

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica



**DISPOSITIVO PARA LA CALIBRACION DE PALANCAS
DE TORSION. IMPLEMENTACION DE ADQUISICION
AUTOMATICA DE DATOS POR COMPUTADORA"**

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

Juan Carlos Zoller Castro

Guayaquil - Ecuador

1989

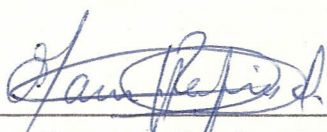
AGRADECIMIENTO

Al ING. GUILLERMO URQUIZO
Director del Tópico, por
su ayuda y colaboración
para la realización de
este trabajo.

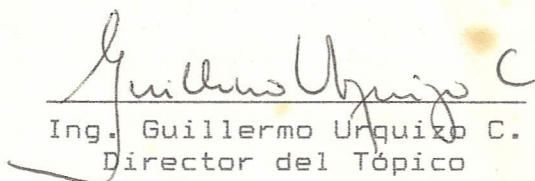
DEDICATORIA

A MIS PADRES

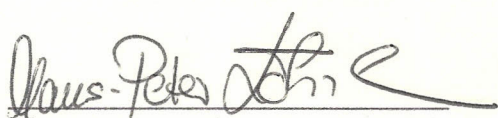
A MI HERMANO



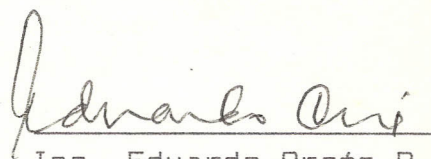
Ing. Marcos Tapia Q.
Subdecano FIM



Ing. Guillermo Urquiza C.
Director del Tópico



Dr. Hans Peter Löhrlein
Miembro del Tribunal

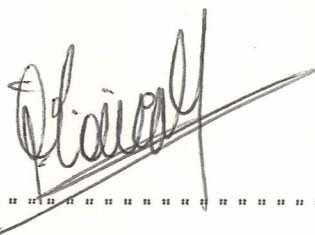


Ing. Eduardo Orcés P.
Miembro del Tribunal

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este Proyecto de Grado, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Tópico de Graduación)



.....

Juan Carlos Zöller Castro

RESUMEN

El presente trabajo describe el funcionamiento del dispositivo calibrador construido e indica cuales son los parámetros que rigen su operación. Básicamente este trabajo consta de tres partes principales, que se detallan a continuación :

Se inicia con un análisis teórico de la celda de carga, que es el elemento que produce la concentración de esfuerzos. En esta parte se estudia cuales deben ser las modificaciones que se realizarán sobre la celda de carga para obtener los resultados deseados.

La segunda parte consiste analizar en que forma deben disponerse los extensómetros, para lograr que la celda de carga sólo mida torsión. Una vez colocados los extensómetros, se detalla como se realizó la calibración de la celda de carga, para que ésta pueda convertirse en un elemento medidor.

La tercera parte explica como se implementó la adquisición de datos, para realizar la calibración de

una palanca de torsión con el uso de un computador. En este punto se explicarán los fundamentos de la adquisición de datos, describiendo el funcionamiento del programa de computadora desarrollado para el efecto.

Finalmente se analizará las ventajas y desventajas del dispositivo calibrador, su precisión, y si es conveniente o no el uso de la adquisición de datos en el proceso de calibración.

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCION.....	12
I. ESTUDIO DE LA CELDA DE CARGA.....	13
1.1. Estudio según Teoría de Elasticidad	13
1.2. Balance de Fuerzas	15
1.3. Estudio según Resistencia de Materiales	23
1.4. Cálculo de las deformaciones esperadas	28
1.5. Modificación de la celda de carga con respecto a la configuración original.....	31
1.6. Cálculos realizados para la modificación	33
II. PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	35
2.1. Ubicación de los extensómetros	35
2.2. Calibración de la celda de carga	38

2.3. Calibración definitiva	
de la celda de carga	43
III. ADQUISICION DE DATOS.....	48
3.1. Explicación de la adquisición de datos	48
3.2. Calibración de la celda de carga	
mediante adquisición de datos	51
3.3. Descripción de los instrumentos	
utilizados.....	53
3.4. Programa de adquisición de datos	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
APENDICES.....	75
A. PLANOS DEL DISPOSITIVO.....	76
B. ESPECIFICACIONES DE LA CELDA DE CARGA.....	80
C. FACTORES DE CONCENTRACION DE ESFUERZOS.....	81
D. FOTOGRAFIAS DE LA CELDA DE CARGA.....	84
E. SIMBOLOS EMPLEADOS.....	86
BIBLIOGRAFIA.....	88

INDICE DE FIGURAS

Num.	Descripción	Pág.
1	Esquema de la celda de carga	14
2	Esquema del Estado de Esfuerzos	16
3	Celda de carga y sus dimensiones	25
4	Modificación de la celda de carga	32
5	Ubicación de los extensómetros	36
6	Esquema de la calibración	40
7	Curva de calibración	42
8	Ubicación definitiva de los extensómetros.....	44
9	Curva de calibración definitiva	46
10	Esquema de los instrumentos	49

INDICE DE TABLAS

Num.	Descripción	Pág.
I	Resultados de la calibración	41
II	Resultados definitivos de la calibración..	45
III	Resultados de la calibración digital.....	55

I N T R O D U C C I O N

El objetivo de este proyecto es poner en funcionamiento un dispositivo que originalmente se diseñó para funcionar como una máquina universal para ensayos de torsión, que ha sido modificado, para ser utilizado como un dispositivo calibrador de palancas de torsión. A través de este informe, se detallarán las modificaciones efectuadas para lograr este propósito.

