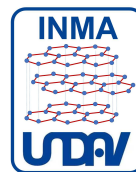




UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



Diseño y construcción de Sistemas para Flexionar y Torsionar Metales No Ferrosos, por Fuerzas de Lorentz, en Resonancia Mecánica

(Caracterización de Modos, Vientres y Nodos de Vibración)

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
ENDE-IAMEND-Electromagnéticos-Técnicas Especiales
Centro Atómico Constituyentes

Autor: José Alberto Marengo*

Colaborador: Silvio Terlisky**

Jamarengo1937@gmail.com; josealbertomarengo@fibertel.com.ar

Resumen

Con el antecedente de otros trabajos del primer autor, se presenta un adelanto en este ítem, con un sistema y aparato para actuar sobre planchas y tubos de metales cualesquiera, que **no sean** ferromagnéticos, para ponerlos en Resonancia en modos de Flexión y Torsión, a fin de medir aquellas frecuencias y determinar de esta manera el módulo de Young, entre otras Propiedades. El adelanto que se menciona alude a que en la implementación de la Fuerza de Lorentz se ha logrado construir un actuador de una sola pieza, que produce las fuerzas que ponen en marcha a aquellos metales, ya que no pueden ser atraídos ni repelidos con Campos Magnéticos convencionales. En esta oportunidad, se ha hecho el estudio de una planchuela de bronce de uso industrial y se han determinado, además, varios Modos resonantes para distintas condiciones de Vinculación de la planchuela a sus puntos y Modos de apoyo. Esto último, pone en práctica una forma enteramente nueva para determinar los nodos y los vientres de vibración, que se han comparado con las Frecuencias obtenidas con modelos calculados por Elementos Finitos (Código NASTRAN) **, con fórmulas analíticas correspondientes a modelos de vigas, y se han obtenido significativas coincidencias. El sistema muestra cómo se puede atraer y repeler metales NO ferrosos mediante Fuerzas de Lorentz, y a relativamente bajos niveles de energía en la implementación, sin recurrir a

*las propiedades de Paramagnetismo o Diamagnetismo de aquellos, lo que exigiría energías excitatrices de gran potencia. Esta última condición determina un coeficiente de transferencia energética entre **actuador** y **respuesta** de un valor cercano al 90%. Se espera que los conceptos expuestos en el presente trabajo sugieran que un nuevo concepto y tipo de propulsión de fuerzas en el campo del electromagnetismo, sea realmente considerado.*

1. Antecedentes históricos.

En el año 1984 tuvo lugar por parte del autor* la presentación del primer aparato y sistema para la excitación vibracional sin contacto físico de piezas metálicas no ferromagnéticas, por Fuerzas de Lorentz. El objetivo de aquellas implementaciones que dieron lugar al diseño, y la construcción de los equipos hasta la fecha, fue el de medir las Frecuencias de Resonancia de *aquellas* piezas y determinar algunas de sus Propiedades Mecánicas con mejor precisión, gracias a la particularidad de no “cargar” el sistema con actuadores de carga acoplada para excitación ni lectura. Así se determinaron, por ejemplo, propiedades tales como Módulo de Young por flexión (E), módulo de torsión (G), y algunas otras por cálculo, asociadas a las primeras. De esta forma, el estudio de vibraciones en planchas y otras superficies, encuentra ahora una actualización de aquellos métodos mediante las posibilidades de las nuevas técnicas e instrumentos a disposición en cualquier laboratorio. Estas posibilidades se exponen y concretan en los *objetivos* del presente trabajo, y se describen a continuación.

2. Objetivos del presente trabajo.

El presente trabajo tiene tres objetivos conexos:

- a) Presentar un nuevo actuador (Lorentz-Marengo)* ahora integrado en una sola pieza para la excitación sin contacto físico, a los fines expuestos,
- b) Realizar una serie de pruebas en materiales con la implementación práctica que se describe más adelante, a fin de determinar la conducta de Modos y Nodos de vibración en dichas piezas.
- c) La realización de cálculos por el sistema ad-hoc para sólidos, *Elementos Finitos (Código NASTRAN)* que se expone más arriba, para *predecir* el resultado de dichas conductas. (Terlisky)**.
- d) Una aplicación especial fuera del marco de piezas o probetas regulares: Campanas y campanillas de Carrillón, que se encuadra en los **Sistemas No Lineales** de medición.

De ello surge la inmediata *comparación* entre las series de mediciones obtenidas por ambos métodos. Esta comparación tiene una doble consecuencia: *los métodos* se refuerzan uno al otro recíprocamente. De hecho, esta **Validación** es el tercer objetivo del trabajo.

3. Descripción del trabajo: Principio aplicado

La ecuación de la Fuerza de Lorentz describe el resultado de la interacción de dos Flujos Magnéticos: el *flujo magnético* asociado a una corriente eléctrica y el *flujo* de un imán permanente; no obstante, es más frecuente describirla como la interacción entre *flujo magnético* (**B**) y *corriente eléctrica* (**I**) mientras exista entre ambas, al menos una componente angular **transversal**. La figura 1 muestra el esquema básico, donde el Producto Vectorial

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \times \mathbf{L.I.} \sin(\alpha) \quad (\text{Fórmula de Lorentz})$$

nos da la fuerza de Lorentz, siempre perpendicular al plano que definen los vectores **B** e **I**. El valor máximo de esta expresión se obtiene cuando el ángulo entre **B** e **I** es de 90° , valor que refiere la figura y se emplea en la experiencia que se describe.

Los considerandos expuestos más arriba se juzgan convenientes para una mejor comprensión del funcionamiento de la implementación práctica a los fines de:

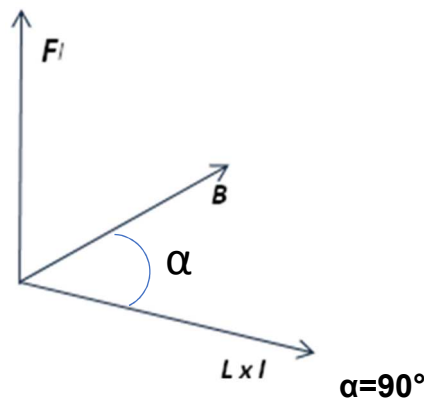


Figura 1. Diagrama de los tres Vectores actuantes: **I**, **B**, y **F** (Fuerza de Lorentz).

