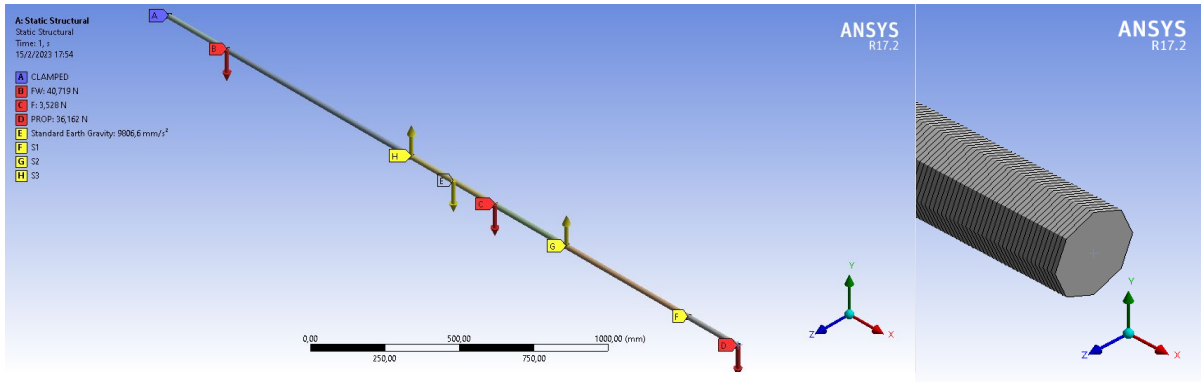


Figura 3.6 Modelo geométrico – Ansys Workbench R17.2

Finalmente, en las tablas 3-10 y 3-11, se muestran los coeficientes de influencia resultantes obtenidos experimentalmente, analíticamente y aplicando el MEF. El proceso para la aplicación del MEF se detalla en Apéndice III.

Tabla 3.10 Comparación de los coeficientes de influencia – Soporte 2

Fuente: Propia

Soporte 2		Diferencia Porcentual
Experimental [N/mm]	Numérico [N/mm]	Exp/Numérico
-18,7	-18,7	2,1%
41,3	41,3	2,1%
-30,2	-30,2	2,1%

Tabla 3.11 Comparación de los coeficientes de influencia – Soporte 3

Fuente: Propia

Soporte 3		Diferencia Porcentual
Experimental [N/mm]	Numérico [N/mm]	Exp/Numérico
10,8	10,8	2,0%
-30,2	-30,2	2,1%
32,3	32,3	2,1%

Note que la diferencia entre los coeficientes de influencia teóricos/experimentales y los numéricos/experimentales para el soporte 2 y 3, es menor al 3%. Cabe recalcar que experimentalmente la precisión de los resultados depende de los valores de deformación unitaria registrados por los extensómetros, de manera que, de acuerdo con los valores de diferencia porcentual, la posición en la que se colocó los extensómetros fue adecuada.

En la Figura 3.7, se muestra la variación de la distribución de momento flector al levantar el soporte 3 distancias consecutivas de 0.3, 0.6 y 0.9 mm. Note que, en todos los escenarios, el momento flector en $x = 0$ es cero. Esto sucede dado que en esa posición se encuentra la hélice y se consideró este extremo como voladizo. Sin embargo, en $x = L$, observamos que el momento flector tiende a disminuir, pudiendo en el extremo tomar valores negativos.

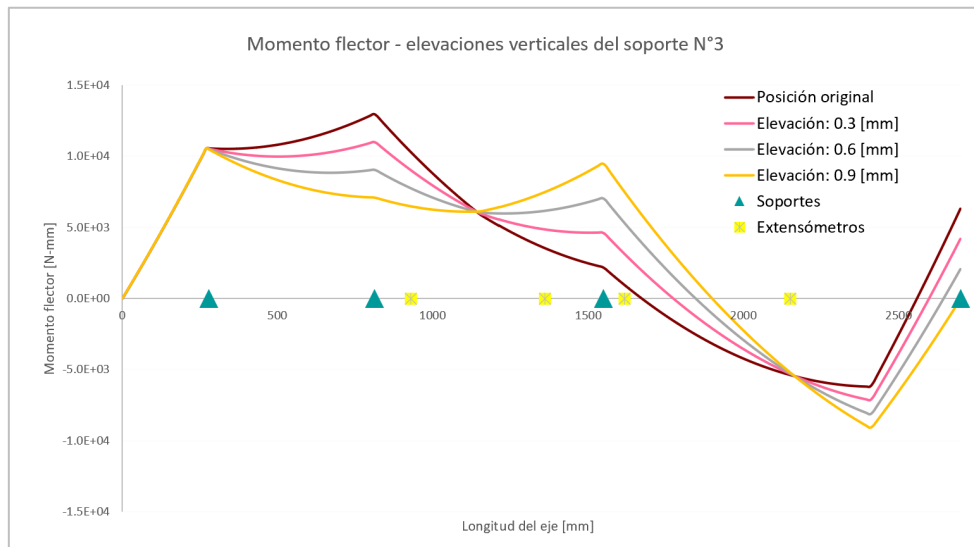


Figura 3.7 Variación de momento flector por efecto del levantamiento del soporte 3 – teoría de vigas

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se determinó experimentalmente las fuerzas de reacción en los soportes de un modelo de propulsión marina empleando el método de los extensómetros. Los soportes móviles del modelo permitieron determinar las reacciones considerando diferentes configuraciones de la línea de eje. Con estos valores, se determinó la matriz de coeficientes de influencia considerando el levantamiento del soporte 2 y 3. Además, se comparó estos resultados con los resultados obtenidos mediante la aplicación de teoría de vigas y los resultados numéricos obtenidos aplicando el MEF en Ansys.

