

# DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES

**César Rodríguez Alcalá**

Instituto Tecnológico de Celaya.  
*ing.cesarrodriguezcalca@gmail.com*

**Gilberto Ruiz Mondragón**

Instituto Tecnológico de Celaya.  
*gilberto.ruiz@itcelaya.edu.mx*

**Ángel Pola Meléndez**

Instituto Tecnológico de Celaya.  
*prof.apola@itmatamoros.edu.mx*

**Aurelio Rodríguez Fortozo**

Instituto Tecnológico de Celaya.  
*Aurelio\_7134@hotmail.com*

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un dispositivo para la de medición de esfuerzos residuales con movimientos programables en secuencia, en probetas de aluminio utilizando el método del barreno ciego. La propuesta final del instrumento se desarrolló utilizando la metodología de Pahl y Beitz, la cual comprende los pasos en la planeación y proceso de diseño, así como la identificación esencial del problema dentro de una lista de requerimientos y la identificación de la función general y subfunciones de la misma. En ésta metodología se utiliza la tabla de clasificación de las funciones básicas que pueden satisfacer a la matriz morfológica. Finalmente se evalúan las propuestas, y se una selecciona una solución potencial. El resultado que se obtiene en este trabajo, es una actualización al típico instrumento del barreno ciego y al medidor de análisis de esfuerzos P3 de la

compañía Micro Measurements, donde los cambios principales se enfocan en el centrado electrónico de la probeta y la obtención de los resultados en una pantalla de visualización, de acuerdo a la norma ASTM 837-08.

**Palabra(s) Clave(s):** Barreno ciego, medición de esfuerzos, norma ASTM E 837-08, procesamiento de la información, sistema de visión y visualización de resultados.

## Abstract

*This article present a proposal for residual stress measurement with programmable movements in sequence in aluminum specimens using hole-drill method. The final concepts of the instrument was developed using Pahl and Beitz methodology which comprises the steps in the planning and design process, essential problem identification in a list of requirements and main function and subfunction identification. In this methodology the leaderboard of basic function that can satisfy the solution of each subfunction is used and finally evaluated under functionality and complex criteria and a potential solution is selected. The result obtained in this investigation is an updated to the typical hole-drill instrument and the P3 stress analysis test by Micro Measurements Company, where the main change focus on the electronic focusing of the specimen and result display results on screen, according to standart ASTM E 837-08.*

**Keywords:** Endmill, stress analysis test, ASTM E 837-08 standart, data information processing, vision system y result display.

## 1. Introducción

El estudio de la medición de esfuerzos residuales es un área importante en los análisis de fallas. Debido a los avances significativos en la medición de estos esfuerzos existen diferentes técnicas y métodos de obtención de los mismos. El método por extensometría es el más conocido y aplicado en la actualidad, debido a la precisión que se obtiene y a su factibilidad de aplicación.

Existen varios tipos de galgas extensométricas que históricamente fueron desarrolladas a medida que se conocían teorías en la mecánica, óptica, eléctrica,

acústica y neumática. En 1856 Lord Kelvin [1] enunció su principio de funcionamiento, cuando al deformar alambres de hierro y cobre descubrió que su resistencia eléctrica variaba. En 1938 se desarrolló las primeras galgas extensométricas con cables metálicos y para el año de 1939 Runge y Simmons [2] desarrollaron las galgas extensométricas eléctricas que actualmente se utilizan.

En 1966, Vigness presenta un documento ante la reunión de SESA, en Detroit. El documento contiene la medición residual de los esfuerzos en materiales elásticos que puede ser denominado semidestructivo si el orificio del diámetro utilizado es muy pequeño. Una generalización fue postulada para extender el uso de esta solución para la medición de esfuerzos residuales en todo material isotrópico.

En Febrero de 1981 se presenta dos patentes, la US4248094 y la US 4249423 A para la medición de esfuerzos residuales por derretimiento local. Incluye una roseta para la medición de los esfuerzos y un rayo láser para la penetración en el material de estudio. En noviembre de 1998 se aplica la patente EP 0878710 A1 en Europa, para un método de medición de esfuerzos residuales, donde se realiza la penetración en el material por ultrasonido.