- 1) Lograr una Fuerza Cíclica que pueda Flexionar y también Torsionar muestras bajo prueba, aunque no simultáneamente, y sin contacto físico (vínculo). Cada caso tiene su propia implementación ad-hoc.
- 2) Someter las muestras bajo prueba a un estado vibratorio *buscando* el de Resonancia en Flexión, o Torsión, que llamamos: *sintonizar*.
- 3) Logrado este punto, tomar lectura de las Frecuencias de Resonancia en cada caso y compararlas con las *predicciones* del Modelo Teórico.
- 4) Calcular y comparar los Errores de uno y otro método.
- 5) Verificar que se está trabajando en la *Zona Lineal del sistema*. (Respuesta *Elástica* solamente).

4. La implementación de Laboratorio.

En el presente trabajo solo se han utilizado piezas de geometría regular, en este caso, rectangulares, con una relación de largo/ancho de 10, valor que debe adoptarse como mínimo para los montajes en cuestión. Con esta relación, o aún mayor, se logra mayor precisión con fórmulas de relativa simplicidad. Hay varias *modalidades de suspensión* para esta geometría, siendo ellas: *empotrada-empotrada* en sus extremos, *empotrada-libre*, y *libre-libre*. Al considerarse solo este último caso, -por construcción- debe aclararse que existen para la misma pieza, otros estados vibratorios de frecuencias superiores a la Fundamental, que encontrarán en ella otros Nodos de onda, los que definirán los nuevos puntos de apoyo; y también otros Vientres, bajo los que se aplicarán las fuerzas de Excitación solo en uno cualquiera de ellos.

A esta secuencia de estados vibratorios, la llamaremos sucesivamente: **Modo I**, Modo II, Modo III, y Modo IV y se corresponden con los de sus Armónicos. Estas nuevas y diferentes posiciones de los nuevos nodos se elegirán de acuerdo a las predicciones del Método Matemático y serán corroboradas con las mediciones de la experiencia.

Así, en el caso de la frecuencia Fundamental (**Modo I**), para esta técnica por Flexión, y modalidad de suspensión “libre-libre”, los nodos se ubicarán respectivamente a las distancias **0,23 (L)** de cada extremo de la pieza, siendo **L** su longitud total. Los otros valores se dan en tabla aparte. Estos “puntos” nodales, en realidad son líneas transversales a la probeta, que se marcan, y constituyen los “puntos” de apoyo. La figura 2 ilustra esta condición. En ella se aprecian:

- a) La muestra vibrante y las medidas relativas de sus puntos de apoyo.
- b) Los apoyos visualizados como dos triángulos en color verde.
- c) El Láser visualizador del Estado de Resonancia, y la regleta sobre la que éste incide.
- d) El dispositivo excitador, generador de la Fuerza de Lorentz.

Como podría sugerirse, al apoyarnos en un método no convencional, cabe ilustrar la disposición del mismo en el Laboratorio, para la calibración del Sensor, ya que no se ha utilizado un dispositivo comercial. La misma se exploya en “ANEXO: FOTOS Y ESQUEMAS”

La figura 2 muestra la pieza emplazada en este último Modo, con el que se obtendrá la Frecuencia Fundamental. Además, sugiere que se halla en Resonancia, lo cual se deduce porque el haz de Laser ya no refleja solo un punto sobre la regleta de arriba, sino una línea con los extremos algo engrosados. Este engrosamiento es señal de una respuesta *senoidal*, lo que demuestra una **respuesta natural** de la

muestra en cuestión: la senoide exhibe su punto extremo y **quieto**: a velocidad **0**, y energía potencial máxima, del juego Cinético - Potencial. Punto de Engrosamiento.

La figura 3 es una fotografía del banco de pruebas real, apto para ambos tipos de solicitud: Flexión y Torsión.

En ella se aprecian las parcialmente los componentes correspondientes a la figura 2, y parte del instrumental utilizado para activar el actuador (en primer plano) bajo la muestra, el osciloscopio, y el generador que *escanea* las frecuencias en busca del valor resonante y las envía al amplificador de potencia.

