

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

ANALISIS DE INCERTIDUMBRE EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA AL AVANCE DE UN CASCO WIGLEYEN EL CEHIDUNI

Mendoza Dávila, Jorge Alfredo

Mendoza_J_A_88@hotmail.com

Mestanza Rodriguez, David Alejandro

Alejandro_1609@hotmail.com

Asesor:

Dr. Víctor Eleno Obregón Pizarro

veop18@yahoo.com

Villagómez R. José Carlos

josevillagomezr@gmail.com

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Profesional de Ingeniería Naval, Av. Túpac Amaru 210-
Rimac/Lima, Telf.:481-1490, Telefax: 381-3847, E-mail: fim@uni.edu.pe

1. RESUMEN

En este trabajo se considera un Sistema de Calidad aplicado a un entorno específico, los Canales o Tanques de Ensayos Hidrodinámicos, en este caso es el CEHIDUNI, siguiendo las recomendaciones de la International Towing Tank Conference (ITTC), recogidas a su vez de la normativa internacional, y se centra en la evaluación de las incertidumbres en los resultados experimentales del Ensayo de Resistencia al Avance, y en la determinación de cuales variables son las que tienen mayor incidencia en dichos resultados.

2. INTRODUCCION

El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEHIDUNI) – Laboratorio Nacional de Hidráulica viene realizando ensayos de remolque a modelos de embarcaciones para calcular su resistencia al avance y así, poder proyectar el sistema de propulsión con las demandas de potencia y velocidades de diseño requeridas. La hidrodinámica experimental en el Perú ha dado ya pasos importantes con la consolidación del CEHIDUNI y cada vez más proyectistas navales nacionales ven con mayor confianza sus

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

procedimientos y resultados apostando por hacer sus ensayos en la UNI y no en laboratorios extranjeros como era hace unos años.

Dentro de los pasos para la consolidación en el desarrollo del CEHIDUNI es comenzar a estudiar el análisis de incertidumbre de los ensayos de resistencia al avance para en breve poder acreditar los ensayos experimentales, cuyos resultados serán utilizados en otros procesos certificados.

El presente trabajo sigue las directrices de la International Towing Tank Conference (ITTC), centrándose en el análisis de Incertidumbre de los resultados experimentales a los cuales se ha dado especial énfasis. Se muestra la susceptibilidad de las incertidumbres a los sistemas de operación; además las variables que tienen mayor influencia sobre los valores finales, cuantificando su incidencia sobre el valor final.

3. METODOS

3.1. DEFINICIONES

3.1.1 Mensurando: es el atributo sujeto a medición de un determinado fenómeno físico que se puede identificar y valorar. La identificación clara del mensurando y su descripción detallada desde el punto de vista de las variables que intervienen en su definición es uno de los principales puntos en cuestión. Una mala o deficiente definición puede llevar a hacer fracasar el procedimiento de medida.

3.1.2 Error: es la discrepancia entre una medida y el valor real del mensurando. Se asignan dos componentes a esta magnitud, una componente de naturaleza aleatoria que se denomina “error de precisión” asumiendo que existen variaciones impredecibles que afectan la medida, y otra que refleja otros aspectos de la medida que producen un sesgo y que normalmente se asocian a efectos no aleatorios, indicado como “error sistemático”.

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

3.1.3 Incertidumbre: duda, fluctuación, irresolución, inseguridad; en el caso de las medidas es aplicado en el sentido de la duda o falta de seguridad en la exactitud del resultado de la medición. Es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos al mensurando, refleja la falta de conocimiento exacto sobre el valor del mensurando.

3.1.4 Propagación de errores: muchas veces no se mide directamente la magnitud deseada sino otras variables que relacionadas entre sí a través de una ecuación de reducción terminan definiendo el valor buscado. La forma en que dichas incertidumbres afectan la medida final, se denomina propagación de errores, correspondiendo evaluar cada una de sus componentes.

3.2. TIPO DE ERRORES

3.2.1 Error sistemático: es la componente del error total debida a desviaciones o sesgos en el procedimiento de medida, como por ejemplo un corrimiento de la escala, influencia de unas magnitudes sobre otras, etc. Existen tres categorías de errores sistemáticos:

- Errores asociados a la calibración del instrumento o sistema de medida.
- Errores asociados a la adquisición de datos
- Errores asociados a la reducción de datos

3.2.1.1 Estimación del error sistemático: el valor total de la estimación del error sistemático se calcula utilizando la suma cuadrática denominada RSS (rootsumsquare). Por ejemplo, para la variable X_i existen J fuentes elementales de errores sistemáticos identificados por sus estimadores como $(B_i)_1, (B_i)_2, \dots, (B_i)_j$, con lo cual el error sistemático en la variable X_i puede calcularse como:

$$B_i = \sqrt{\sum_{k=1}^j (B_i)_k^2} \quad (1.1)$$

Donde: B_i es la estimación del error sistemático asociado a la variable X_i ; $B_{i,k}$ son las estimaciones de los errores sistemáticos que aportan al error sistemático total; los valores $(B_i)_k$ deben ser estimados para cada variable X_i utilizando la información disponible en el momento.