SINT Technology en el 2005 [5] presenta un instrumento con la ventaja de realizar sus movimientos por medio de secuencias programadas, así como la colección de datos que sufre el material en cada etapa de la prueba utilizando la norma ASTM E 837-13a. Como podrá notarse, el uso de las galgas extensométricas en la medición de esfuerzos residuales ha sido extensamente estudiada, por lo que en este trabajo se pretende profundizar un poco más, presentando una actualización del instrumento en el centrado de la roseta y en la obtención de los esfuerzos por secuencias programadas, donde pueden distinguirse las etapas del instrumento y el resultado obtenido donde se utiliza la metodología propuesta por Pahl y Beitz.

## **2. Métodos**

### **Diagrama conceptual**

En el diagrama conceptual que se muestra en la figura 1 se aprecia los elementos que participan en el fenómeno de barrenado. Cada uno de estos elementos contribuye en la medición de los esfuerzos residuales del material.

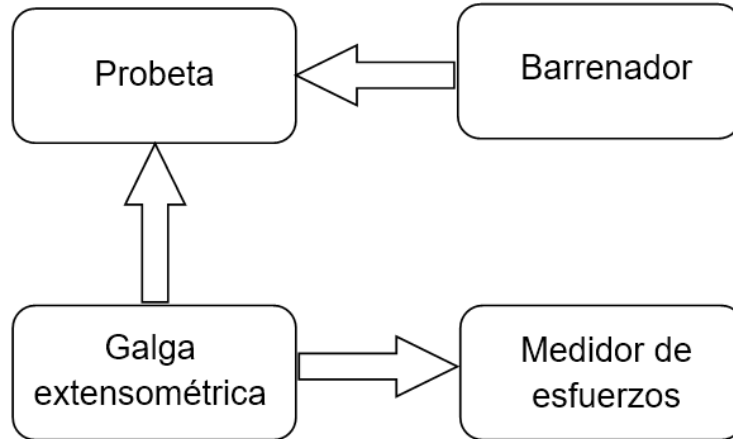


Figura 1 Diagrama conceptual del método del barreno ciego.

### Tabla de requerimientos

El centrado de la probeta de laboratorio con el típico instrumento de barreno ciego, se requiere una alta habilidad para lograr la alineación de la roseta con el cabezal de barrenado, adicionalmente la toma de los valores de los esfuerzos del instrumento P3 se registra manualmente. El instrumento P3 de la compañía Micro Measurements tiene un medidor de corriente de puente de Wheatstone, que permite la conexión de una, dos y tres galgas en configuración de cuarto, medio y puente completo, respectivamente. Esta medición de corriente es el resultado de la deformación que sufre el material conforme se va barrenando y se van relajando los esfuerzos atrapados en la probeta. La deformación es traducida a esfuerzos residuales mínimos y máximos. En la propuesta de este proyecto se utilizó la tabla 1 para establecer los requerimientos de diseño para segregar las características forzadas de las deseadas.

### Identificación de la función principal y subfunciones

Se determinó al método del barreno ciego como la función principal y a sus componentes en subfunciones específicas. En cada una de las subfunciones se expresa el concepto básico de cada elemento para representarlo, posteriormente, como un elemento de principio de funcionamiento básico, ver tabla 2.