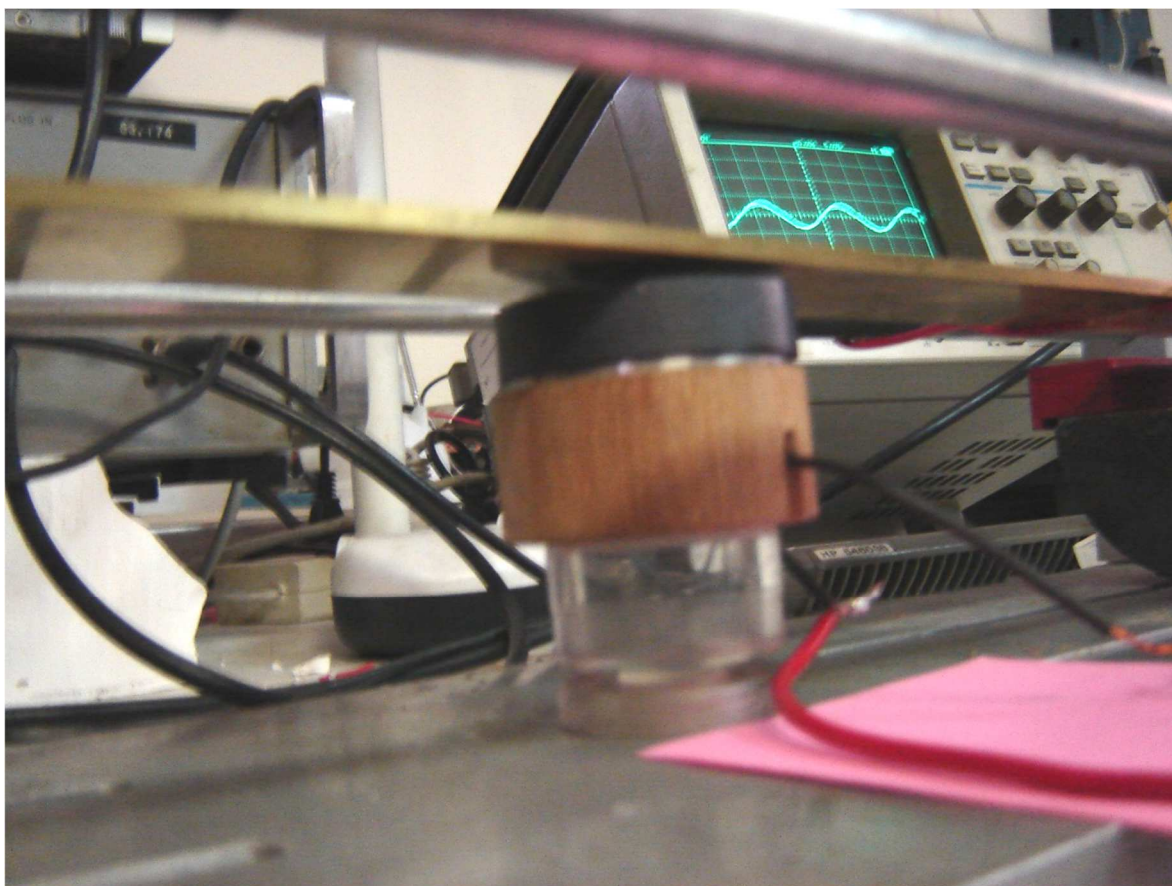


Figura 2. Fotografía parcial del instrumental: En primer plano, el actuador. osciloscopio digital HP, con 4 memorias; el actuador bajo la muestra el oscilador HP analógico (atrás a la izquierda). Disposición para caso de Flexión por fuerza de Lorentz.

La figura 4 es un cuadro de la manera en que se flexan las muestras de acuerdo al régimen de sostén a que sean sometidas. Nuestro caso **libre-libre** se visualiza a la derecha de la línea punteada como la primera figura del cuadro, ilustrando el caso del **Modo I** de suspensión.

El siguiente esquema se justifica en atención a los diferentes casos de empotramiento o sostén que podrían presentarse en la vida real. No figura aquí el caso libre - libre, (clamped clamped) denominación inglesa estándar la más común en puentes y similares estructuras.

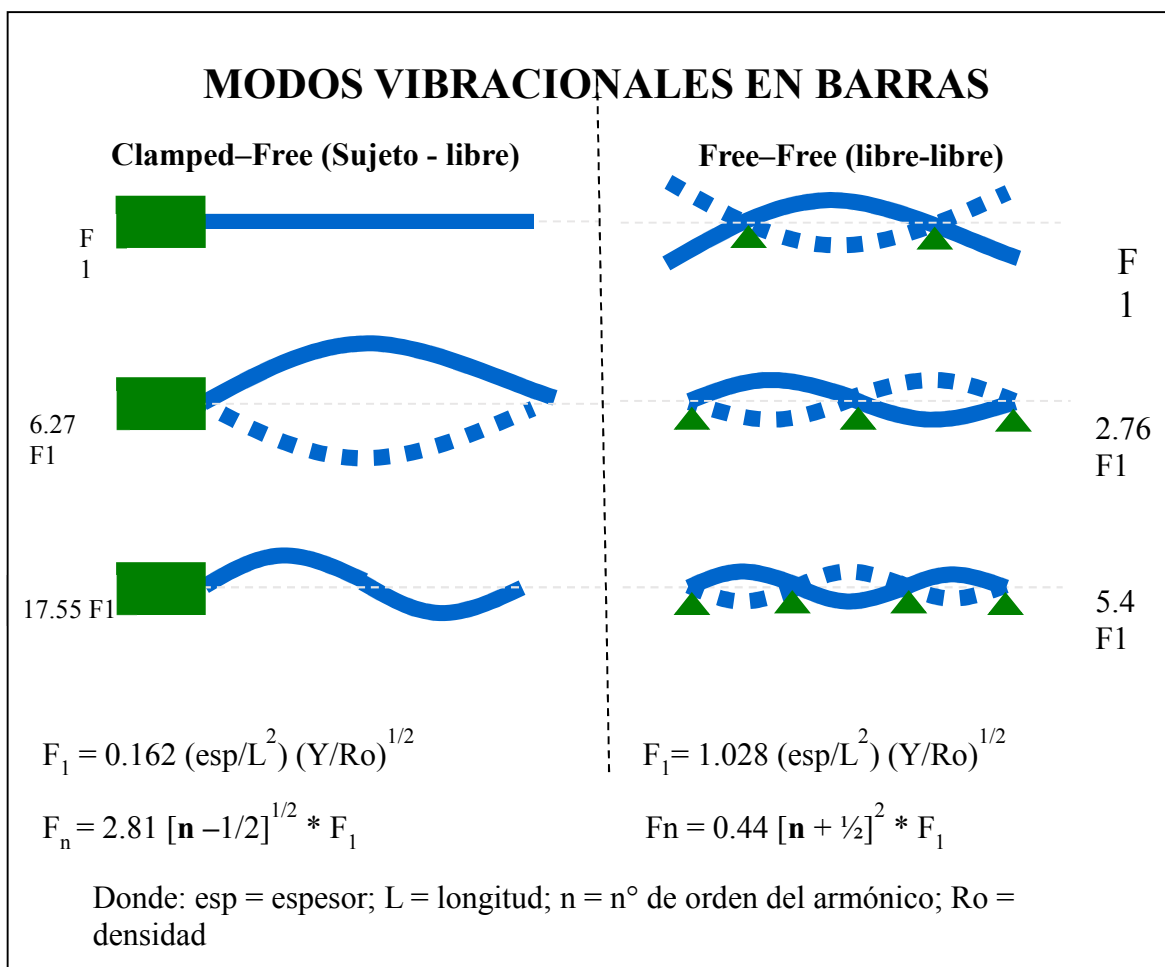


Figura 3. Dos modalidades de suspensión; tres modalidades de Vibración.

La tabla I indica la distribución de las posiciones nodales a lo largo de la muestra para los modos que se consignan. (x/L).

Tabla I

Modos	Posición de los Nodos				
1	0,22416	0,77584	Fundamental		
2	0,13211	0,50000	0,86789		
3	0,09444	0,35580	0.64420	0,90556	

4	0,07345	0,27678	0,50000	0,72322	0,92655
---	---------	---------	---------	---------	---------

La Tabla II a, es la serie de cálculos y mediciones correspondiente a una muestra de latón, de dimensiones: Largo (L) = 500 mm; Ancho = 50 mm; espesor = 5 mm.