Mediante la utilización de éste dispositivo podrá habilitarse una herramienta que en un momento dado puede considerarse inservible, ya que se encuentra descalibrada, y por lo tanto no ofrece una medición confiable de torque.

El uso de la adquisición de datos evitará tener que realizar el proceso de calibración en forma manual. Con el uso de un computador y un programa desarrollado para el efecto, se receptorán los datos del proceso de calibración. Finalmente dicho programa entregará como resultado, una impresión de la carta de calibración de la herramienta que está siendo ensayada.

CAPITULO I

ESTUDIO DE LA CELDA DE CARGA

1.1. ESTUDIO SEGUN TEORIA DE LA ELASTICIDAD

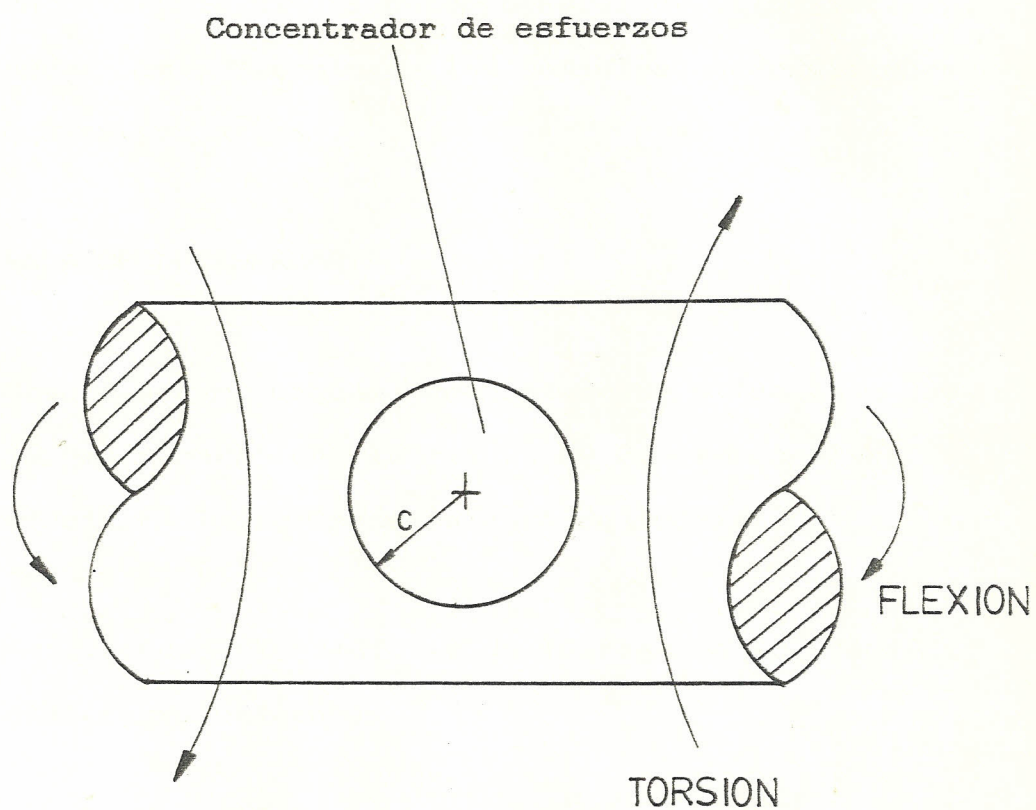
La celda de carga en éste dispositivo, es el elemento que produce la concentración de esfuerzos y por lo tanto de él dependerá el éxito del citado dispositivo como instrumento para la medición de torques. La celda de carga cuyo plano se muestra en el Apéndice A, presentaba originalmente una disposición que se intuyó no sería muy conveniente para lograr los resultados deseados.

Es por esto que dicho elemento se lo sometió primeramente a un estudio aplicando Teoría de Elasticidad, que se describe a continuación.

El elemento en consideración está sometido a torsión y flexión; el esquema de la celda se muestra en la figura N2 1. Si se hace uso del principio de Saint-Venant, que dice que el agujero central no afecta el estado general de esfuerzos a

FIGURA Nº 1

ESQUEMA DE LA CELDA DE CARGA

 c = radio del concentrador de esfuerzos

distancias grandes, (comparadas con el diámetro del agujero), se podrán realizar ciertas simplificaciones.

Para facilitar el análisis, se hará un balance de fuerzas en el elemento con el objetivo de encontrar la distribución general de esfuerzos, y poder así determinar las posibles deformaciones que se producirán.

1.2. BALANCE DE FUERZAS

Observando el esquema del estado de esfuerzos que se encuentra en la figura N° 2, se procede a efectuar el siguiente balance de fuerzas.