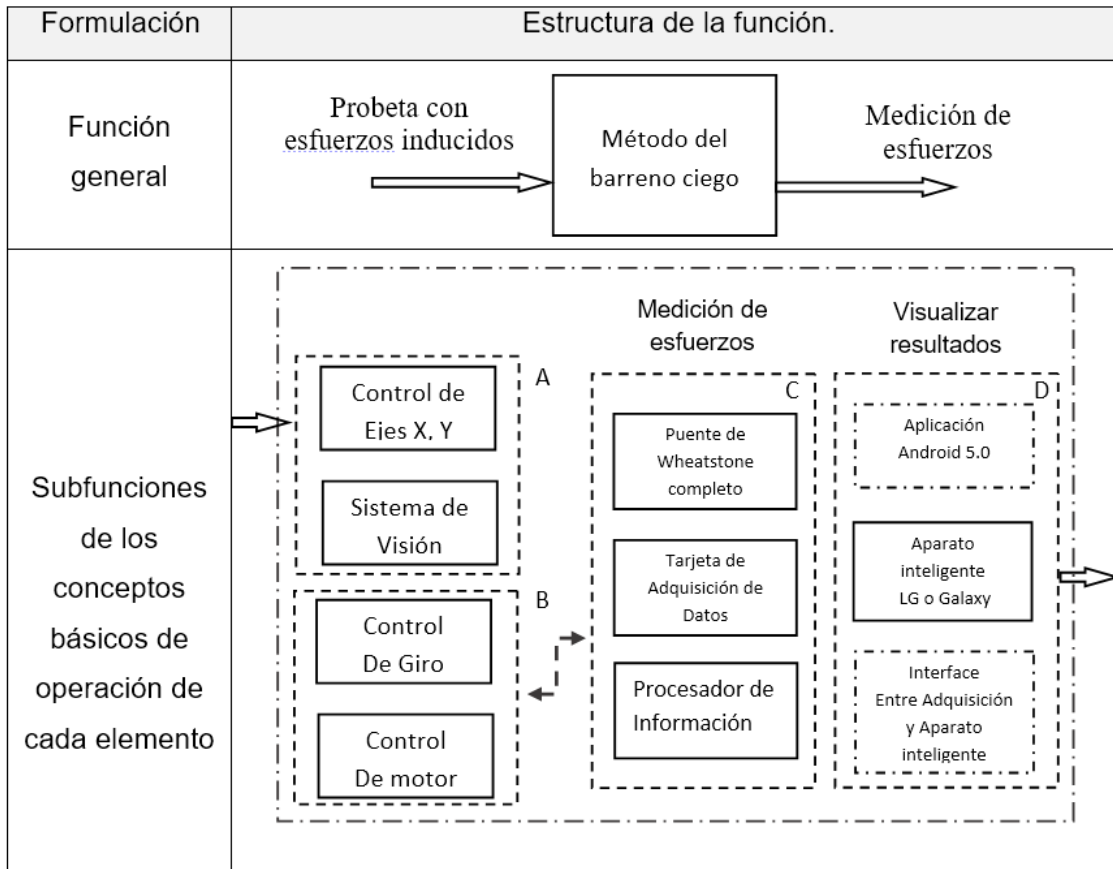
Tabla 1 Lista de Requerimientos del diseño de instrumento de barrenado ciego.

Tabla de requerimientos	Propuesta de medición de esfuerzos residuales	Elabora: C. Rdz.	Fecha: 05/13/2016
Tarea	Especificaciones del diseño	Condición:	
		Forzada	Deseada
1	Realizar estudio de esfuerzos residuales en probetas con dimensiones variables que ocupen un volumen máximo de 150 mm x 50 mm y 8 mm ancho, fabricado en Aluminio 6061.	F	
2	Realizar estudio de esfuerzos residuales en probetas de material: Acero O1, Acero O2, Acero 4140.		D
3	El instrumento será de laboratorio y deberá montarse en una superficie plana y lisa para su sujeción.	F	
4	El instrumento será de campo y con capacidad de adherirse a cualquier tipo y forma de superficie, utilizando para ello las siguientes herramientas tipo: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnetos de activación manual.</li> <li>• Ventosas de vacío.</li> </ul>		D
5	La visualización para el centrado de la roseta será a través de un sistema de visión de 2 Mega pixeles como mínimo y mostrada en una pantalla.	F	
6	La visualización será mostrada en cualquier dispositivo inteligente que tenga descargado una aplicación para el instrumento.		D
7	Los ajustes X, Y para centrar la roseta será con motores eléctricos con precisión de 0.052 mm	F	
8	Centrado será semiautomático con las características: Pantalla para ver roseta. Botones táctiles X, Y para mover centro de roseta.	F	
9	Centrado de roseta será automático con las características: Pantalla 8 X 15 cm para ver roseta. Movimiento inteligente X, Y para mover centro de roseta.		D
10	La posición de la probeta se guarda en: Procesador	F	
11	Motor de perforación con velocidad de: 3000 a 14000 RPM. 50000 a 400000 RPM	F	
12	El avance de del eje Z, se realiza cumpliendo E837-08. Se mostrarán graficas de esfuerzos de acuerdo a lo norma E837-08	F	
13	Dimensiones del instrumento similar al presentado en la nota técnica TN-503.	F	





Tabla 2 Función general y subfunciones de principios básicos de operación.