3.2.1.2 Propagación de Errores Sistemáticos: la expresión general de la estimación de incertidumbre debido a la propagación de errores sistemáticos de las variables X_i en la medida experimental de la magnitud r definida como $r = r(X_1, X_2, \dots, X_k)$ está dada por la expresión

$$B_r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} \cdot B_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} \cdot B_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_k} \cdot B_k \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^k (\theta_i \cdot B_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

Donde: B_r es el error sistemático correspondiente a una magnitud experimental r , $\theta_i = \partial r / \partial X_i$ es denominado coeficiente de sensibilidad, describe qué tan sensible es el mensurando con respecto a las variaciones de la magnitud de entrada correspondiente.

3.2.1.3 Constantes o propiedades de materiales: los errores sistemáticos asociados a constantes se considerarán nulos puesto que dichos datos no generan incertidumbres. En el caso de propiedades de materiales que aparecen en las ecuaciones de reducción del fenómeno, cuando estas vienen dadas en tablas o curvas en función de alguna variable de definición, se asumirá como error sistemático en este caso el propio error en la generación de dichos datos. En caso de no acceder a esta información, se deberá asumir algún criterio, como por ejemplo considerar la última cifra significativa indicada en los valores de la tabla.

3.2.1.4 Ecuaciones de calibración: la ecuación de calibración es una ecuación que relaciona una medida o valor de salida con la medida de una magnitud o valor de entrada:

$$X_k = f(y_1, y_2, \dots, y_N)$$

Esta ecuación debe ser tratada como una ecuación de reducción, por lo cual su tratamiento será similar al dado en la ecuación (1.2):

$$B_i = \left[\left(\frac{\partial X_k}{\partial Y_1} \cdot B_{X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial X_k}{\partial Y_2} \cdot B_{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial X_k}{\partial Y_N} \cdot B_{X_N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

3.2.2 Errores de precisión: los errores de precisión tienen su origen en una infinidad de circunstancias que provocan respuestas diferentes ante una misma medida; las causas siempre están presentes y no pueden ser soslayadas completamente. Incluyen al operador y su respuesta frente a cada medida, los instrumentos, las variaciones inherentes al suministro de energía, las

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

condiciones ambientales que pueden producir variaciones en la respuesta de los instrumentos, etc.

3.2.2.1 Estimación de errores de precisión: se puede estimar el error de precisión en la medida r como:

$$P_r = t \cdot S_r \quad (2.1)$$

Donde: t es el límite de la variable normalizada para el intervalo de confianza establecido, conocido como factor de cobertura; para $N > 10$ se asume un valor $t = 2$ y S_r es la desviación estándar de la muestra de N lecturas.

3.2.2.2 Propagación de errores de precisión: se ha establecido con anterioridad que las fuentes de errores de precisión son difíciles de identificar y se refieren a distintos aspectos de la más diversa naturaleza; sin embargo se puede establecer que dichos errores tienen una distribución absolutamente aleatoria y gaussiana.

Suponiendo que se han identificado M fuentes de errores de precisión para la variable j ; la expresión general de la estimación de incertidumbre debido a la propagación de errores de precisión está dada por la siguiente expresión:

$$P_j = [(P_j)_k^2 + (P_j)_k^2 + \dots + (P_j)_M^2]^{1/2} = \left[\sum_{k=1}^M (P_j)_k^2 \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

En los experimentos cuyos resultados se obtienen de un único ensayo, el límite de precisión de cada variable X_i debe determinarse. Para ello se tomarán en cuenta varios caminos: medidas repetidas, ensayos auxiliares, experiencia previa, estimación a partir de los datos de la escala, etc. Cuando se realizan múltiples muestreos, se pueden determinar valores promediados de los M juegos de medidas $(X_1, X_2, \dots, X_j)_k$ en las mismas condiciones de experimentación, de donde se deduce:

$$\bar{r} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=1}^M r_k \quad (2.3)$$

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

El límite del error de precisión del conjunto de muestras se transforma en:

$$P_{\bar{r}} = \frac{t \cdot S_{\bar{r}}}{\sqrt{M}} \quad (2.4)$$

Siendo S_r la desviación estándar de la muestra;

$$S_{\bar{r}} = \left[\frac{1}{M-1} \cdot \sum_{K=1}^M (r_k - \bar{r})^2 \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

3.3.CEHIDUNI: INCERTIDUMBRES DE MEDIDAS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot S_M \cdot V_M^2} \quad (3.1)$$

Donde: R_{TM} es la resistencia medida, ρ_M es la densidad del agua durante el ensayo, S_M es la superficie mojada del modelo y V_M la velocidad medida, corregida por bloqueo si corresponde.