Tabla II a

LATON Resonancia	MODO I (Hz)	MODO II 1ra Armónico (Hz)	MODO III 2a Armónica (Hz)
Valor calculado	Fundamental 53,5	147,3	288,8
Valor medido	55	151	297
Diferencia	1,5	4	8,2

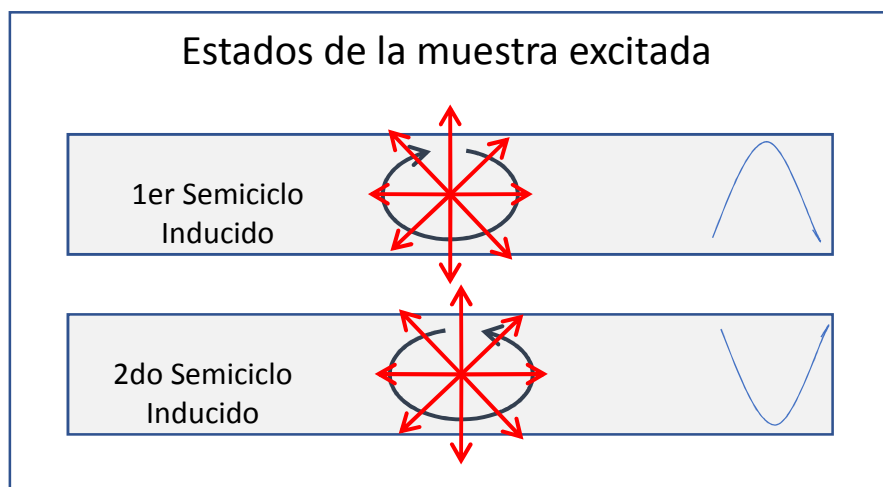
La Tabla II b, es la serie de cálculos y mediciones correspondiente a una muestra de aluminio, de dimensiones: Largo (L) = 500 mm; Ancho = 50 mm; espesor = 2 mm.

Tabla II b

ALUMINIO Resonancia	MODO I (Hz)	MODO II 1ª Armónica (Hz)	MODO III 2ª Armónica (Hz)
Valor calculado	(Frecuencia Fundam.) 52,5	133,3	283,1
Valor medido:	42	Valor medido: XXX	Valor medido:XXX
Diferencia:	Valor calculado: 52,5 *Valor calculado: 44 8,5	Valor calculado: 133,3 Valor calculado: 121,2* 12,1	Valor calculado: 283,1 Valor calculado 237,8* 47,3
Medido menos Calculado	Diferencia: 10,5 (Hz)	Diferencia: XXX	Diferencia:XXX

Los valores marcados con “*” señalan que se ha tomado una desviación en el espesor $\Delta e = +0,2$ mm. Esta operación se realizó para conocer la sensibilidad del método ante una variación de esa magnitud, dadas las condiciones particulares de la muestra. Los datos figuran en la tabla en *italica*. La relación de Lorentz explicada al principio se implementa por *inducción* mediante el generador que se aprecia en la foto y figura, y se muestra en la figura 5. El conjunto de flechas concéntricas indica la dirección del campo magnético permanente, generado desde la parte inferior de la muestra (planchuela); los círculos que las *cruzan* en forma perpendicular, en cada semiciclo, son los caminos de las corrientes inducidas sobre el material, por el actuador, alimentado por el generador ya mencionado, y que se sitúa por debajo de las muestras.

En la figura 5 no se muestran aún las fuerzas (FI) que resultan de la interacción; tan solo el “cruce” transversal de Flujo **B** y corriente **I**.



*Figura 4. Flujo fijo del imán **B**, lazos de corriente inducida (azul), ambos hemiciclos.*

La figura 6 distingue las fuerzas resultantes que se ejercen sobre las líneas de corrientes inducidas en el material, y se indican con flechas color verde, en los mismos círculos.

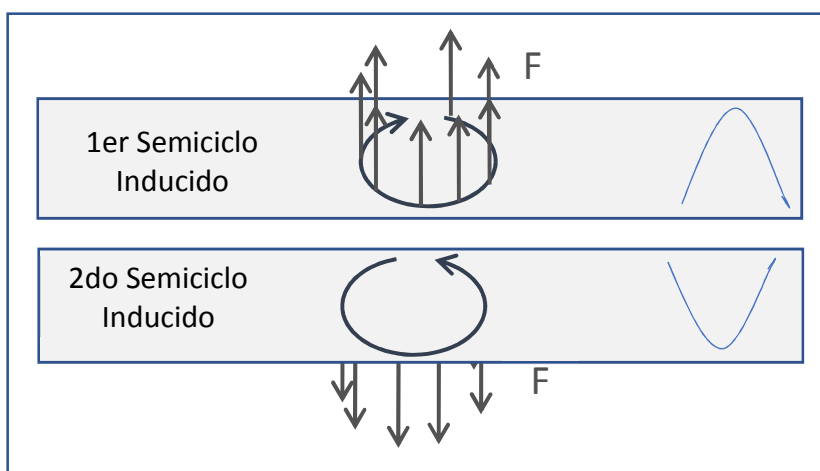


Figura 5. Ambos hemiciclos, ambos lazos de corriente, ambas Fuerzas FI.

La figura 5 da mayor detalle por separado para no complicar el dibujo. Se presenta **solo uno** de los hemiciclos. Observar que el flujo **B** permanece invariable, lo que cambia es la corriente inducida, con el consecuente cambio de sentido de la fuerza **FI** de Lorentz. En la misma se muestran (flechas verdes) las fuerzas resultantes incluidas.

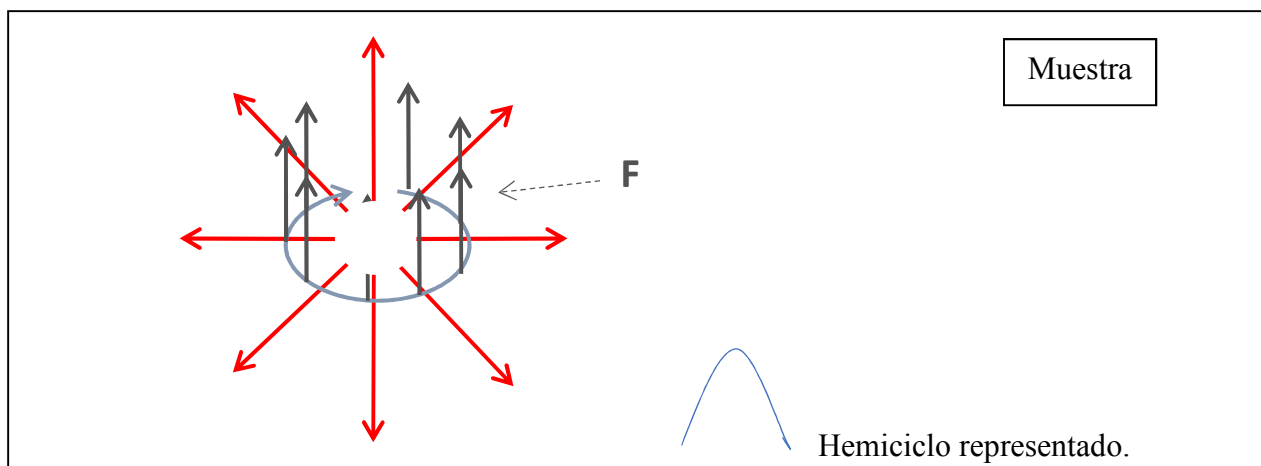


Figura 6. Conjunto completo de vectores actuantes: Flujo fijo, corrientes inducidas, fuerzas de Lorentz, (Flechas verdes).