### Principio de funciones básicas

En esta tabla 3 se puede observar las alternativas de solución de cada subfunción, donde cada una de ellas cumple con una parte del funcionamiento completo de la propuesta del prototipo. De esta tabla morfológica se obtienen dos propuestas de solución P1 y P2, expresadas en las siguientes ecuaciones:

$$P_1 = F_1S_{11} + F_2S_{21} + F_4S_{43} + F_5S_{51} + F_6S_{61} + F_7S_{72} + F_8S_{82}$$

$$P_2 = F_1S_{12} + F_2S_{21} + F_3S_{32} + F_4S_{45} + F_5S_{52} + F_6S_{63} + F_7S_{72} + F_8S_{82}$$

Cada P\propuesta representa un APMER (Análisis de propuesta de medición de esfuerzos residuales).

La evaluación de las posibles soluciones se realizó a través de la tabla 4.

Tabla 3 Tabla morfológica de principios básicos de funciones.

Solución Subfunción	1	2	3	4	5
F1 Base de Probeta	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>
F2 Sujeción de Base	Tornillo	Ventosa	Iman	Abrazadera	Tornillo en T
F3 Mover en X, Y	Banda con carrito	Banda y barra Thomson	Slider y piston	Piñon y Cremallera	Corona y Tornillo sin fin
F4 Centrar Probeta	Camara de vision industrial	Lente de microscopio	Camara web USB	Camara de celular Samsung	Microscopio Digital USB
F5 Barrenar Probeta	Fresadora de aire comprimido	Fresadora de c.d.	Fresadora de servomotor	Fresador de motor de c.a.	Fresador de ultra sonido
F6 Medición de Esfuerzos		Dispositivo de adquisición de Datos de galga de deformación	Tarjeta de adquisición de Datos	Estación de medición automatizada	Tarjeta de adquisición especializada de manufacturero.
F7 Procesar Información	Tarjeta de adquisición de datos especializada	Computadora	Tarjeta de adquisición de datos	Estación de medición automatizada	Sistemas de adquisición de datos especializada
F8 Visualizar Resultados	Televisión	Computadora	Dispositivo inteligente de uso generico	Dispositivo inteligente especial	Impresora

Tabla 4 Matriz de decisiones de alternativas.

Especificación Valor	Especificación								Puntuación	Proyecto: Análisis de las propuestas de medición de esfuerzos residuales
	Facilidad de Operación	Facilidad de fabricación	Facilidad de integración	Durabilidad de operación	Facilidad de uso en Laboratorio	Facilidad de uso en Campo	Mínimo ajuste manual	Costo		
Alternativas	0.40	0.15	0.15	0.05	0.30	0.05	0.30	0.15		Elaboró: César Rodríguez Fecha: 05/25/2016
Base de Probeta	3 1.2	3 0.45	3 0.45	3 0.15	1 0.3	1 0.05	1 0.3	3 0.45	3.35	Debe de contener todo el diseño del instrumento en geometría y peso
Sujeción de Base	3 1.2	3 0.45	3 0.45	3 0.15	6 1.8	6 0.3	3 0.9	3 0.45	5.7	Debe de cumplir que sea de laboratorio.
Mover ejes en X, Y	9 3.6	9 1.35	9 1.35	9 0.45	3 0.9	3 0.15	9 2.7	3 0.45	10.95	Complejo y de alta precisión para lograr un barrenado correcto
Visualizar centrado de probeta	9 3.6	6 0.9	3 0.45	3 0.15	1 0.3	1 0.05	9 2.7	3 0.45	8.6	Sencillo, de implementar, es solo visualización
Barrenar probeta	3 1.2	1 0.15	3 0.45	1 0.05	1 0.3	1 0.05	1 0.3	3 0.45	2.95	Es crítico que se cumpla con la norma ASTM E 837-08
Medición de esfuerzos	6 2.4	1 0.15	3 0.45	1 0.05	9 2.7	3 0.15	3 0.9	3 0.45	7.25	Es crítico que se cumpla con la norma ASTM E 837-09
Procesar información	3 1.2	1 0.15	3 0.45	1 0.05	3 0.9	3 0.15	1 0.3	3 0.45	3.65	Complejo el manejo de datos
Visualizar resultados	3 1.2	1 0.15	6 0.9	1 0.05	6 1.8	6 0.3	1 0.3	3 0.45	5.15	Sencillo mostrar los reportes y gráficas de acuerdo a ASTM E 837-08



### 3. Resultados

En la figura 2a se presenta el modelo conceptual del prototipo ya evaluado en la matriz de decisiones y en la figura 2b se muestra el prototipo construido y funcional.



a) Propuesta conceptual.

b) Diseño.

Figura 2 Prototipo.