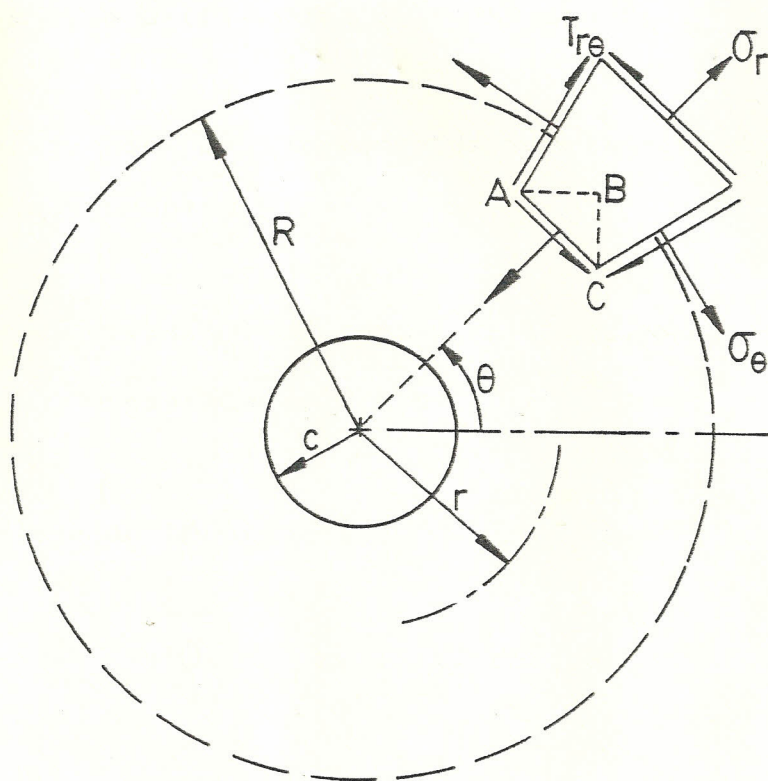
Realizando el sumatorio de fuerzas en el sentido radial, se obtiene:

$$\begin{aligned} \Sigma r = & \sigma_r \cdot AC - \sigma_x \cdot BC \cdot \cos \theta - \tau_{xy} \cdot AB \cdot \cos \theta \\ & - \tau_{xy} \cdot BC \cdot \sin \theta = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

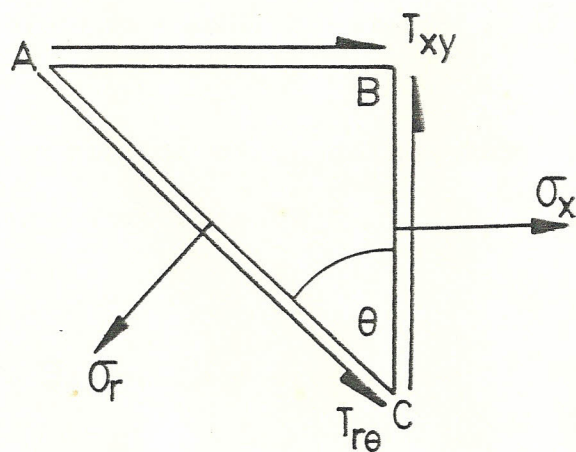
En el gráfico del estado de esfuerzos, se observa que las áreas, se relacionan entre si, de la siguiente forma :

FIGURA Nº 2

ESQUEMA DEL ESTADO DE ESFUERZOS



VECINDAD DEL CONCENTRADOR



Estado de Esfuerzos

$$AB = AC \cdot \sin \theta \quad \text{y} \quad BC = AC \cdot \cos \theta \quad (2)$$

Por lo tanto se encuentra que:

$$\Sigma r = \frac{1}{2} \sigma_x (1 + \cos 2\theta) + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3)$$

Realizando un sumatorio de fuerzas en el sentido de θ , se obtiene :

$$\begin{aligned} \Sigma \theta = & \tau_{r\theta} \cdot AC + \sigma_x \cdot BC \cdot \sin \theta + \tau_{xy} \cdot AB \cdot \sin \theta \\ & - \tau_{xy} \cdot BC \cdot \cos \theta = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Ordenando términos :

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} \sigma_x \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (5)$$

Aquí se debe notar que la distribución de esfuerzos puede ser considerada en dos partes:

a) Un esfuerzo radial constante : $\sigma_x/2$ (6)

b) Una condición variando con 2θ , que posee las siguientes ecuaciones :

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \sigma_x \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2} \sigma_x \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (8)$$

El caso (a) puede ser tratado usando las ecuaciones de Lamé. Estas son :

$$\sigma_r = A + \frac{B}{r^2} \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = A - \frac{B}{r^2} \quad (10)$$

Las condiciones de borde son :

$$\text{En } r = c \quad \sigma_r = 0$$

$$\text{En } r = R \quad \sigma_r = \sigma_x/2$$

Reemplazando en (9) y (10) las condiciones de borde, se obtiene los valores de las constantes A y B, éstas son :

$$A = \frac{1}{2} \sigma_x \left[\frac{R^2}{R^2 - c^2} \right] \quad (11)$$

$$B = - \frac{1}{2} \sigma_x \left[\frac{R^2 c^2}{R^2 - c^2} \right] \quad (12)$$