3.3. Teoría del funcionamiento

Las figuras 3, 5, 6, y 7 ilustran la operación del Actuador que se presenta, visto en planta “a través” de la planchuela, en una sucesión de imágenes. El producto vectorial de ese campo, (**B**) por la corriente **I** que lo cruza, establece la relación de Lorentz que determina la producción de la fuerza F_l que lleva su nombre y surge perpendicular al plano de las otras dos: **B** e **I**.

3.4. Condición de las mediciones

Todas las mediciones se hicieron en condiciones de temperatura y humedad ambiente, en este caso, unos 20 °C. La sujeción de las muestras se realizó por la suspensión con hilos de nylon con resortes de ajuste. Las medidas se repitieron tres veces y no se promediaron valores porque se repitieron en todos los casos, con la apreciación de ciclos enteros. Ello se debió a que el instrumento internamente resuelve con fracción de Hertz, pero nuestra elección de escala no devuelve esa magnitud.

4. Comentarios y Observaciones

Al principio de estas experiencias, se hacía necesario pasar la *corriente oscilante* por las muestras utilizando hilos de suspensión metálicos y que funcionaban como electrodos conductores. De este modo, la carga para el amplificador alimentador estaba en condición de un “cuasi corto circuito”, con sus correspondientes limitaciones. Una considerable cantidad de energía sobrante debía ser disipada antes de ingresar la corriente a la pieza bajo prueba.

La creación de este nuevo dispositivo, el “actuador”, elimina aquel problema y por agregado permite usar hilos o cuchillas **no** conductoras para los sostenes,

eliminando así los hilos conductores. Además, al tratarse de un componente cuasi puntual se logra una mejor localización de las zonas a ser excitadas: los vientres. En la tabla II b aparece una medición duplicada, hecha por cálculo, debido a que se ha tenido en cuenta que en esa medición en particular se contaba con una muestra de aluminio de dimensiones no suficientemente regulares. Esto planteó dudas acerca de cuál sería el “peso” de esta diferencia, en los posibles errores, si alteráramos el espesor en 0,2mm, dado que se observaban pequeñas faltas de homogeneidad dimensional en la pieza, de ese mismo orden.

No se ha realizado el cálculo de errores, debido a que, en el caso del Aluminio, por su particular estado no constituía una verdadera “probeta”, aunque mediciones anteriores, con materiales mejor mecanizados, mejoraban básicamente los resultados. Tampoco se procedió a hacerlo con la muestra de latón pese a su excelente estado, ya que, repetimos, se buscaba hallar una semejanza en la conducta de la experiencia, con la del método teórico. La tabla pone en evidencia que este seguimiento esperado se ha cumplido. Una mayor desviación de valores se observa a medida que aumenta la frecuencia de Resonancia, para los Modos II y III respectivamente. En esos casos llegamos al 2%. De todos modos, no se ha tratado en esta oportunidad, de una verdadera caracterización, sino de exponer y poner en marcha un nuevo producto y verificar, con cierta premura si funcionaba correctamente o no. La figura 7 muestran fotografías de aparato y partes, donde el “gato” sostiene parte del actuador empleado y la planchuela de Latón.