La resistencia total puede ser considerada como la suma de dos componentes de distinta naturaleza:

- 1) **resistencia residual** asociada a los fenómenos de generación de olas, dependiente del número de Froude, cuyo cálculo se realiza utilizando la expresión:

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \cdot (1 + k) \quad (3.2)$$

Donde: C_{TM} es el coeficiente de resistencia del modelo, C_F es el coeficiente de resistencia friccional dado por la Línea de Correlación modelo – buque adoptada por la ITTC en 1957, k es el factor de forma deducido por el método de Prohaska

- 2) **resistencia viscosa**, derivada de los esfuerzos cortantes que genera el fluido en las regiones adyacentes con el casco, y cuya expresión actual es presentada por la ITTC:

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (3.3)$$

Siendo: $Re = (V_M \cdot L_M) / \nu_M$ el Número de Reynolds para las condiciones del ensayo, donde V_M es la velocidad del modelo, L_M es la eslora del modelo y ν_M es la viscosidad del agua.

Los ensayos se diseñan para una **velocidad nominal** V_{nom} , pero esta velocidad difícilmente conseguida en forma exacta en los ensayos, esperándose encontrar valores muy cercanos en una distribución normal que dependerá de la calidad del equipo, de la calibración del mismo y de la pericia del operador. Dado que en este ejercicio se debe comparar resultados para la velocidad nominal preestablecida, se deberá corregir la velocidad real V_M teniendo en cuenta que para pequeñas variaciones de la misma se puede considerar que la resistencia es proporcional al cuadrado de la razón entre velocidades (ITTC, 2002)

$$C_{TM}^{V_{nom}} = C_{TM} \cdot \left(\frac{V_{nom}}{V_M} \right)^2 \quad (3.4)$$

La ITTC establece además la necesidad de utilizar una **temperatura normalizada** para la presentación de resultados debido a la gran dependencia de la resistencia con la viscosidad (ITTC, 2002, 2005). En el caso de ensayos realizados para terceros, es recomendado normalizar a la temperatura media del conjunto, mientras que en ejercicios de comparación como el propuesto se corregirá a una temperatura normalizada de 15°.

$$C_{TM}^{15^\circ} = C_{RM} + C_{FM}^{15^\circ} \cdot (1 + k) \quad (3.5)$$

Donde: C_{RM} es la resistencia residual y $C_{TM}^{15^\circ}$, $C_{FM}^{15^\circ}$ son los coeficientes corregidos para la temperatura normalizada.

La resistencia friccional es dependiente de la temperatura, no así la componente de resistencia por formación de olas, que se calcula utilizando los datos como surgen de los ensayos corregidos para la velocidad nominal. La ecuación (3.5) se puede expresar de la siguiente manera teniendo en cuenta (3.2).

$$C_{TM}^{15^\circ} = C_{TM} + (C_{FM}^{15^\circ} - C_{FM}) \cdot (1 + k) \quad (3.6)$$

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

Donde: $C_{TM}^{15^\circ}$ es el coeficiente de resistencia total normalizado, $CF_M^{15^\circ}$ es el coeficiente de fricción dado por línea de correlación modelo – buque ITTC (1957) normalizado y k es el factor de forma deducido por el método de Prohaska (ITTC, 1978).

3.4. Determinación experimental de coeficientes en ejercicio de intercomparación ITTC

En las Tablas 1 a Tabla 3 se presentan los resultados experimentales obtenidos con el casco tipo WIGLEY en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEHIDUNI) – Laboratorio Nacional de Hidráulica, participante del ejercicio de intercomparación propuesto por la ITTC.

Tabla1. Datos del Ensayo de Resistencia para Fr 0.10

Rx (gr)	V M(m/s)	T (°C)	CTM	Densidad [kg-s ² / m ⁴ .]	Viscosidad [m ² /s.]
1.543E-02	0.382	17.6	6.208E-03	101.828	1.115E-06
1.541E-02	0.382	17.6	6.185E-03	101.828	1.115E-06
1.480E-02	0.382	17.6	5.951E-03	101.828	1.115E-06
1.472E-02	0.380	17.6	5.968E-03	101.828	1.115E-06
1.685E-02	0.385	17.6	6.677E-03	101.828	1.115E-06
1.608E-02	0.381	17.6	6.508E-03	101.828	1.115E-06
1.634E-02	0.384	17.6	6.506E-03	101.828	1.115E-06
1.576E-02	0.383	17.6	6.300E-03	101.828	1.115E-06
1.398E-02	0.378	17.6	5.734E-03	101.828	1.115E-06
1.619E-02	0.384	17.5	6.457E-03	101.830	1.118E-06
1.628E-02	0.387	17.5	6.371E-03	101.830	1.118E-06
1.551E-02	0.384	17.5	6.168E-03	101.830	1.118E-06
1.380E-02	0.387	17.5	5.414E-03	101.830	1.118E-06
1.696E-02	0.386	17.5	6.673E-03	101.830	1.118E-06
1.383E-02	0.383	17.5	5.525E-03	101.830	1.118E-06

CTMnom	RnM15°	CF15°	Rn	CFnom	CT15°
6.262E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.350E-03
6.223E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.311E-03
6.000E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.088E-03
6.067E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.156E-03
6.631E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.720E-03
6.602E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.691E-03
6.494E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.583E-03
6.314E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	6.403E-03
5.896E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.161E+05	5.441E-03	5.984E-03
6.453E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.148E+05	5.444E-03	6.539E-03