4.1 Conclusiones

Luego de haber realizado la experimentación sobre el modelo simplificado de propulsión marina construido tomando como referencia el BT "Isla Puná", podemos concluir que:

- i. El modelo del sistema propulsor incluyó todos los elementos del sistema real, y además permitió aplicar el método de extensómetros considerando movimientos verticales y transversales de los soportes intermedios. Por lo tanto, el banco de pruebas diseñado y construido es el adecuado para las pruebas planeadas.
- ii. Los valores determinados de las reacciones pudieron compararse con los valores teóricos obtenidos aplicando teoría de vigas, a través de los coeficientes de influencia. Este parámetro se obtuvo con la variación de las reacciones por unidad de elevación de uno de los soportes. Dado que, para determinarlas se requiere del cambio y no de valor absoluto, se aplicó teoría de vigas para su cálculo. El rango de los valores de las deformaciones unitarias permitió evaluar con buena confiabilidad los momentos flectores. De manera que las ubicaciones de los extensómetros fueran las

adecuadas. Se estimó una diferencia menor al 3% entre los resultados experimentales y analíticos. Esto indica que la aplicación del método de los extensómetros para calcular reacciones en el sistema propulsor modelo, es válido.

- iii. Se impuso movimientos transversales a dos soportes del sistema para simular un desalineamiento transversal del eje. Luego, realizando elevaciones verticales se determinaron las reacciones y finalmente los coeficientes de influencia. Los valores obtenidos luego de dichos movimientos muestran una variación menor al 2% respecto a la posición original. Esto indica que la influencia de un desalineamiento transversal de hasta 0.4 mm (probado en este trabajo) no influye de manera significativa sobre las reacciones. Lo cual ampliaría la aplicabilidad del método en el caso de aplicarse sobre sistemas propulsivos reales.

4.2 Recomendaciones

- i. Para aplicar el método de los extensómetros sobre un sistema propulsor marino real, se recomienda usar una tarjeta de adquisición de datos inalámbrica. Dado que, para registrar los valores de deformación unitaria del eje, es necesario rotarlo; y la presencia de cables/conexiones representa un riesgo para los equipos y para el personal encargado de desarrollar las pruebas.
- ii. Para determinar la ubicación de los extensómetros se recomienda calcular y graficar analíticamente la curva de deformación unitaria a lo largo del eje. De esta manera se puede realizar un análisis de sensibilidad para verificar la validez y el orden de magnitud de los futuros resultados.

5. BIBLIOGRAFÍA

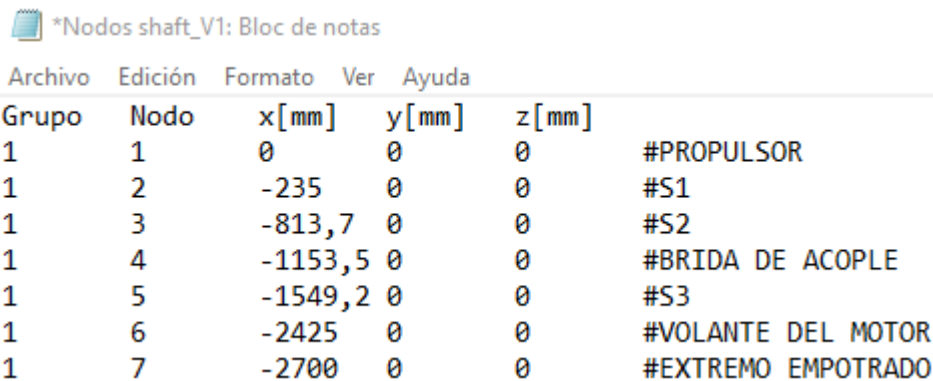
- [1] Albert W. Forrest, Jr., Richard F. Labasky. (1981). Shaft Alignment Using Strain Gages. *Marine Technology*, 276 - 284.
- [2] Bruce Cowper, Al DaCosta, Stephen Bobyn. (1999). Shaft Aligment Using Strain Gages: Case Studies. *SNAME Great Lakes & Great Rivers - Eastern Canadian Sections Joint Spring Meeting*. Canada: SNAME Marine Technology.
- [3] Cowper, B., Rickman, D., & Sahr, D. (2006). *Application of the strain gauge alignment*.
- [4] Grant, R. (1980). *Shaft Alignment Methods with Straing Gages and Load Cells*. Marine Technology.
- [5] Harrington, R. (1992). *Marine Engineering*. New York: SNAME.
- [6] Popov, E. P. (1999). *Engineering Mechanics of Solids*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [7] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. (1978). *Results Of A Survey On Shaft Alignment Procedures Used By American Shipyards*. New York.
- [8] TRANSNAVE. (2022). Guayaquil.
- [9] Villareal, R. O. (2006). *Rediseño del Sistema Propulsor del BAE "Guayas"*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.

APÉNDICE

APENDICE A

Preparación de archivo texto en ANSYS WORKBENCH

Para la aplicación del MEF las coordenadas de cada elemento del sistema propulsivo modelo se escribieron en un bloc de notas. El documento de texto debe seguir el siguiente formato: Grupo, número de nodo, coordenada en x, coordenada en y y coordenada en z. Las coordenadas se midieron en milímetros y se consideró el eje como una línea totalmente recta. Por lo tanto, los valores de la componente vertical y horizontal son cero.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
Grupo	Nodo	x[mm]	y[mm]	z[mm]	
1	1	0	0	0	#PROPULSOR
1	2	-235	0	0	#S1
1	3	-813,7	0	0	#S2
1	4	-1153,5	0	0	#BRIDA DE ACOPLA
1	5	-1549,2	0	0	#S3
1	6	-2425	0	0	#VOLANTE DEL MOTOR
1	7	-2700	0	0	#EXTREMO EMPOTRADO

Figura A.1 Coordenadas de nodos – Sistema propulsivo modelo

Desarrollo del modelo geométrico en ANSYS DESIGN MODELER

El eje fue modelado en el apartado de “Design Modeler”. Se importó el documento de texto con las coordenadas y a partir de cada punto se generó la línea que define al eje con la herramienta “Path”. La sección transversal del eje se genera empleando la herramienta “Cross section” y se asigna a la línea que define el eje. Finalmente, con el comando “Generate” se actualizan el modelo con las configuraciones realizadas como se muestra en la Figura 5-2.