Se realizó la medición de los esfuerzos por el instrumento P3 y APMER en una misma probeta de aluminio, colocando dos rosetas. En la figura 3, se presenta la gráfica comparativa de los esfuerzos residuales por el instrumento P3 y APMER. Como se observa, las lecturas tienen el mismo comportamiento y son similares. En la tabla 5 se muestra el porcentaje de las lecturas del APMER vs P3. Se hace mención que la diferencia se debe a que las lecturas del barreno se realizaron a 5mm de distancia entre galgas.

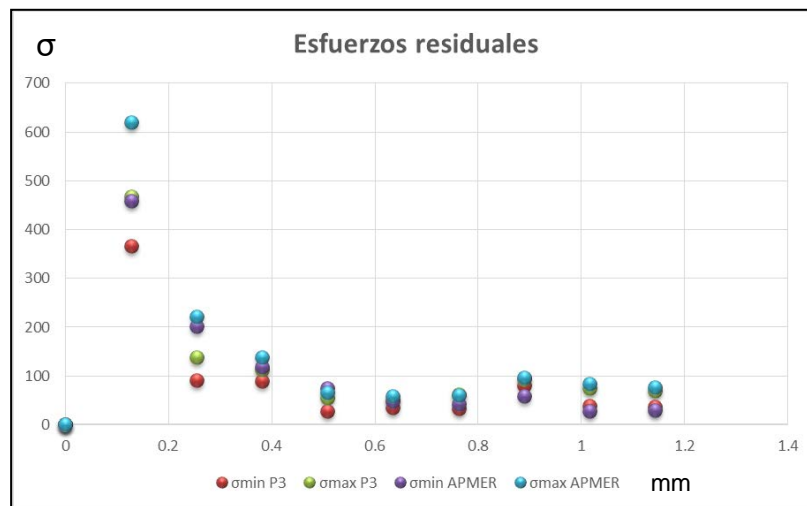


Figura 3 Esfuerzos residuales medidos por el instrumento P3 vs APMER.

Tabla 3.1 Esfuerzos.

$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\max}$
20.1 %	24.5 %
54.7 %	38.0 %
25.2 %	18.1 %
62.4 %	16.6 %
24.4 %	10.9 %
20.3 %	3.0 %
41.4 %	3.1 %
39.7 %	10.5 %
21.2 %	8.4 %

#### 4. Discusión

Usando esta metodología Pahl y Beitz, también se pueden obtener otros modelos conceptuales con variantes en sus componentes y nuevas propuestas de solución, a través de la utilización de la matriz morfológica y la matriz de decisiones.

#### 5. Conclusiones

En el desarrollo del proyecto utilizando al metodología de Pahl y Beitz se encontraron principios básicos relevantes para cada una de las partes del proyecto, en especial la forma de centrar la probeta donde las funciones de principios básicos son muy variadas, en las cuales solo se seleccionaron cinco por ser viables para el desarrollo e integración en el proyecto. De la tabla de funciones de principios básicos se pueden realizar combinaciones y descubrir nuevas propuestas de solución.

Se propone que para estudios posteriores se realice una tabla amplia de solución a cada principio básico que incluya los métodos de medición de los esfuerzos residuales, para determinar si puede ser capaz de introducir una nueva tecnología o método para la medición de esfuerzos residuales diferentes al barreno ciego y a cualquier otro método ya utilizado.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Hidalgo Cavazos, Felipe De Jesús.: Análisis Experimental de Esfuerzos Aplicados con Galgas Extensométricas. Universidad Autónoma de Nuevo León, Enero 1995.
- [2] Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain. New York McGraw-Hill, 1958.
- [3] Álzate Rodríguez, Edwin Jhovany. Montes Ocampo, José William. Silva Ortega, Carlos Armando. Medidores de Deformaciones por Resistencia: Galgas extenso métricas. Scientia et Technica Año XIII, No 34, Mayo de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [4] Micro-Measurement Intertechnology. Strain Gage and Instrumentation for Residual Stress Measurements. Measurements Group, Inc. 1988.
- [5] Sint Technology Restan. System for Measuring Residual Stress by the Hole-Drilling Method. Calenzano, Florence, Italy.
- [6] Stresstech Group. Xstree 3000, The Reliable and Time Proven Technique for Measuring Residual Stress and Retained Austenite.
- [7] Visahy.: Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method. Tech note TN-503. Document Number: 11053, Revision: 01 noviembre 2010.