Cuando R es mucho mayor que c, entonces éstas constantes quedan de la siguiente forma :

$$A = \frac{1}{2} \sigma_x \quad (13)$$

$$B = - \frac{1}{2} \sigma_x c^2 \quad (14)$$

Al reemplazar (13) y (14) en (9) y (10), se obtiene :

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \sigma_x \left[1 - \frac{c^2}{r^2} \right] \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \sigma_x \left[1 + \frac{c^2}{r^2} \right] \quad (16)$$

Para la parte (b) se tiene un esfuerzo normal y uno cortante variando con 2θ . Esta distribución de acuerdo con la Función de Esfuerzos de Airy se ajusta a la siguiente ecuación (ecuación 23.109, tomada de HEARN, Mecánica de Materiales, volumen II) :

$$\phi = [Ar^n + \frac{B}{r^n} + Cr^{2n} + D]\cos 2\theta \quad (17)$$

donde $n = 2$

Los esfuerzos se los obtiene utilizando las siguientes ecuaciones :

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dr} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2\phi}{dr^2} \quad (18)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{d^2 \Phi}{dr^2} \quad (19)$$

$$\tau_{r\theta} = - \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d\Phi}{d\theta} \right] \quad (20)$$

Al aplicar las ecuaciones (18), (19) y (20) en la ecuación (17) se encuentra :

$$\sigma_r = - \left[2A + \frac{6B}{r^{2n}} + \frac{4D}{r^n} \right] \cos 2\theta \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta} = \left[2A + \frac{6B}{r^{2n}} + 12Cr^n \right] \cos 2\theta \quad (22)$$

$$\tau_{r\theta} = \left[2A - \frac{6B}{r^{2n}} + 6Cr^n - \frac{2D}{r^n} \right] \sin 2\theta \quad (23)$$

donde $n = 2$

Las constantes A , B , C , D , se las evalúa con las siguientes condiciones de borde :

$$\text{En } r = 0 \quad \sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$$

$$r \rightarrow \infty \quad \sigma_r = \frac{1}{2} \sigma_x \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = - \frac{1}{2} \sigma_x \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

Al reemplazar estas condiciones de borde en las ecuaciones (21), (22), (23), se encuentra :

$$A = - \left(\frac{1}{4} \sigma_x + \frac{1}{2} \tau_{xy} \tan 2\theta \right)$$

$$B = - \frac{1}{2} c^2 n \left(\frac{1}{2} \sigma_x + \tau_{xy} \tan 2\theta \right)$$

$$C = 0$$

$$D = c^2 \left(\frac{1}{2} \sigma_x + \tau_{xy} \tan 2\theta \right)$$

Finalmente con estas constantes se obtiene:

$$\sigma_r = \left(\frac{1}{2} \sigma_x + \tau_{xy} \tan 2\theta \right) \left[1 + \frac{3c^2 n}{r^2 n} - \frac{4c^2}{r^2} \right] \cos 2\theta \quad (24)$$

$$\sigma_\theta = - \left(\frac{1}{2} \sigma_x + \tau_{xy} \tan 2\theta \right) \left[1 + \frac{3c^2 n}{r^2 n} \right] \cos 2\theta \quad (25)$$

$$\tau_{r\theta} = - \left(\frac{1}{2} \sigma_x + \tau_{xy} \tan 2\theta \right) \left[1 + \frac{2c^2}{r^2} - \frac{3c^2 n}{r^2 n} \right] \sin 2\theta \quad (26)$$

donde $n=2$

Sumando la ecuación (25) y la (16), se obtiene lo siguiente :

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= - \left(\frac{1}{2} \sigma_x + \tau_{xy} \tan 2\theta \right) \left[1 + \frac{3c^2 n}{r^2 n} \right] \cos 2\theta \\ &+ \frac{1}{2} \sigma_x \left[1 + \frac{c^2}{r^2} \right] ; n = 2 \end{aligned} \quad (27)$$

La ecuación (27) muestra la distribución de esfuerzos alrededor del agujero, que es precisamente lo que interesa conocer.

Evalutando la ecuación (27) para $\theta = \pi/2$, se encuentra lo siguiente :

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2} \sigma_x \left[2 + \frac{c^2}{r^2} + \frac{3c^2 n}{r^2 n} \right] \quad (28)$$

De acuerdo con la ecuación (28) se tiene que :

$$\text{En } r = c \rightarrow \sigma_{\theta} = 3 \cdot \sigma_x$$

$$\text{En } r = 6c \rightarrow \sigma_{\theta} = \frac{1}{2} \sigma_x (2.03) \approx \sigma_x$$

Estos resultados claramente indican que es en las vecindades del agujero donde se produce la concentración de esfuerzos, por lo tanto será en las cercanías del concentrador donde se coloquen los extensómetros, con el fin de obtener una buena lectura en el instrumento medidor. (este análisis fue hecho en base a lo propuesto por HEARN, Mecánica de Materiales, paginas 707 - 711).

Continuando con el estudio de la celda de carga, PETERSON, en su libro Factores de Concentración de

Esfuerzos, analiza la geometría de la celda de carga motivo de este estudio (pags. 148 - 149). En la figura N^o 173 de dicho libro se dan los factores de concentración para la celda de carga.