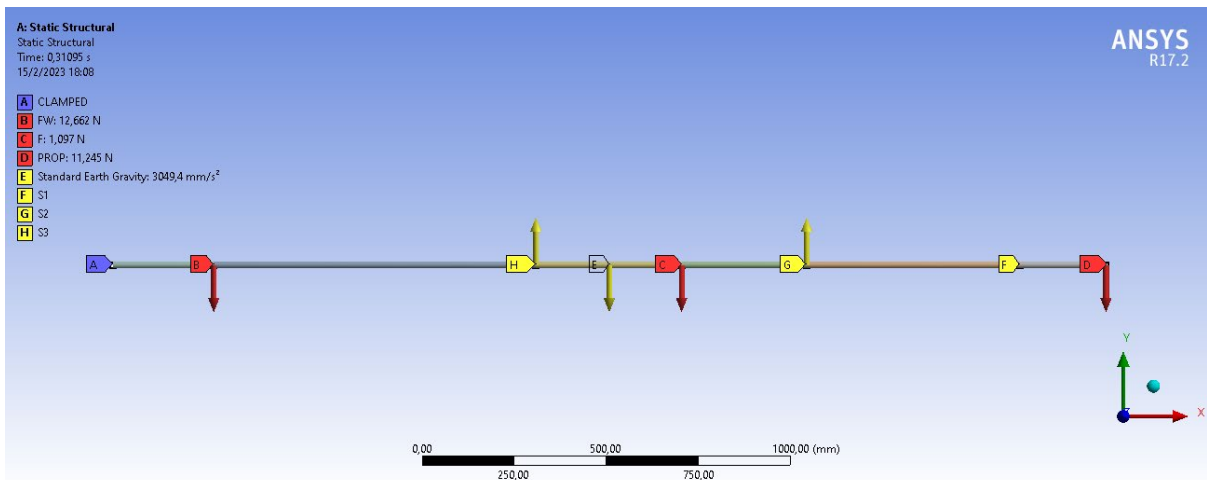


Figura A.2 Modelo de eje B/T “Isla Puná”

Generación de Malla

En el apartado “Model” se puede generar el mallado requerido para el análisis mediante elementos finitos tipo sólido. Se consideró un mallado de 5 mm debido a las dimensiones del modelo. Por último, con la herramienta “Mesh connection group” se verificó que las conexiones entre cada elemento sean adecuadas.

Condiciones de frontera y Fuerzas Externas

En la sección “Static Structural” se definen las condiciones de frontera y fuerzas externas que actúan sobre el modelo. El extremo de la hélice fue considerado como voladizo y el externo del eje conectado al motor, como empotrado. Para los puntos correspondiente a los soportes, se restringió el desplazamiento en los tres ejes de coordenadas. Finalmente, se consideró el peso del volante, brida y hélice como cargas puntuales, además, el peso del eje fue calculado internamente por el programa mediante la herramienta “Standard Earth Gravity”.

Evaluación de resultados / Aplicación de herramienta Beam-Tool

El interés del análisis mediante el MEF es obtener el diagrama de momento flector y las reacciones en los soportes del sistema. El diagrama de momento se genera mediante la herramienta “Beam-Tool” y las reacciones se evaluaron mediante la herramienta “Probe”.

APENDICE B

Resultados analíticos

Tabla B.1 Resultados obtenidos de aplicar teoría de vigas

x	EI C $\vartheta(x)$	$\vartheta(x)$ [mm]	Mz(x), g cm	σ (Mpa)	$\mu\epsilon$
0	0.0E+00	0.00	-6.5E+04	-9.32	-45.28
27	-8.4E+06	-0.06	5.6E+04	8.09	39.32
54	1.2E+07	0.09	5.6E+04	8.01	38.94
81	7.2E+07	0.53	3.1E+04	4.52	21.97
108	1.5E+08	1.13	-9.2E+03	-1.32	-6.43
135	2.3E+08	1.69	-3.7E+04	-5.37	-26.08
162	2.8E+08	2.04	-7.4E+04	-10.67	-51.83
189	2.7E+08	1.99	-1.3E+05	-19.15	-93.05
216	1.8E+08	1.30	-1.1E+05	-16.20	-78.71
243	-5.0E+05	0.00	-1.1E+05	-15.56	-75.62
270	-2.4E+08	-1.78	3.5E-09	0.00	0.00