ANEXO: FOTOS Y ESQUEMAS

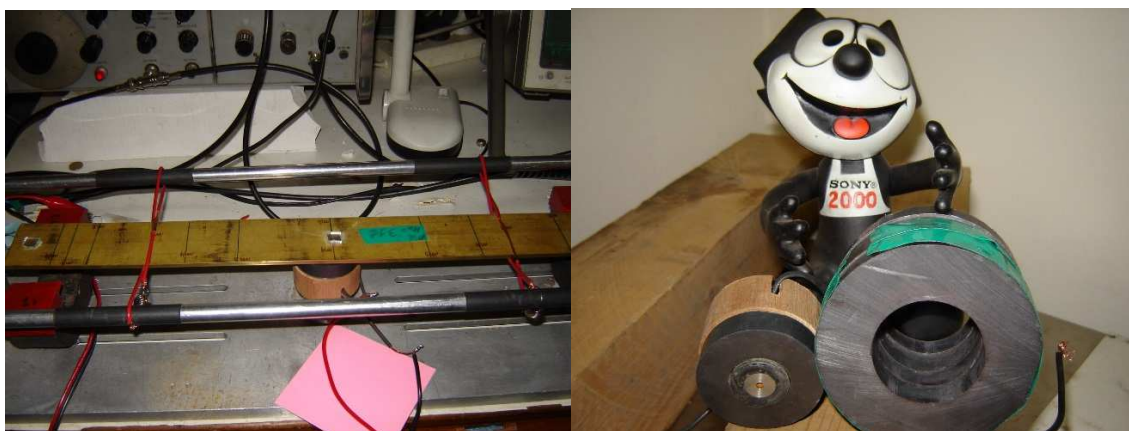


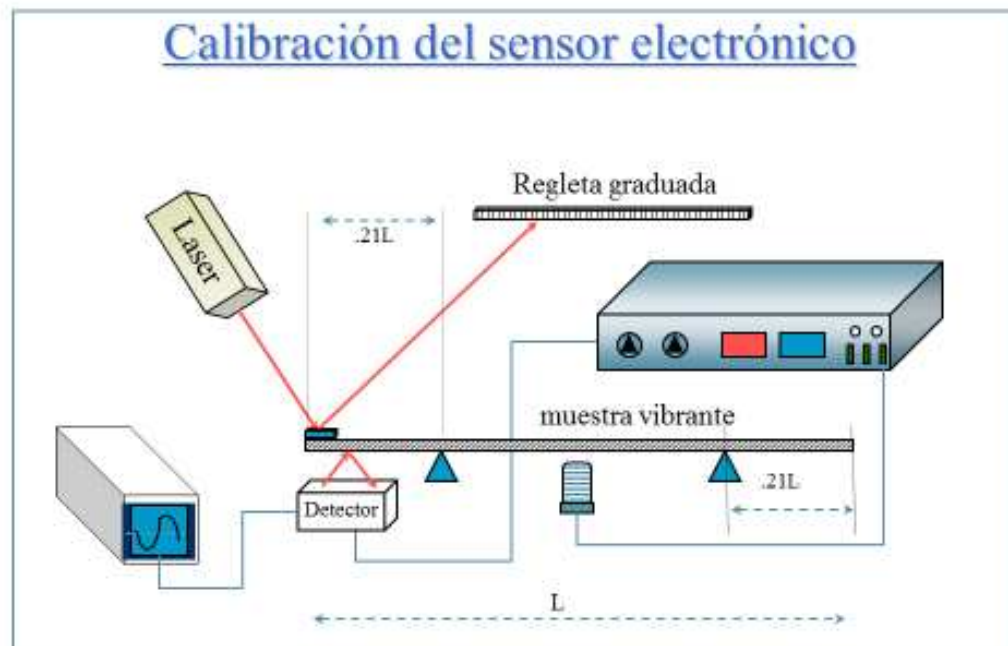
Figura 7A la izquierda y desde arriba, bajo la muestra, el actuador completo. A la derecha, un actuador armado, más pequeño, y parte de otro de mayor potencia y diámetro.

El siguiente es un esquema completo del montaje en el Laboratorio, para la **calibración cuantitativa** del sensor a utilizar: Visualizador (osciloscopio), Laser, haz incidente y reflejado, actuador, distancias y medidas relativas, detección simultánea por reflejo láser y Detector electrónico, para calibrar el sensor y el actuador correspondiente.

Esta es la disposición adoptada para *certificar* como cuantitativas, las indicaciones del láser sobre la escala de la regleta, y la correspondiente elongación de la senoide de Flexión descrita por la muestra bajo prueba. Ídem, para cualquier tipo de experiencia del método. Puede de terminar las zonas elástica y anelásticas durante las pruebas.

La siguiente es una serie de algunas aplicaciones diferentes del presente trabajo, en las que se han aplicado los mismos principios y la reciente tecnología. Como elemento común en este caso se ha utilizado el mismo amplificador de potencia, diseñado especialmente, cuya foto se ilustra a continuación.

Esquema de calibración



C.A.C. IAMEND CNEA

En los casos de potencias de relativo alto nivel, (70 watts) en este caso, aunque ajustados a medio nivel, es siempre conveniente separar las fuentes de poder, y los generadores de señales, de las etapas de amplificación, por cuestiones de auto interferencia y seguridad en las mediciones de precisión.

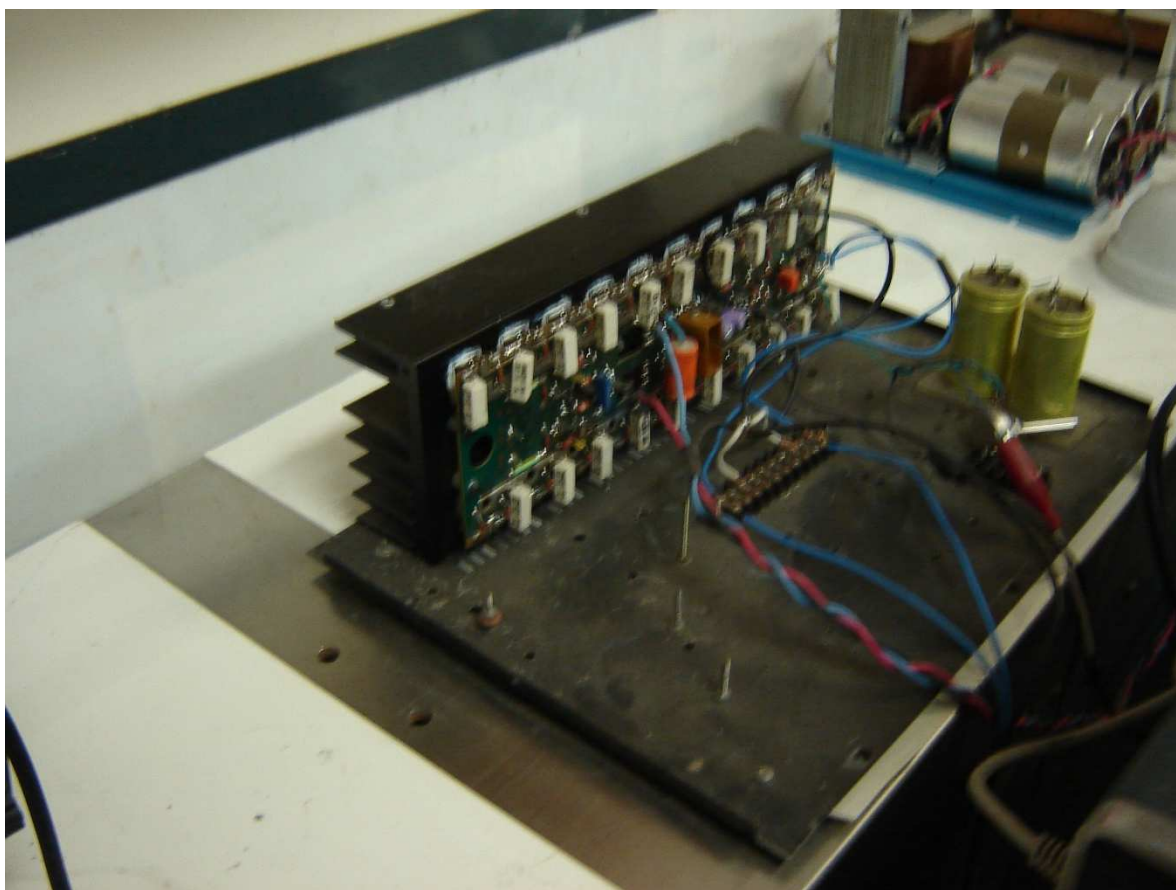


Foto: Vista del amplificador construido ad hoc, para la excitación de los actuadores para casos de materiales pesados. El oscilador no está incluido en la misma. Atrás y a la derecha, la fuente de poder.