En la figura antes mencionada se aprecia que lo conveniente es tener una relación del diámetro del agujero al diámetro exterior pequeña, ya que de esta forma se produce una concentración de esfuerzos mayor. En la celda de carga la relación antes mencionada es de 0.6 (45 mm / 75 mm), por lo tanto se estimó conveniente perforar un agujero que atravesase longitudinalmente a la celda de carga, para producir una mayor concentración de esfuerzos.

El siguiente paso consiste en analizar que diámetro debe poseer el nuevo agujero, y tomar una solución de compromiso entre la sensibilidad de la celda y la resistencia de la misma. Para el efecto se usarán las ecuaciones clásicas de resistencia de materiales.

1.3. ESTUDIO SEGUN RESISTENCIA DE MATERIALES

Para realizar este estudio usaremos las ecuaciones

aproximadas para flexión y torsión en ejes de sección circular.

La configuración de la celda, y sus dimensiones principales, se muestran en la figura N° 3.

Como se dijo anteriormente, la celda de carga se encuentra sometida a torsión y flexión, por lo tanto se presentará un esfuerzo cortante y un esfuerzo de flexión, que responde a las siguientes ecuaciones :

$$\text{Esfuerzo de flexión máximo} = \sigma_f = K_f * M * c / I \quad (29)$$

$$\text{Esfuerzo cortante máximo} = \tau = K_t * T * c / J \quad (30)$$

donde :

K_f , K_t = Factores de concentración de esfuerzos para flexión y torsión (Tomados de PETERSON, Factores de Concentración de Esfuerzos pags. 235 - 244).

M = Momento flector = $(F + P) * l$

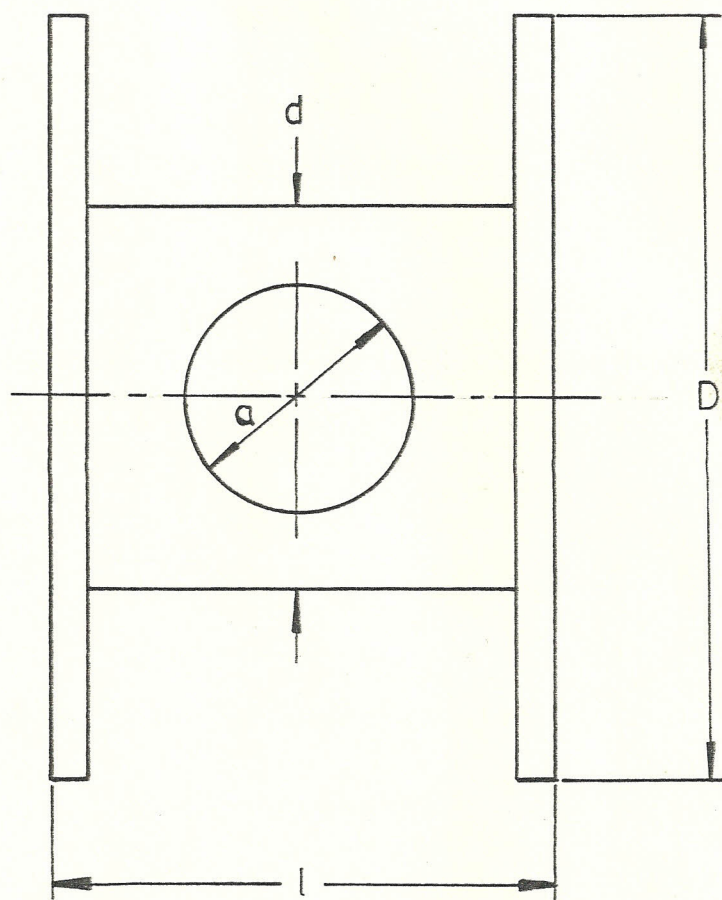
F = fuerza que produce la flexión

P = peso de la mordaza = 147 N

FIGURA Nº 3

CELDA DE CARGA Y SUS DIMENSIONES

(Configuración original)



a = Diámetro del concentrador = 45 mm

d = Diámetro del eje = 75 mm

l = Longitud de la celda de carga = 100 mm

D = Diámetro de las bridas = 150 mm

l = longitud de la celda = 100 mm

T = Torsión producida en la celda = $F \cdot L$

L = brazo de la palanca con la que se produce la torsión.

c = distancia más alejada desde la línea neutra
= $d/2$

I = Momento de inercia alrededor del eje en el que se produce la flexión.

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} - \frac{d \cdot a^3}{12} \quad (31)$$

J = Momento polar de inercia.

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} - \frac{d \cdot a^3}{12} - \frac{a \cdot d^3}{12} \quad (32)$$

En base a las ecuaciones del esfuerzo de flexión y de torsión, se puede calcular los máximos esfuerzos que se producirán, usando para este fin las ecuaciones del círculo de Mohr. Al reemplazar se obtiene :

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_f + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_f^2 + 4\tau^2)} \quad (33)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{1}{2} \sigma_f - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_f^2 + 4\tau^2)} \quad (34)$$

Con estos esfuerzos se puede calcular el factor de seguridad según la teoría de Von Mises.