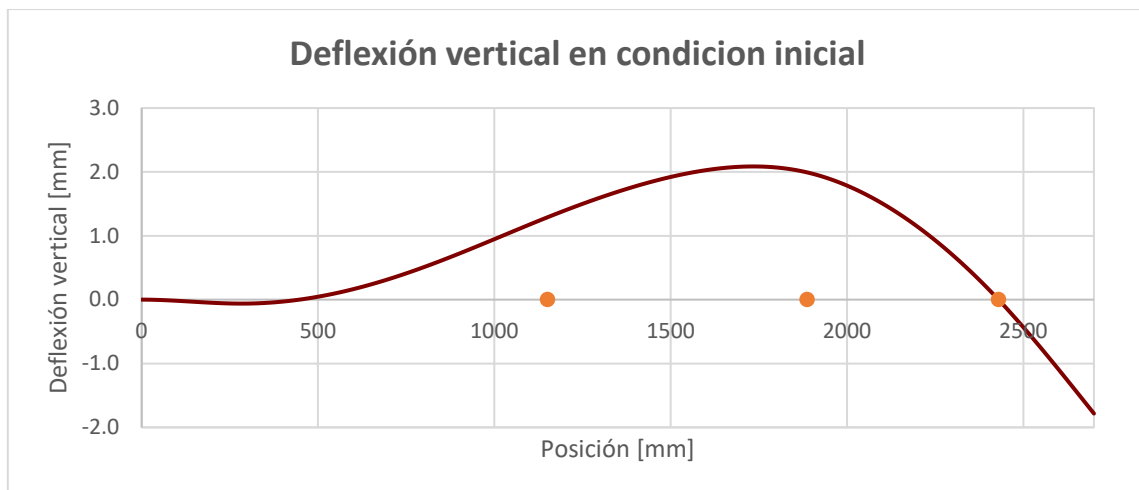


Figura B.1 Deflexión vertical del eje



Figura B.2 Micro deformaciones a lo largo del eje

APENDICE C

Modelamiento 3D de banco de pruebas

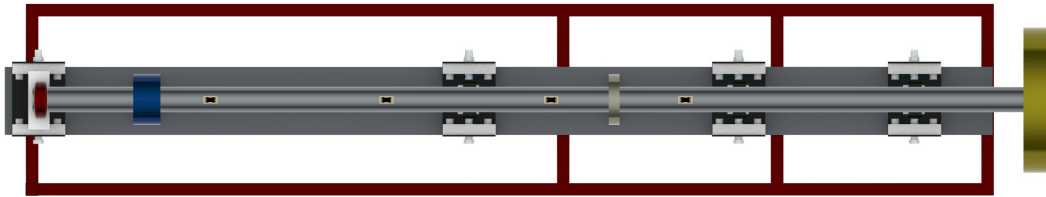


Figura C.1 Vista superior del banco de pruebas

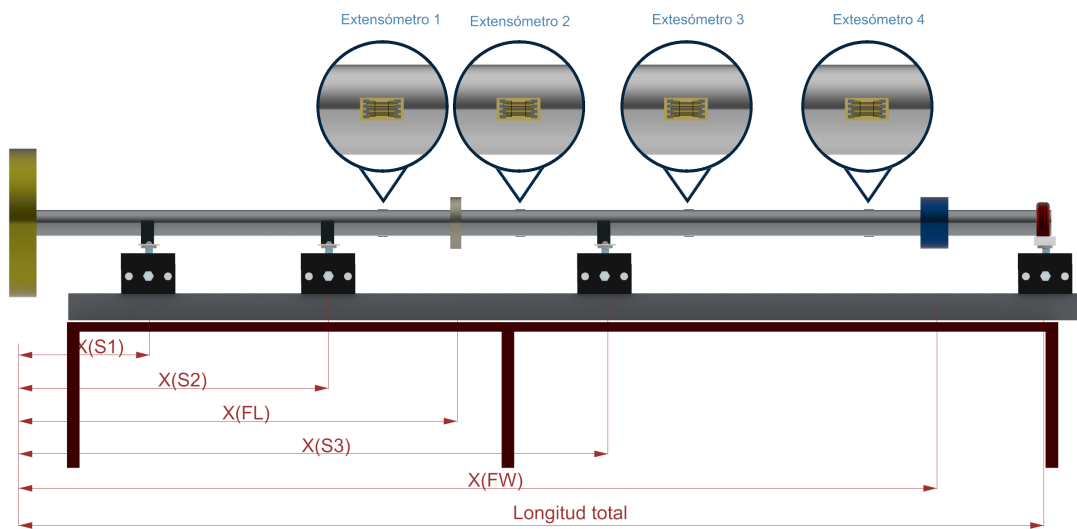


Figura C.2 Vista frontal del banco de pruebas

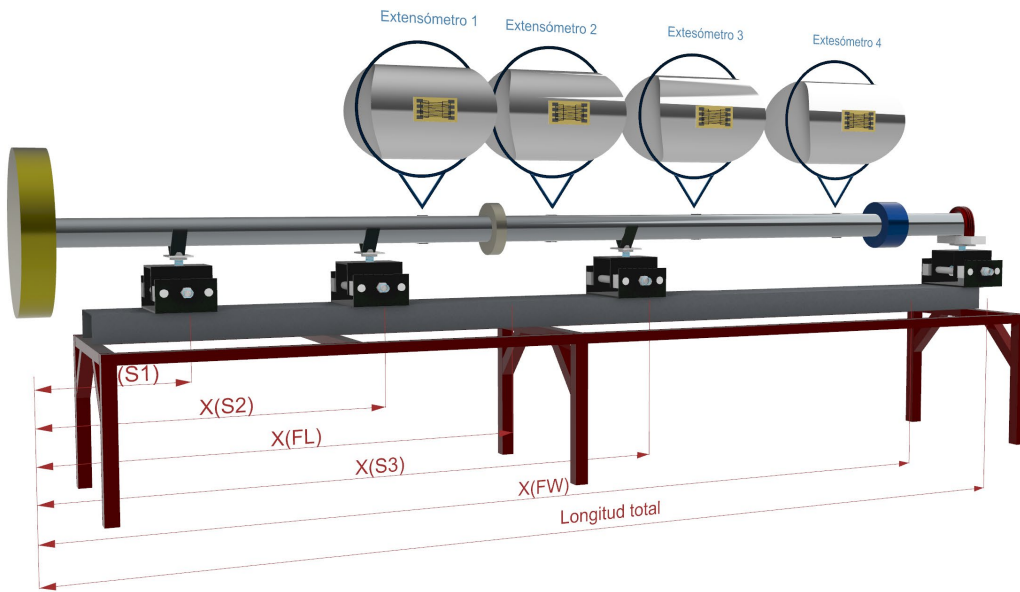
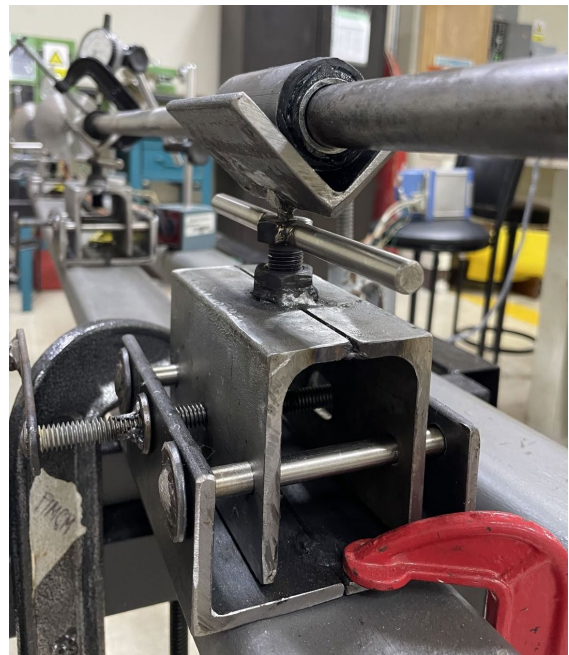