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

6.251E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.148E+05	5.444E-03	6.336E-03
6.150E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.148E+05	5.444E-03	6.235E-03
5.324E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.148E+05	5.444E-03	5.409E-03
6.582E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.148E+05	5.444E-03	6.668E-03
5.535E-03	4.842E+05	5.523E-03	5.148E+05	5.444E-03	5.620E-03
PROMEDIO					6.273E-03

Tabla2. Datos del Ensayo de Resistencia para Fr 0.28

Rx (gr)	V (m/s)	T (°C)	CTM	Densidad [kg·s ² / m ⁴ .]	Viscosidad [m ² /s.]
1.108E-01	1.084	17.6	5.539E-03	101.828	1.115E-06
1.130E-01	1.092	17.6	5.568E-03	101.828	1.115E-06
1.088E-01	1.076	17.6	5.516E-03	101.828	1.115E-06
1.124E-01	1.089	17.6	5.569E-03	101.828	1.115E-06
1.098E-01	1.075	17.6	5.571E-03	101.828	1.115E-06
1.082E-01	1.070	17.6	5.550E-03	101.828	1.115E-06
1.129E-01	1.084	17.6	5.640E-03	101.828	1.115E-06
1.148E-01	1.081	17.6	5.768E-03	101.828	1.115E-06
1.136E-01	1.080	17.6	5.724E-03	101.828	1.115E-06
1.130E-01	1.071	17.5	5.783E-03	101.830	1.118E-06
1.172E-01	1.084	17.5	5.857E-03	101.830	1.118E-06
1.136E-01	1.076	17.5	5.763E-03	101.830	1.118E-06
1.091E-01	1.070	17.5	5.592E-03	101.830	1.118E-06
1.116E-01	1.075	17.5	5.668E-03	101.830	1.118E-06
1.116E-01	1.072	17.5	5.697E-03	101.830	1.118E-06

CTMnom	RnM15°	CF15°	Rn	CFnom	CT15°
5.441E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.504E-03
5.391E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.454E-03
5.498E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.561E-03
5.421E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.484E-03
5.556E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.619E-03
5.593E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.656E-03
5.536E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.599E-03
5.695E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.758E-03
5.666E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.445E+06	4.334E-03	5.729E-03
5.820E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.441E+06	4.336E-03	5.880E-03
5.754E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.441E+06	4.336E-03	5.815E-03
5.747E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.441E+06	4.336E-03	5.808E-03
5.631E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.441E+06	4.336E-03	5.692E-03
5.658E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.441E+06	4.336E-03	5.719E-03
5.715E-03	1.356E+06	4.392E-03	1.441E+06	4.336E-03	5.775E-03

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

PROMEDIO 5.670E-03

Tabla3. Datos del Ensayo de Resistencia para Fr 0.41

Rx (gr)	V (m/s)	T (°C)	CTM	Densidad [kg·s ² / m ⁴ .]	Viscosidad [m ² /s.]
3.167E-01	1.578	17.6	7.466E-03	101.828	1.115E-06
3.151E-01	1.578	17.6	7.424E-03	101.828	1.115E-06
3.366E-01	1.606	17.6	7.665E-03	101.828	1.115E-06
3.142E-01	1.575	17.6	7.431E-03	101.828	1.115E-06
3.190E-01	1.589	17.6	7.416E-03	101.828	1.115E-06
3.253E-01	1.595	17.6	7.505E-03	101.828	1.115E-06
3.313E-01	1.601	17.6	7.584E-03	101.828	1.115E-06
3.225E-01	1.585	17.6	7.535E-03	101.828	1.115E-06
3.178E-01	1.580	17.6	7.473E-03	101.828	1.115E-06
3.139E-01	1.573	17.5	7.450E-03	101.830	1.118E-06
3.202E-01	1.580	17.5	7.526E-03	101.830	1.118E-06
3.169E-01	1.584	17.6	7.412E-03	101.830	1.118E-06
3.253E-01	1.590	17.5	7.550E-03	101.830	1.118E-06
3.249E-01	1.591	17.5	7.532E-03	101.830	1.118E-06
3.255E-01	1.586	17.5	7.598E-03	101.830	1.118E-06

CTMnom	RnM15°	CF15°	Rn	CFnom	CT15°
7.415E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.471E-03
7.368E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.424E-03
7.351E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.407E-03
7.404E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.460E-03
7.263E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.319E-03
7.295E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.351E-03
7.315E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.371E-03
7.415E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.471E-03
7.402E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.116E+06	4.009E-03	7.458E-03
7.449E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.110E+06	4.011E-03	7.502E-03
7.453E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.110E+06	4.011E-03	7.507E-03
7.302E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.110E+06	4.011E-03	7.356E-03
7.383E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.110E+06	4.011E-03	7.437E-03
7.356E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.110E+06	4.011E-03	7.410E-03
7.473E-03	1.985E+06	4.060E-03	2.110E+06	4.011E-03	7.527E-03
				PROMEDIO	7.431E-03

4. ANÁLISIS DE ERRORES SISTEMÁTICOS

Se analizará a continuación la cadena de errores sistemáticos que inciden en la incertidumbre en el cálculo del coeficiente de resistencia total normalizado: $C_{TM}^{15^\circ}$. Para eso se debe examinar detenidamente cada una de las variables que intervienen en el cálculo, y definir para cada una de dichas variables los errores sistemáticos correspondientes.