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sqrt{[\sigma_{\max}^2 - \sigma_{\max} \sigma_{\min} + \sigma_{\min}^2]} \quad (35)$$

$$\text{Factor de seguridad} = S_y / \sigma_{\text{equivalente}} \quad (36)$$

S_y = Resistencia a la fluencia del material.

Para poder evaluar las deformaciones que teóricamente se producirán, debemos tener en cuenta que la disposición de extensómetros que usaremos, sensará solo torsión. Por lo tanto para efectos de cálculo, se asume un estado de corte puro.

Las deformaciones principales se calculan mediante las siguientes ecuaciones :

$$\epsilon_1 = (\sigma_1 - \mu \sigma_2) / E \quad (37)$$

$$\epsilon_2 = (\sigma_2 - \mu \sigma_1) / E \quad (38)$$

donde :

σ_1 = Esfuerzo Principal máximo

σ_2 = Esfuerzo Principal mínimo

μ = Coeficiente de Poisson = 0.33 para el acero

E = Módulo de Elasticidad = 207 MPa para el acero

Ya que sólo se medirá torsión, entonces :

σ_1 = Esfuerzo cortante máximo = τ

$\sigma_2 = -\sigma_1 = -\tau$

Finalmente las ecuaciones para el cálculo de las deformaciones principales, quedan de la siguiente forma :

$$\epsilon_1 = \tau(1 + \mu)/E \quad (39)$$

$$\epsilon_2 = -\tau(1 + \mu)/E \quad (40)$$

1.4. CALCULO DE LAS DEFORMACIONES ESPERADAS

El dispositivo objeto de este informe se ha previsto que funcionará para el siguiente rango :
de 0 - 250 Nm.

Realizaremos los cálculos para el máximo torque previsto, es decir 250 Nm. Primeramente calcularemos el esfuerzo máximo de flexión.

$$\sigma_f = K_f \cdot (F + P) \cdot l \cdot d / 2I \quad ; \quad K_f = 1.75$$

$$I = \pi \cdot d^4 / 64 - d \cdot a^3 / 12$$

$$I = \pi \cdot 75^4 / 64 - 75 \cdot 45^3 / 12 = 983624.3 \text{ mm}^4$$

$$I = 98.4 \text{ E-8 m}^4$$

$$F = T/L, \quad L = 0.65 \text{ m}$$

$$\text{Para } T = 250 \text{ Nm} \longrightarrow F = 250/0.65 = 384.6 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \sigma_f &= 1.75 \cdot (384.6 + 147.0) \cdot 0.1 \cdot 0.075 / 2 \cdot 98.4 \text{ E-8} \\ &= 3.5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\tau = K_t \cdot T \cdot d / 2J \quad ; \quad K_t = 2.8$$

$$J = \pi \cdot d^4 - a \cdot d^3 / 12 - d \cdot a^3 / 12$$

$$J = 95.5 \text{ E-8 m}^4$$

$$\tau = 2.8 \cdot 0.075 \cdot 250 / 2 \cdot 95.5 \text{ E-8} = 27.5 \text{ MPa}$$

Con los valores del esfuerzo de flexión y del esfuerzo cortante, se calculan los esfuerzos máximos y mínimos esperados, aplicando las ecuaciones (33) y (34).

$$\sigma_{\max} = 29.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = -25.7 \text{ MPa}$$

El esfuerzo equivalente, se calcula utilizando la ecuación (35) :

$$\sigma_{\text{equiv.}} = 47.5 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad se encuentra mediante la ecuación (36). Si la celda de carga está construida de acero ASSAB 705 ($S_y = 682 \text{ MPa}$), se obtiene que:

$$\text{Factor de Seguridad} = 682.0 / 47.5 = 14.3$$

Con el valor del esfuerzo cortante, y aplicando las ecuaciones (39) y (40), se calculan las deformaciones esperadas.

$$\epsilon_1 = 171 \text{ micro-metros/metro}$$

$$\epsilon_2 = -171 \text{ micro-metros/metro}$$

Esta lectura será la que se obtendrá por cada extensómetro, pero ya que éstos se conectarán en puente completo, entonces se debe multiplicar este valor por cuatro. La sensibilidad de la celda de carga, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Sensibilidad} = 250 \text{ Nm} / (4 \times 171) = 0.36 \text{ Nm}/\mu\epsilon$$

Este resultado nos indica que por cada micro-

strain ($\mu\epsilon$) podemos medir un torque de 0.36 Nm. Ya que esta sensibilidad se consideró muy pequeña, el siguiente paso es analizar la conveniencia de crear una mayor concentración de esfuerzos perforando un nuevo agujero, este análisis se describirá a continuación.