Figura C.3 Vista isométrica del banco de pruebas

APENDICE D

Construcción del banco de pruebas



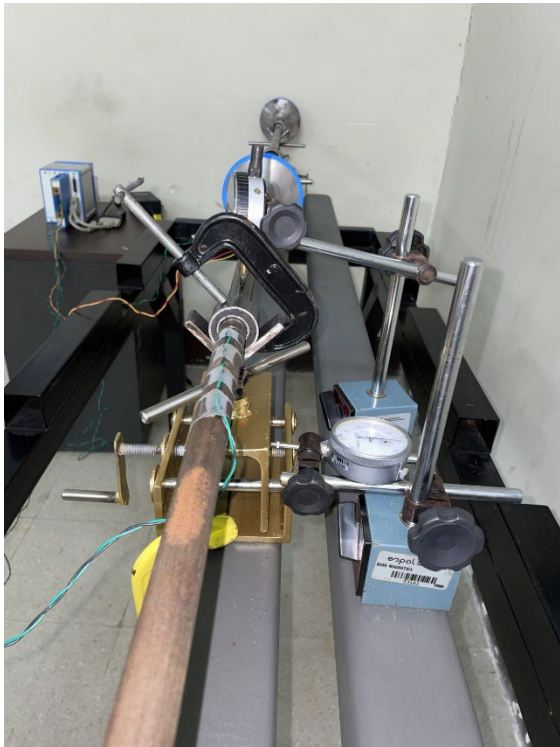


Figura D.1 Proceso de construcción del banco de pruebas

APENDICE E

Convergencia de resultados obtenidos de las pruebas experimentales de los extensómetros utilizados

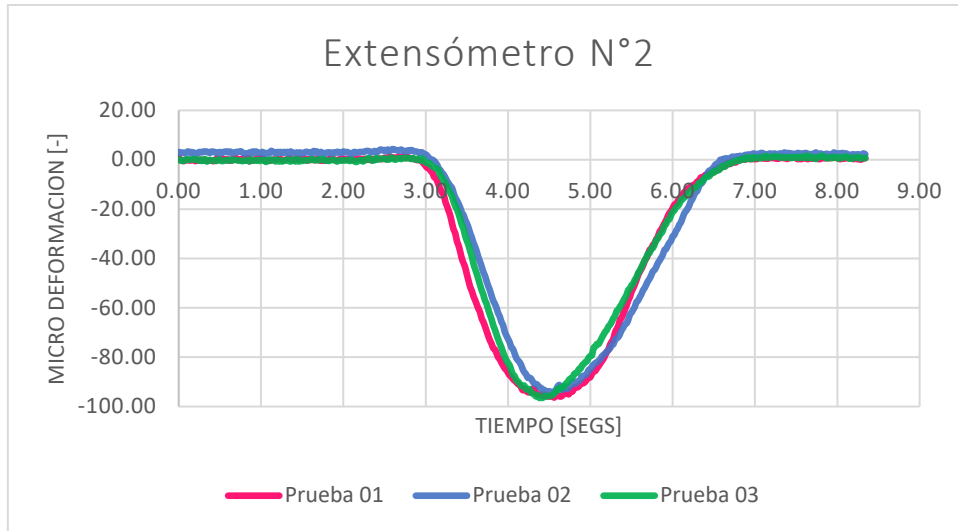


Figura E.1 Micro deformación vs Tiempo – Extensómetro 2 (Fuente propia)

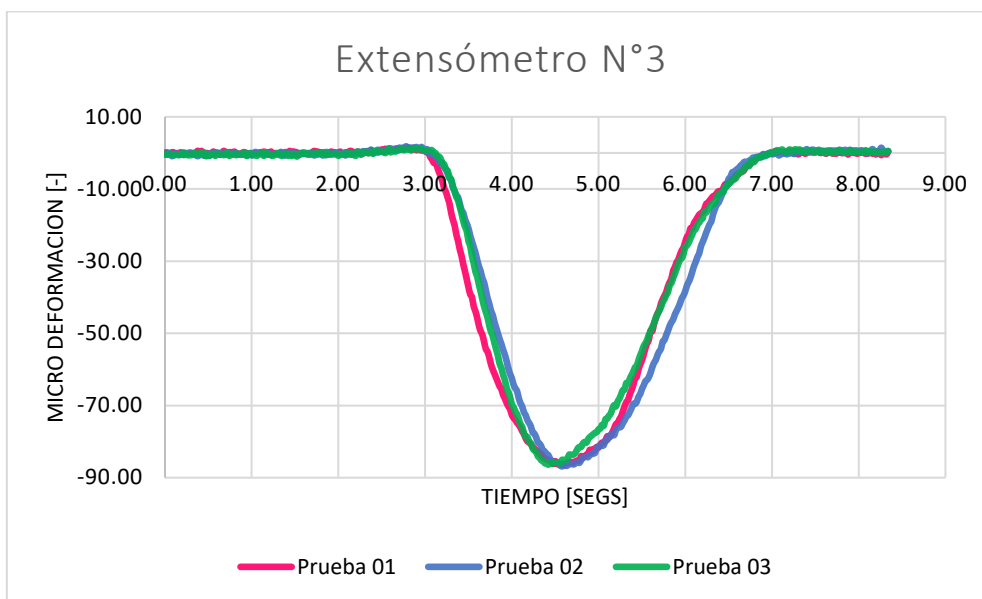


Figura E.2 Micro deformación vs Tiempo – Extensómetro 3 (Fuente propia)