Se tiene la relación funcional:

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot S_M \cdot V_M^2} = f(R_{TM}, \rho_M, S_M, V_M) \quad (4.1)$$

Al corregir este valor para una temperatura normalizada nos lleva a

$$C_{TM}^{15^\circ} = C_{TM} + (C_{FM}^{15^\circ} - C_{FM}) \cdot (1 + k) = f'(C_T, C_F, C_F^{15^\circ}, k) \quad (4.2)$$

Y para hallar C_F se necesita:

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} = f''(Re) = f''(V, L, \nu) \quad (4.3)$$

En resumen, se deberá establecer el límite de los errores sistemáticos para el siguiente conjunto de variables: Eslora (LM), Densidad (ρ), Superficie mojada (SM), Viscosidad (ν), Velocidad (VM), Coeficiente de Resistencia Viscosa (CF), Resistencia (RX), Coeficiente de Resistencia Total (CT), Temperatura (T), Factor de Forma (1+k).

4.1. Errores sistemáticos en las variables definidas

- **Eslora:** error en la adquisición de datos

En la confección del modelo se comete un error de ± 1 mm a lo largo del modelo

Por lo que el error sistemático total será $B_{L1} = 2.000E-03m$.

- **Superficie mojada**

$B_{SM} = 6.254E-03$ (Ver anexo 3)

- **Velocidad** (ver anexo 4)

Tabla4. Error sistemático de la velocidad para cada F_n .

F_n	B_v (m/s)
0.1	3.849E-03
0.28	3.862E-03
0.41	3.881E-03

- **Resistencia al avance**

$BR = 4.46E-02$

Se mide mediante una celda de carga que está conectada a través de un nylon directamente al modelo.

Calibración: (ver anexo 5)

$B_{R1} = 4.460E-02$

Adquisición de datos:

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

Se debe a varias fuentes entre estas tenemos la desalineación de la celda de carga, la conversión analógica-digital y el trimado del modelo. Para el análisis se consideró los dos primeros puesto que no se registró el trimado.

- Desalineación de la celda de carga.- Se consideró una desviación de $\pm 0.25^\circ$ para cada Froude y reemplazando en la siguiente ecuación se tiene:

$$B_{R\theta} = R - R\cos\theta = R(1 - \cos\theta) \quad (4.4)$$

Tabla5. Error sistemático de la resistencia por la desviación de la celda de carga.

Fn	B_{Rθ} (N)
0.1	1.44E-06
0.28	1.05E-05
0.41	3.00E-05

- Conversión Analógica-Digital

$$B_{RAD} = \frac{\partial R_X}{\partial V} \cdot B_{AD} = \frac{\partial R_X}{\partial V} \cdot \frac{B_{bit} \cdot V}{2^{N_b}} \quad (4.5)$$

Dónde:

$\frac{\partial R_X}{\partial V}$: Coeficiente de sensibilidad respecto al voltaje

B_{bit}: resolución del equipo adquisidor (32 bits)

V: voltaje máximo del instrumento (10v)

N_b: número de bits utilizados por el convertidor análogo digital (32 bits)

Reemplazando se tiene que B_{RAD}= 7.309E-04

Ecuación de Reducción:

No corresponde

➤ Temperatura

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

$$B_T = 4.000E-01^\circ$$

La temperatura t se registró con un termómetro digital calibrado, el cual tiene una precisión de $\pm 0.4^\circ$ siendo su resolución de 0.1° y su rango de medidas está entre -50° y 150° .

Calibración:

Este error viene dado por el fabricante y está reflejado en su precisión ($\pm 0.4^\circ$). Entonces su valor es de: $B_t = 4.000E-01^\circ$

Adquisición de datos:

No corresponde

Ecuación de Reducción:

No corresponde

➤ **Densidad**

$$B_\rho = 7.816E-02 \text{ Kg/m}^3$$

La densidad del agua se calcula de acuerdo a las tablas que la ITTC sugiere en los procedimientos, cuyos valores pueden representarse mediante la ecuación:

$$\rho = 1000.1 + 0.0552 \cdot t - 0.0077 \cdot t^2 + 0.00004 \cdot t^3 \quad (4.6)$$

Dónde: t es la temperatura medida en el canal en $^\circ\text{C}$

Calibración:

Este error se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$B_{\rho 1} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial t} \right|_{15^\circ} \cdot B_t \quad (4.7)$$

Obteniendo $B_{\rho 1} = 5.952E-02 \text{ Kg/m}^3$ para la temperatura de normalización: $t = 15^\circ\text{C}$.

Adquisición de datos:

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

No corresponde

Ecuación de Reducción (SEE):

De la tabla obtenemos $B_{\rho 2} = 5.066E-02 \text{ Kg/m}^3$

➤ **Viscosidad**

$B_{\eta 1} = 2.001E-0.8 \text{ m}^2/\text{s}$.