Vemos el *actuador* excitando barra de Zirconio. Se trata de un componente crítico en una central nuclear. En la figura 10 vemos una barra de Zirconio - Niobio sometida a Flexión. Este material es A-magnético, prácticamente y por ello solo le caben dos (2) métodos de estimulación: a) Sónico, B) Fuerzas de Lorentz. El sónico es poco eficiente, además de muy perturbador, por la escasa dimensión del área de las muestras, como puede apreciarse en la foto. Ello obliga a levantar los niveles de presión acústica a valores inseguros y molestos para operadores y circundantes. En particular, en esta imagen, se nota que el actuador se ha instalado bajo el primer vientre de la muestra, y no bajo el punto medio.

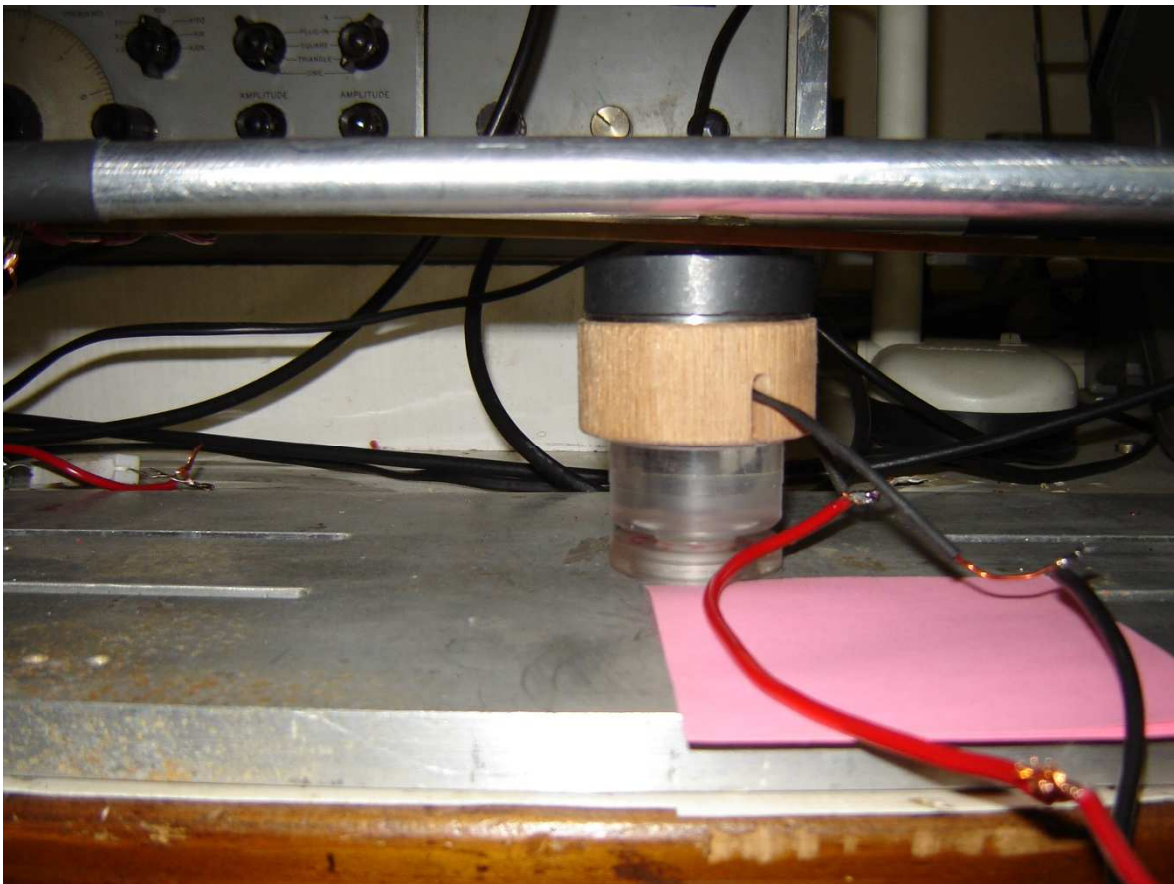


Figura 10: Actuador de Lorentz Marengo bajo barra de Zirconio Niobio.

Esta consideración es fundamental en la ingeniería moderna, ya que excluye también el tema de las elevaciones de temperatura con otros sistemas, que, por sus valores de baja eficiencia de transferencia energética, modifican severamente sus propiedades mecánicas al momento de ser medidas.

La siguiente imagen muestra la disposición general para la misma barra de Zirconio Niobio, pero para ser sometida a Torsión. En la misma actúan los imanes extremos, pero no el del punto medio. Tres espejillos simultáneos comprueban que la barra se retuerce y no gira sobre sí misma, como pudiera sugerirse. El reflejo del haz sobre el del medio permanece quieto, mientras los dos extremos se Torsionan en sentidos opuestos demostrando un estado de verdadera Torsión.