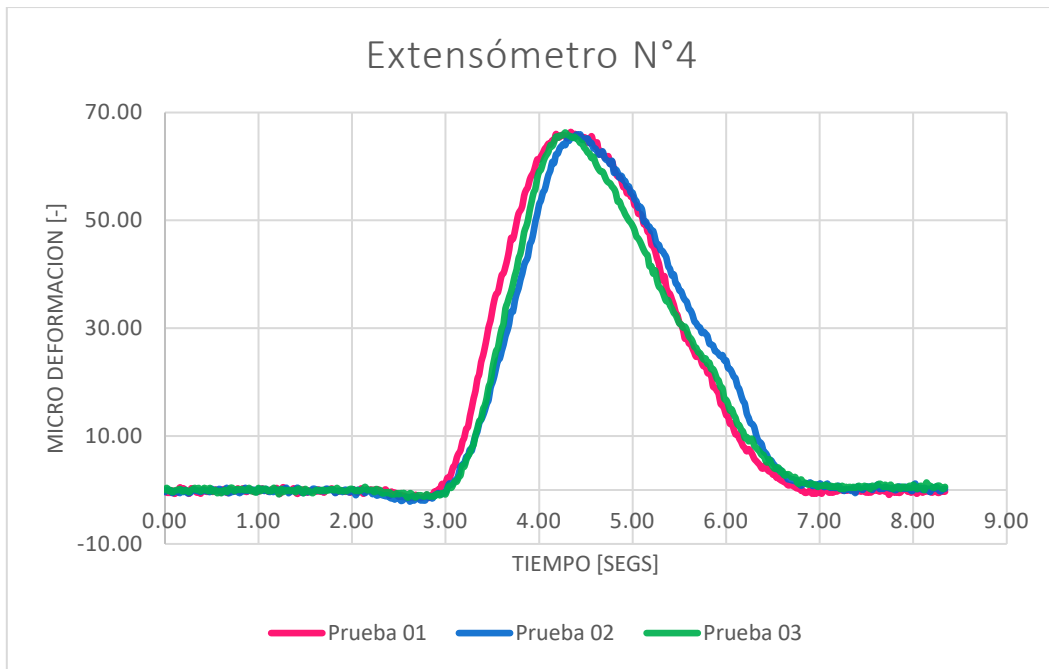


Figura E.3 Micro deformación vs Tiempo – Extensómetro 4 (Fuente propia)

APENDICE F

Resultado de las micro deformaciones obtenidas experimentalmente.

Tabla F.1 Micro deformación – Soporte N°3 – Desplazamiento vertical y lateral 0.2 mm

	Deformaciones unitarias Alineación N°5				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Extensómetro 1	-1.5E-04	-1.4E-04	-1.2E-04	-1.1E-04	με
Extensómetro 2	-7.1E-05	-8.4E-05	-9.6E-05	-1.1E-04	με
Extensómetro 3	-4.2E-05	-6.2E-05	-8.6E-05	-1.1E-04	με
Extensómetro 4	8.4E-05	7.7E-05	6.6E-05	5.5E-05	με

Tabla F.2 Micro deformación – Soporte N°3 – Desplazamiento vertical y lateral 0.4 mm

	Deformaciones unitarias Alineación N°7				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Extensómetro 1	-1.5E-04	-1.4E-04	-1.2E-04	-1.1E-04	με
Extensómetro 2	-6.9E-05	-8.4E-05	-9.7E-05	-1.1E-04	με
Extensómetro 3	-4.2E-05	-6.0E-05	-8.5E-05	-1.1E-04	με
Extensómetro 4	8.1E-05	7.6E-05	6.7E-05	5.8E-05	με

Tabla F.3 Micro deformación – Soporte N°2 – Desplazamiento vertical

	Deformaciones unitarias Alineación N°2				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Extensómetro 1	-1.5E-04	-1.9E-04	-2.2E-04	-2.4E-04	με
Extensómetro 2	-7.1E-05	-6.6E-05	-6.4E-05	-6.9E-05	με
Extensómetro 3	-4.2E-05	-2.3E-05	-4.7E-06	7.6E-07	με
Extensómetro 4	8.4E-05	9.1E-05	9.6E-05	9.9E-05	με

Tabla F.4 Micro deformación – Soporte N°2 – Desplazamiento vertical y lateral 0.2 mm

	Deformaciones unitarias Alineación N°3				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Extensómetro 1	-1.6E-04	-1.9E-04	-2.2E-04	-2.4E-04	με
Extensómetro 2	-6.6E-05	-6.2E-05	-6.3E-05	-7.0E-05	με
Extensómetro 3	-3.5E-05	-1.4E-05	-3.5E-06	2.7E-06	με

Extensómetro 4	8.3E-05	8.7E-05	9.3E-05	9.8E-05	με
-----------------------	---------	---------	---------	---------	----

Tabla F.5 Micro deformación – Soporte N°2 – Desplazamiento vertical y lateral 0.4 mm