La viscosidad se calcula en forma análoga a la densidad mediante la siguiente ecuación:

$$v = (6.83E - 04 \cdot t^2 + 5.228E - 02 \cdot t + 1.768) \cdot 10^{-6} \quad (4.8)$$

Dónde : t es la temperatura medida en el canal en °C

Calibración:

$$B_{v1} = \left. \frac{\partial v}{\partial t} \right|_{15^\circ} \cdot B_t \quad (4.9)$$

Obteniendo $B_{\eta 1} = 1.271E-0.8 \text{ m}^2/\text{s}$.

Adquisición de datos:

No corresponde

Ecuación de Reducción (SEE):

De la tabla obtenemos $B_{\eta 2} = 1.545-0.8 \text{ m}^2/\text{s}$.

➤ **Coefficiente de resistencia friccional**

Tabla6. Error sistemático del coeficiente friccional.

Fn	Bcf
0.1	3.548E-06
0.28	3.5597E-06
0.41	3.5769E-06

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} = f''(Re) = f''(V, L, \nu) \quad (4.10)$$

Calibración:

No corresponde

Adquisición de datos:

No corresponde

Ecuación de Reducción:

$$B_{C_F} = \left[\left(\frac{\partial C_F}{\partial V} \cdot B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial L} \cdot B_L \right)^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial \nu} \cdot B_\nu \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

➤ Coeficiente de resistencia total

Tabla7. Error sistemático del coeficiente total.

Fn	BCTM
0.10	2.00E-03
0.28	5.00E-04
0.41	4.30E-04

Se calcula mediante la siguiente ecuación (4.1):

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot S_M \cdot V_M^2} = f(R_X, \rho_M, S_M, V_M)$$

Calibración:

No corresponde

Adquisición de datos:

No corresponde

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

Ecuación de Reducción:

$$B_{C_{TM}} = \left[\left(\frac{\partial C_{TM}}{\partial R_X} \cdot B_{R_X} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TM}}{\partial \rho_M} \cdot B_{\rho_M} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TM}}{\partial S_M} \cdot B_{S_M} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TM}}{\partial V_M} \cdot B_{V_M} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.12)$$

➤ **Coefficiente de factor de forma** (Anexo 1)

Tabla8. Error sistemático del factor de forma.

Fn	B(1+k)
0.1	3.68E-01
0.28	1.20E-01
0.41	1.54E-01

➤ **Coefficiente de Resistencia total normalizado**

Tabla9. Error sistemático del coeficiente de resistencia total normalizado

Fn	BCT15
0.1	2.00E-03
0.28	5.00E-04
0.41	4.30E-04

Se calcula mediante la siguiente ecuación de reducción (3.5):

$$C_{TM}^{15^\circ} = C_{TM} + (C_{FM}^{15^\circ} - C_{FM}) \cdot (1 + k)$$

Calibración:

No corresponde

Adquisición de datos:

No corresponde

Ecuación de Reducción:

$$B_{C_{TM}^{15^\circ}} = \left[\left(\frac{\partial C_{TM}^{15^\circ}}{\partial C_{TM}} \cdot B_{C_{TM}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TM}^{15^\circ}}{\partial C_{FM}^{15^\circ}} \cdot B_{C_{FM}^{15^\circ}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TM}^{15^\circ}}{\partial C_{FM}} \cdot B_{C_{FM}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TM}^{15^\circ}}{\partial (1+k)} \cdot B_{(1+k)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

5. ANÁLISIS DE ERRORES DE PRECISION

Tabla10. Errores de precisión.

Numero de Froude	PCT15°
0.10	1.966E-04
0.28	6.726E-05
0.41	3.207E-05

6. INCERTIDUMBRES EN CT15°

La incertidumbre asociada al coeficiente de resistencia total normalizado estará dada, de acuerdo al procedimiento seguido para los restantes cálculos, utilizando la media cuadrática (root sum square) aplicada a las cantidades intervinientes en el fenómeno, la estimación del error sistemático, BCT15°, y la estimación del error de precisión, PCT 15°.

Fr = 0.10	
CTM15° Promedio	6.270E-03
Límite de error sistemático (BCTM15°)	2.000E-03
Límite de error de precisión (PCTM 15°)	1.970E-04
Incertidumbre (UCTM 15°)	2.009E-03
% CTM15°	32.052

Fr = 0.28	
CTM15° Promedio	5.670E-03
Límite de error sistemático (BCTM15°)	5.000E-04
Límite de error de precisión (PCTM 15°)	6.730E-05
Incertidumbre (UCTM 15°)	5.045E-04
% CTM15°	6.790

Fr = 0.41	
CTM15° Promedio	7.430E-03

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

Límite de error sistemático (BCTM15°)	4.300E-04
Límite de error de precisión (PCTM 15°)	3.210E-05
Incertidumbre (UCTM 15°)	4.312E-04
% CTM15°	5.803

7. CONCLUSIONES

- El trabajo muestra el análisis de incertidumbre del CEHIDUNI, lo cual es importante, ya que todo laboratorio debe conocer la exactitud con que obtienen sus datos, para brindar un servicio más tecnificado a nivel investigativo y empresarial y obtener datos con mayor grado de fiabilidad.
- A través del presente trabajo se busca obtener la acreditación de la ITTC para nuestros ensayos de resistencia al avance que se vienen realizando en el Laboratorio Nacional de Hidráulica; convirtiendo al CEHIDUNI en una entidad más competitiva a nivel internacional.
- De acuerdo al análisis realizado se debe tener mayor consideración al momento de adquirir el valor de la resistencia, ya que de este se desprende el mayor porcentaje (%) de error.