1.5. MODIFICACION REALIZADA EN LA CELDA DE CARGA CON RESPECTO A LA CONFIGURACION ORIGINAL

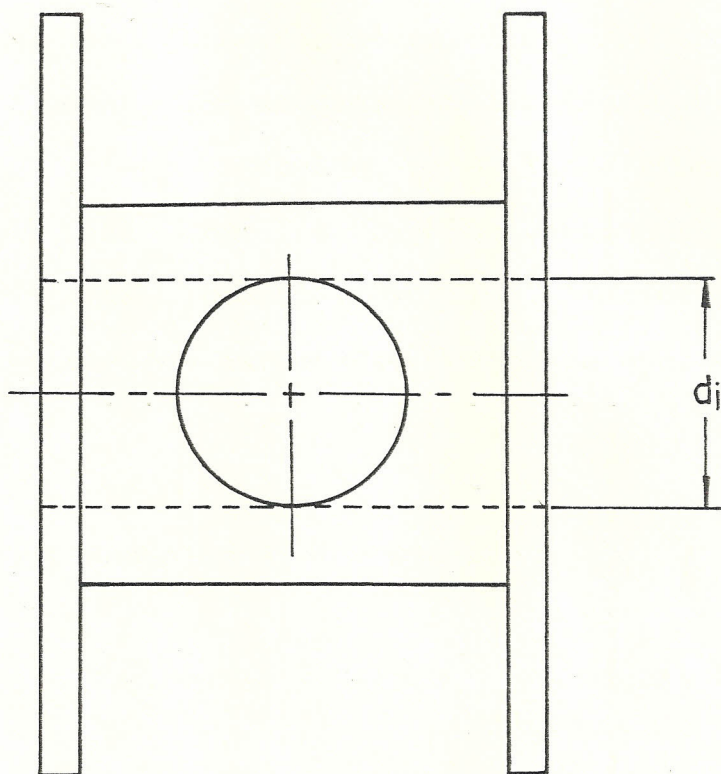
La modificación realizada sobre la configuración inicial de la celda consistió en practicarle un agujero que la atravesase longitudinalmente. A continuación se explicará como se seleccionó el diámetro del agujero.

La selección del diámetro del agujero se la hizo tratando de obtener una solución de compromiso entre la sensibilidad y la resistencia de la celda. Un esquema de la modificación realizada se muestra en la figura N24.

Los cálculos que se realizarán en esta parte son semejantes a los descritos en la sección 1.4, pero ahora se tiene una sección transversal diferente, por lo tanto lo que ha variado son los momentos de

FIGURA Nº 4

MODIFICACION DE LA CELDA DE CARGA



d_i = Diámetro interior = 45 mm

inercia y los factores de concentración de esfuerzos.

1.6. CALCULOS REALIZADOS PARA LA MODIFICACION

Luego de varios intentos de cálculo, se concluyó que un agujero con un diámetro interior, $d_i = 45$ mm, sería lo adecuado para los propósitos deseados. Los parámetros que han variado son los momentos de inercia y los factores de concentración de esfuerzos, estos se muestran a continuación.

Los nuevos momentos de inercia son :

$$I = \pi(d^4 - d_i^4)/64 - (a^3d - a^3d_i)/12$$

$$J = \pi(d^4 - d_i^4)/32 - (a*d^3 - a*d_i^3)/12$$

Los nuevos factores de concentración son :

$$K_f = 2.25 \quad ; \quad K_t = 4.65$$

Realizando el mismo proceso de cálculo descrito en la sección 1.3, y utilizando igual que antes un torque de 250 Nm, se obtienen los siguientes resultados :

$$I = 112.4 \text{ E-8 m}^4 \quad , \quad J = 115.9 \text{ E-8 m}^4$$

$$\sigma_f = 4 \text{ MPa} \quad , \quad \tau = 37.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 39.6 \text{ MPa} \quad , \quad \sigma_{\min} = 35.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{equivalente}} = 65.2 \text{ MPa}$$

$$\text{Factor de seguridad} = 682.0/65.2 = 10.4$$

Las deformaciones esperadas son :

$$\epsilon_1 = 234 \text{ micro-metros/metro}$$

$$\epsilon_2 = -234 \text{ micro-metros/metro}$$

La sensibilidad que se obtiene será entonces :

$$\text{Sensibilidad} = 250 / (4 \times 234) = 0.27 \text{ Nm}/\mu\epsilon$$

En base de este resultado se puede afirmar que la sensibilidad ha aumentado, ya que se podrá sensar torques más pequeños que con la configuración original.

El siguiente paso consiste en colocar los extensómetros y realizar las pruebas experimentales. Esto se describirá en detalle en el capítulo siguiente.