	Deformaciones unitarias				
	Alineación N°4				
	Posición Inicial	0.3 [mm]	0.6 [mm]	0.9 [mm]	Unidades
Extensómetro 1	-1.5E-04	-1.9E-04	-2.1E-04	-2.4E-04	με
Extensómetro 2	-7.1E-05	-6.6E-05	-6.4E-05	-6.9E-05	με
Extensómetro 3	-3.9E-05	-2.1E-05	-5.1E-06	1.6E-06	με
Extensómetro 4	8.3E-05	9.3E-05	9.4E-05	9.9E-05	με

APENDICE G

Graficas de barras de reacciones de Excel

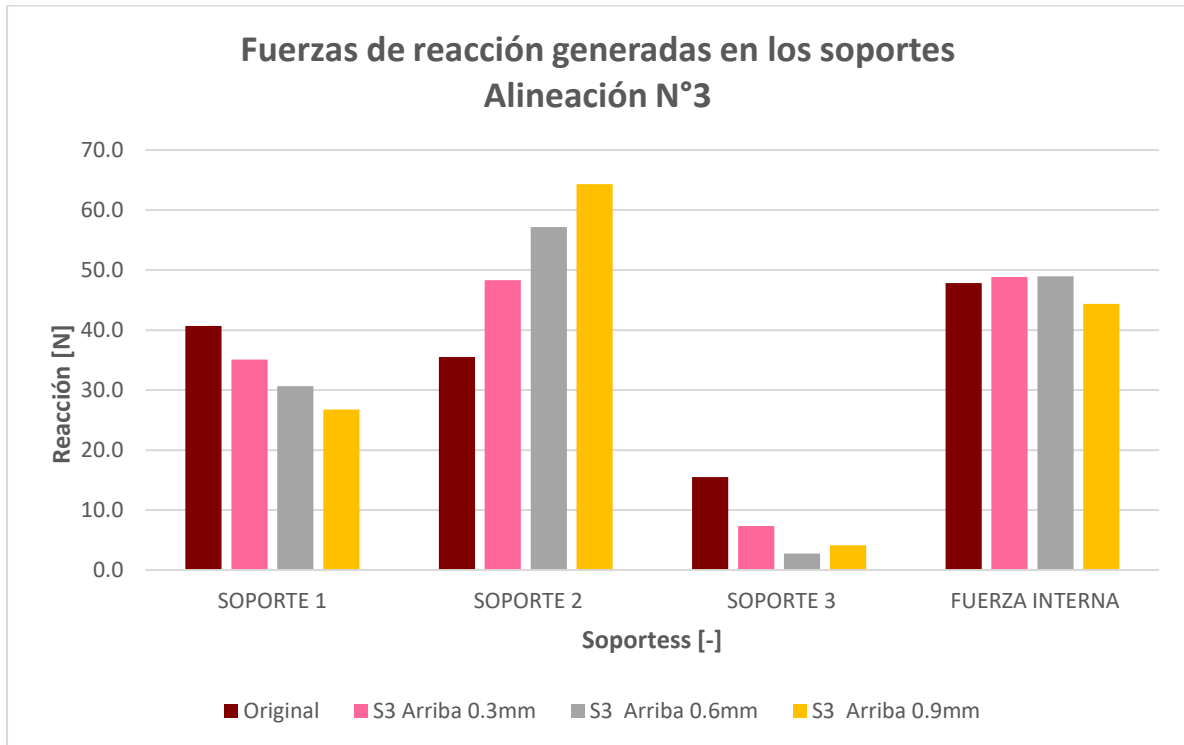


Figura G.1 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 2 – Alineación N°3

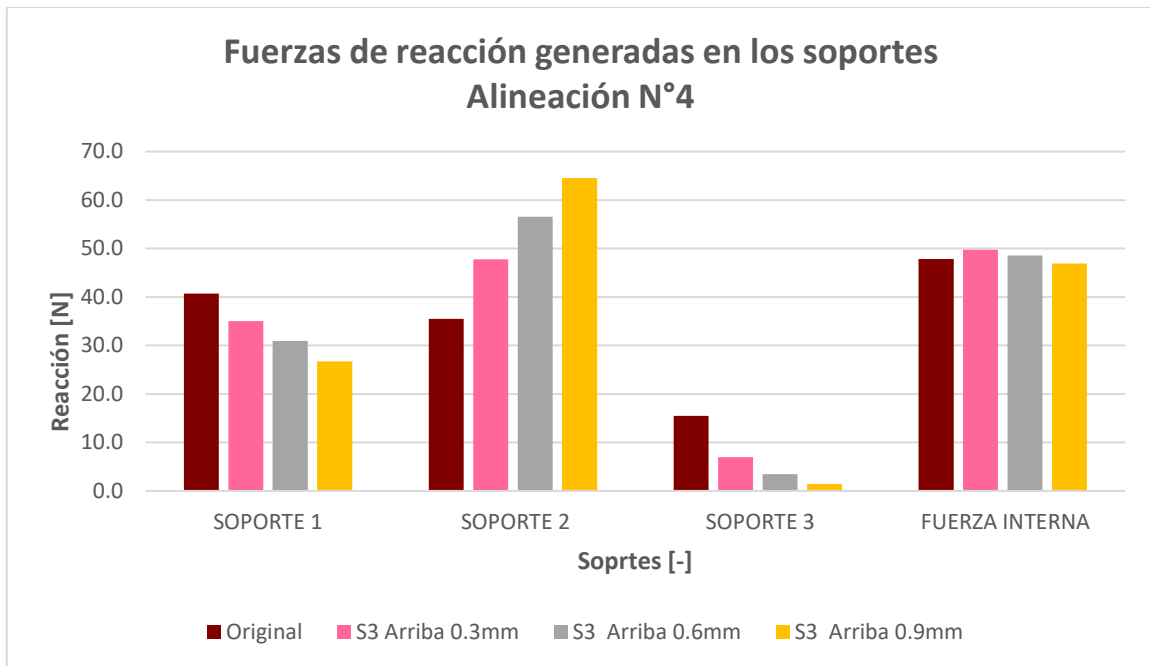


Figura G.2 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 2 – Alineación N°4