8. REFERENCIAS

- [1] Marcelo Elias Elias, José C. Villagómez Rosales, Guillermo Vásquez Chillce. Paper. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL CANAL DE ENSAYOS
- [2] Jorge Freira, Acreditación de Canales Hidrodinámicos de Uso en Modelación Naval. Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay. Ingeniero Naval.
- [3] Jorge Freira Pereira. Estimación de Incertidumbres en Canales de Prueba Navales.

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales – Departamento de Sistemas Oceánicos y Navales.

[4] Villagómez, Hernández, Martínez, Huayhua, Jancco. 2005. “Ensayo de resistencia al avance de una embarcación en la UNI”. CEHIDUNI Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la UNI, INIFIM - Lima.

“ANEXO: estimación de errores sistemáticos de:

1.- FACTOR DE FORMA (k)

Para la determinación del factor de forma se ha utilizado el método de Prohaska definido por la ITTC 1966 [25] el cual establece que si no se presentan fenómenos de separación, es decir a números de Froude bajos, entre 0.05 y 0.2, la componente de resistencia por formación de olas puede ser descrita por una función dependiente del número de Froude en la forma Fr^4 . Se deduce de la ecuación

$$C_T = C_R + C_F \cdot (1 + k)$$

la siguiente expresión

$$\frac{C_T}{C_F} = \frac{m \cdot Fr^4}{C_F} + (1 + k)$$

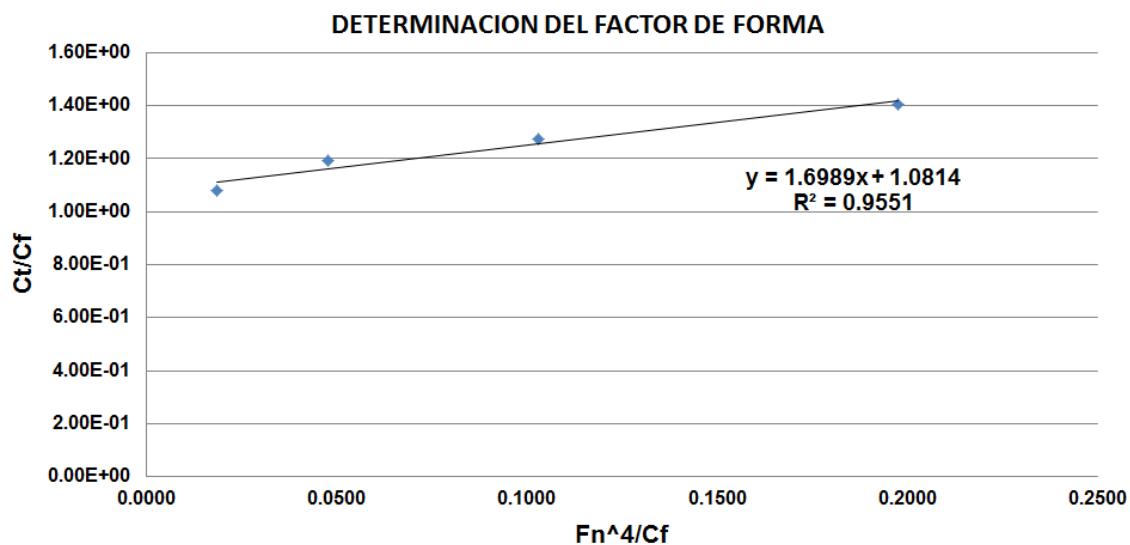
La recta representativa corta al eje de las ordenadas en el valor $1+k$.

Tabla.- Determinación experimental del factor de forma

Fn	Vm m/s	Rtm Kg	Ctm	Cfm	Ct/Cf	Fn ⁴ /Cf
0.100	0.384	1.46E-02	5.81E-03	5.38E-03	1.08E+00	0.0186
0.125	0.480	2.39E-02	6.09E-03	5.11E-03	1.19E+00	0.0477
0.150	0.575	3.53E-02	6.26E-03	4.91E-03	1.28E+00	0.1031
0.175	0.671	5.11E-02	6.66E-03	4.75E-03	1.40E+00	0.1976

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011



Calibración:

$$B_{1+k} = \left[\left(\frac{\partial(1+k)}{\partial C_T} \cdot B_{C_T} \right)^2 + \left(\frac{\partial(1+k)}{\partial C_F} \cdot B_{C_F} \right)^2 + \left(\frac{\partial(1+k)}{\partial Fn} \cdot B_{Fn} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\left(\frac{\partial(1+k)}{\partial C_T} \right) = \frac{1}{C_F}$$

$$\left(\frac{\partial(1+k)}{\partial C_F} \right) = -\frac{C_T}{C_F^2} + \alpha \cdot \frac{Fn^4}{C_F^2}$$

$$\left(\frac{\partial(1+k)}{\partial C_T} \right) = -\alpha \frac{4Fn^3}{C_F}$$

2.-MEDICIÓN DEL PESO DEL MODELO_{B_P}=2g

Este error es atribuido básicamente a la balanza.