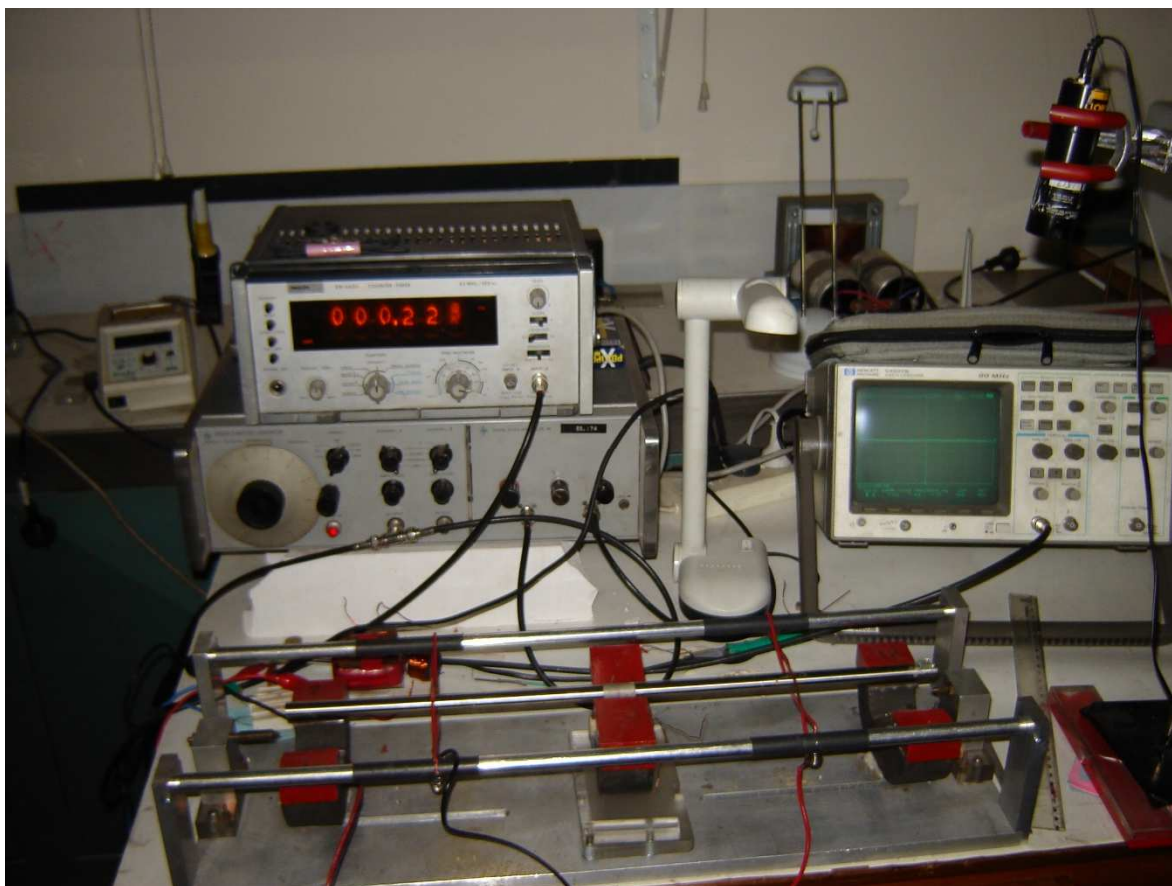


Figura 11. Disposición especial para lograr la Torsión sin contacto físico, por Fuerzas de Lorentz. Se han suprimido los extensores de campo magnético que aumentan el factor de acoplamiento de los imanes sobre las muestras. La barra porta dos pequeños espejillos que no se aprecian en la fotografía, como tampoco los extensores de imanes, para no complicar la figura.

Una aplicación especial

La figura 7 muestra el dispositivo que se menciona en “referencias”, donde un copón de Aluminio de forma acampanada es enfocado a una distancia de unos tres metros por un Laser y se le aproxima un actuador anterior al presentado, animado con el mismo principio operador. A la izquierda de la figura se ve, el montaje del Laser, Enfocador y el detector. A la derecha, el autor sostiene en mano el actuador empleado con el que se produjeron varias frecuencias de Resonancia, visualizadas, medidas y registradas con el osciloscopio, y refrendadas con el frecuencímetro simultáneamente. El osciloscopio no se ve en esta toma.



Figura 7. A la izquierda: Laser, Posicionador, Detector y Actuador.

También se aprecia sobre la “campana” el espejito en rojo, debido a la luz del Laser incidente, así como el mismo haz *regresando* al Emisor, vía la lente de colección y enfoque, hacia el detector, que se aprecia en la figura de la izquierda, entre los tornillos micrométricos; ajustes **H**orizontal y **V**ertical respectivamente. De este detector se han tomado y grabado las señales recogidas por el Laser Reflejado, que son las componentes del “La Voz “de esa campana. Estas Frecuencias Resonantes de la campana, tomadas una a una, al hacer (*recalling*) desde cada una de las Memorias digitales en las que fueron almacenadas, reproducían los sonidos que componen, con su sumatoria, el “*Timbre o Coloratura*” de la campana, de a uno por vez. pero nunca el **sonido** total producido por el *tañido*, (o golpe) sobre la misma. La única acción que permite el sonido Total o real, será el de la **Percusión** o golpe. Este recalling, se reinyecta desde las memorias almacenadas en osciloscopio, hacia el actuador, el cual se hallará cerca de la campana, y la excitará, haciéndola sonar a voluntad y bajo nuestro control de volumen o cualquier otro, pero siempre de una en vez. Esto sucede porque las frecuencias se escanean de a UNA por vez. No se captan de este modo, las que llamamos la envolvente, que son los sonidos típicos de cualquier instrumento musical, con la simultaneidad de sus armónicos, como cuando tañimos el instrumento en una sola operación de Percusión.

5. Conclusiones

La idea de hacer un actuador en bloque, desplazable hacia otros puntos bajo la muestra ha tenido dos objetivos prácticos: eliminar los puntos de apoyo conductores, y poder ubicarlo bajo los otros Vientres en los casos de Modos de orden superior: Modos II, III, y IV. Un excitador central fijo solo permitía producir vibraciones en el Modo Fundamental. Se espera que el empleo de valores medidos, y no de tablas, tales cuales: espesores promediados y Módulos de Young y Poisson mejoren los resultados.

También debe hacerse un juicio sobre el sistema de cálculo empleado, ya que, al modelar, se aplican condiciones “de contorno”, a criterio del operador y limitaciones de los distintos programas. En este caso, el Módulo de Young, el coeficiente de Poisson, y la Densidad del material, son algunos de los datos que se necesitan para correr los programas.

Se espera que, haciendo un sistema de apoyo y emplazamiento más preciso, se mejoren estos resultados en cuanto a las pequeñas discrepancias entre lo medido y lo calculado.

Las proyecciones aplicativas han sido interminables, y no presentan dificultades del tipo de provisión de materiales especiales ni de costos o habientes escasos.

Agradecimientos y reconocimientos.

Al Dr. Ingeniero Silvio Terlisky, por su trabajo con los cálculos predictivos y sus oportunas observaciones sobre el trabajo. A la Lic. Cristina Spinoza por su colaboración en la toma de datos.

A la C.N.E.A., porque jamás me opusieron dificultades para la realización de todos mis proyectos o trabajos, los que sin excepción pude realizar, así como la gran confianza demostrada al confiarme los asesoramiento a tantas industrias a las que he podido asistir.

Referencias

Marengo José A., SAM, Bahía Blanca, Argentina, año 1984
Flexionador para medir Módulos **Y** por fuerzas de Lorentz, sin contacto físico.

Marengo José A., Abende, Asociación Brasileira de Ensayos No destructivos) San Pablo, Brasil, 1986;
Torsionador para medir Módulo **G** sin contacto físico.