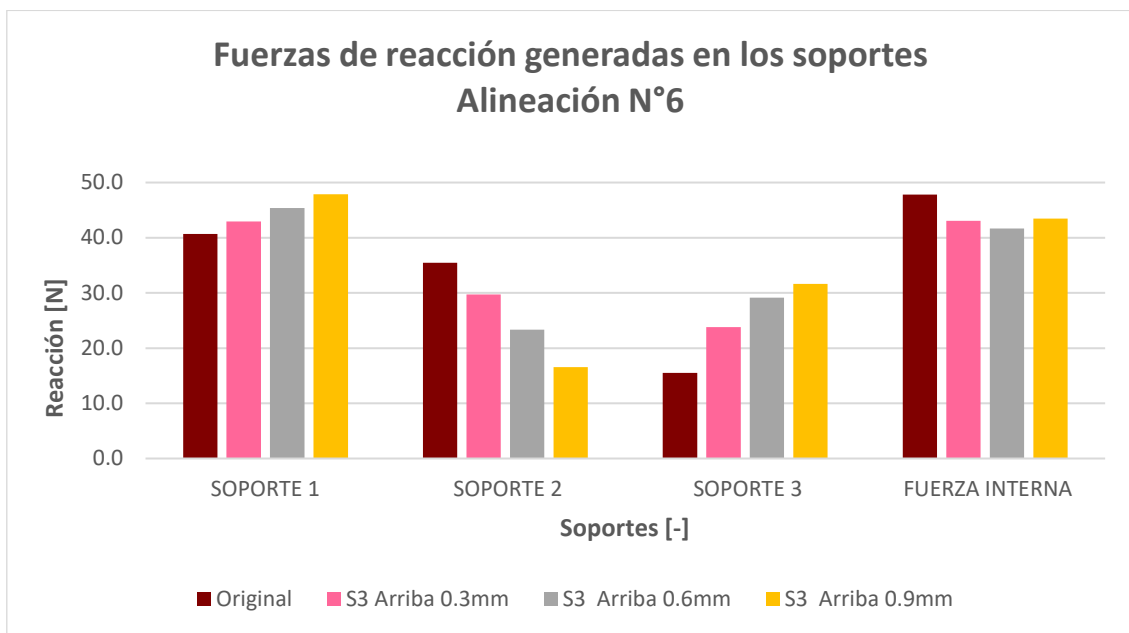


Figura G.3 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 3 – Alineación N°6

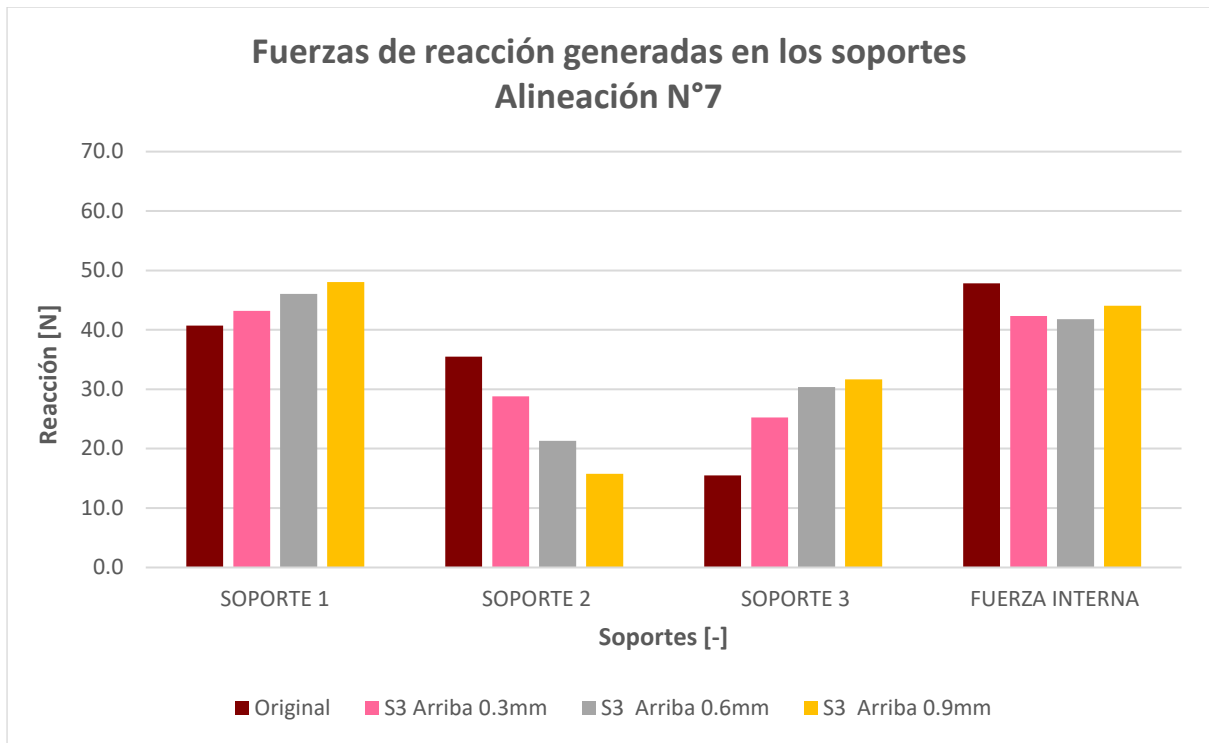


Figura G.4 Variación de las fuerzas de reacción generadas en los soportes por elevación del soporte 3 – Alineación N°7