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

3.-ERROR EN LA ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE MOJADA $B_{SM} = 6.254E-03$

Calibración:

Este error está asociado a los errores sistemáticos en el sistema de pesaje del modelo. Considerando el $B_P=2.0E-03\text{kg}$ lo cual aumentaría el volumen de carena obteniéndose un error de $B_{S1} = 4.0305E-05 \text{ m}^2$.

Adquisición:

Este error está asociado al error cometido en la construcción del modelo, el cual se refleja en los nuevos valores de las dimensiones principales.

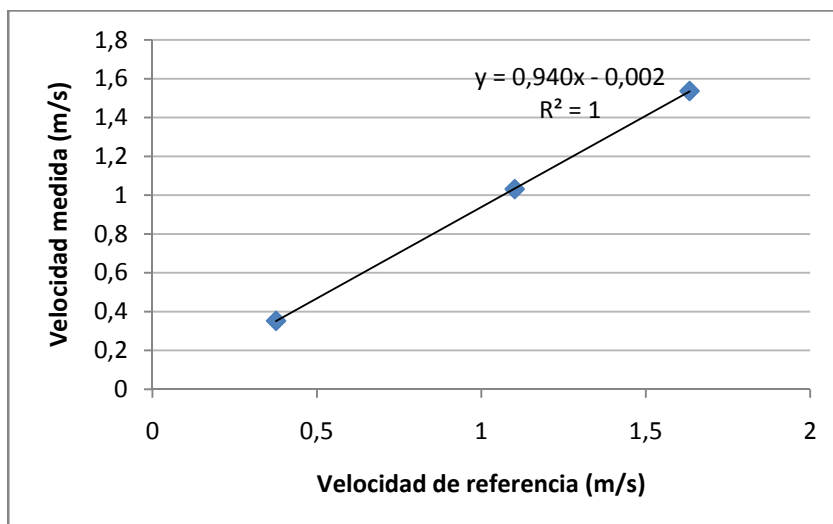
Asumiendo que los coeficientes hidrostáticos no varían ($C_B=0.444$, $C_S= 2.823$) el nuevo valor de la superficie mojada es $S_M = 0.341\text{m}^2$ con un error sistemático de $B_{S2} = 6.254E-03 \text{ m}^2$.

Ecuación de reducción:

No corresponde.

4.-ERROR EN LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD B_V

Fn = 0.1		Fn = 0.28		Fn = 0.41	
Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo	Velocidad	Tiempo	Velocidad
85.72	0.3500	29.34	1.0225	19.44	1.5432
84.42	0.3554	29.34	1.0225	19.66	1.5259
85.14	0.3524	28.62	1.0482	19.48	1.5400



En este caso se realizó la calibración del carro dinamométrico de las 3 velocidades requeridas para los Fn respectivos. El registro de tiempo Δt se realizó para una distancia $d = 40.0 \text{ m}$

$$V = \frac{d}{\Delta t}$$

Calibración:

Está relacionado con la ecuación anterior de donde se deduce que:

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

$$B_{V1} = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial d} \cdot B_d \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \cdot B_t \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial d} = \frac{1}{t}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{-1}{t^2}$$

	dV/dt	Bd	dV/dt	Bt	Bv1
Fr = 0.1	1.18E-02	1.00E-02	-1.38E-04	2.70E-03	2.71E-03
Fr = 028	3.44E-02	1.00E-02	-1.18E-03	1.49E-02	1.49E-02
Fr = 0.41	5.12E-02	1.00E-02	-2.62E-03	9.19E-03	9.57E-03

Adquisición:

No corresponde.

Ecuación de reducción (SEE):

$$B_{V2} = 1.5253E-03$$

5.-CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA

PESO (gr)	VOLTIOS (v)
128	0.0935
133.2	0.0977
143.3	0.1065
193.2	0.1447
243.3	0.1809
343	0.2626
543.3	0.4295
843.2	0.6764
1244.4	1.0053
1760.4	1.4382
1930.4	1.5736

Calibración:

Este error está asociado con la siguiente ecuación:

$$F = 1214.9 \cdot V + 18.659$$

XXII COPINAVAL - ARGENTINA

CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERÍA PORTUARIA
BUENOS AIRES, 27 al 30 de Septiembre del 2011

$$B_F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial V} \cdot B_V \right)^2 \right]^{1/2}$$

Como $B_V = 1.00E-04$ V entonces $B_F = 1.19E-03$

Adquisición de datos:

Las pesas utilizadas fueron previamente calibradas en una balanza de precisión ± 1 gr de ahí que $B_{CC2} = 9.810E-03$ N.

Ecuación de reducción (SEE):

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - (aX_i + b))^2}{N - 2}}$$