CAPITULO II

PRUEBAS EXPERIMENTALES

2.1. UBICACION DE LOS EXTENSOMETROS

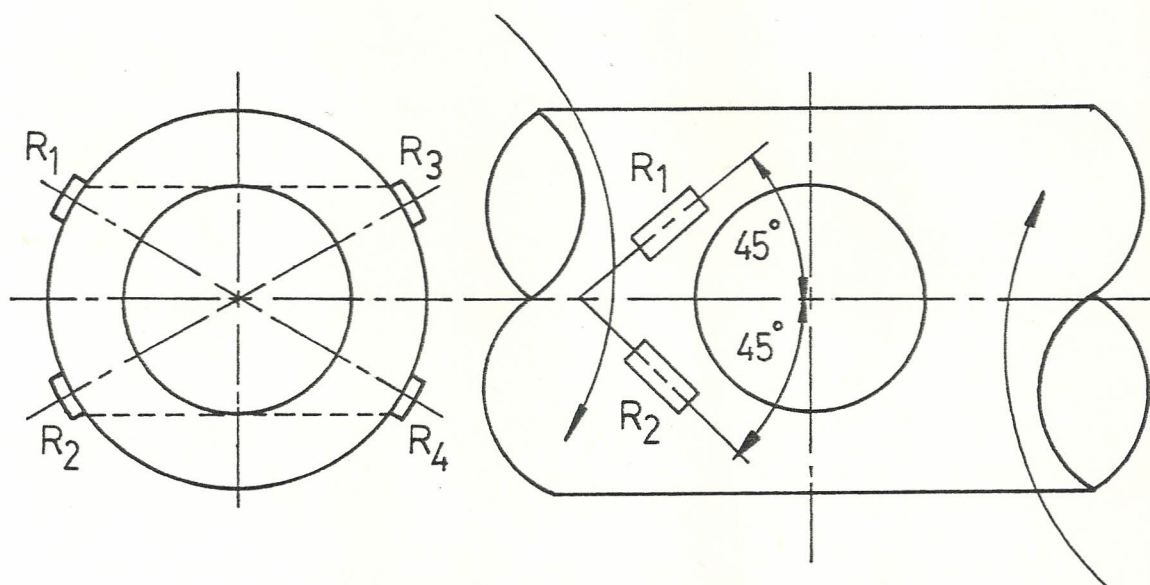
En base al análisis realizado en el capítulo anterior, se sabe que la mayor concentración de esfuerzos se produce en las cercanías del agujero. Por lo tanto los extensómetros deberán colocarse próximos a él, con el objeto de obtener una lectura de deformación apreciable.

Se decidió utilizar una disposición de extensómetros conectados en puente completo, para así obtener la máxima respuesta del puente, así como también, compensación por temperatura (tomado de FERRY, The Strain Gage Primer, pags. 204 - 207).

El arreglo de extensómetros usado es tal que solo se sensorará torsión, más no flexión. El esquema de la disposición usada y su ubicación en la celda de carga, se muestran en la figura N^o 5.

FIGURA Nº 5

UBICACION DE LOS EXTENSOMETROS



R1 y R2 ----> Ubicados en la cara anterior

R3 y R4 ----> Ubicados en la cara posterior

Para mostrar como funciona el arreglo de extensómetros usado, se utilizará la siguiente ecuación (ec. 4-15, tomada del Strain Gage Primer):

$$E_o = \frac{E R_g}{4(R+R_g)} \left[\frac{\delta R_1}{R_1} - \frac{\delta R_2}{R_2} + \frac{\delta R_3}{R_3} - \frac{\delta R_4}{R_4} \right] \quad (41)$$

La ecuación (41) indica la salida del puente de Wheatstone. En ella claramente se observa que si los extensómetros R_2 y R_4 estuviesen sujetos a deformaciones de la misma magnitud pero de signo contrario que las de R_1 y R_3 , se obtendrá una amplificación de cuatro veces en la lectura, como lo muestra la ecuación (43) :

$$\text{Si } \delta R_1 = -\delta R_2 = \delta R_3 = -\delta R_4 = \delta R \quad (42)$$

Entonces :

$$E_o = \frac{E R_g}{(R+R_g)} \left[4 \frac{\delta R}{R} \right] = \frac{E R_g}{(R+R_g)} * \frac{\delta R}{R} \quad (43)$$

De la misma forma es evidente que si R_1 y R_4 estuviesen sujetos a deformaciones de la misma magnitud de pero de signo contrario que las de R_2 y R_3 , entonces la salida del puente sería nula. Es

por esta razón que decimos que el arreglo de extensómetros usado sólo sensa torsión y no sensa la flexión.

2.2. CALIBRACION DE LA CELDA DE CARGA

Una vez establecida la ubicación y conexiones de los extensómetros, (figura Nº 5), se procedió a realizar la calibración de la celda de carga.

El objetivo de la calibración es obtener una curva que relacione el torque con la deformación. Para poder obtener esta relación se procedió a aplicar torques conocidos a la celda de carga, mediante la utilización de pesas cuya masa es conocida y con una palanca una longitud determinada. De esta forma el torque puede ser calculado a través de la siguiente ecuación :

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} \times \text{distancia} \quad (44)$$

La calibración se realizó utilizando ocho diferentes pesos. Para cada uno de ellos se obtuvo un torque determinado y se registró la respectiva lectura de deformación. Las lecturas se efectuaron en forma ascendente, es decir comenzando con el

peso más pequeño y aumentando gradualmente la carga. El esquema de la calibración se observa en la figura Nº 6.

Los resultados de la calibración y la curva obtenida se detallan seguidamente en la Tabla I y en la figura Nº 7 respectivamente.

La ecuación que relaciona el torque con la deformación, es :

$$\text{Torque (Nm)} = 1.337 * \text{deformación } (\mu\epsilon) \quad (45)$$

Nm = Newtons x metro

$\mu\epsilon$ = micro - strains = micro-metros/metro

Con el fin de mejorar la sensibilidad de la celda de carga, se decidió colocar un nuevo grupo de extensómetros en otra posición.

La ubicación seleccionada fué la parte superior del agujero que atraviesa lateralmente a la celda de carga. Se escogió esta ubicación, por ser la parte de la celda donde existe menos material y por lo tanto se puede predecir que las deformaciones serán mayores. El esquema de la

FIGURA Nº 6

ESQUEMA DE LA CALIBRACION

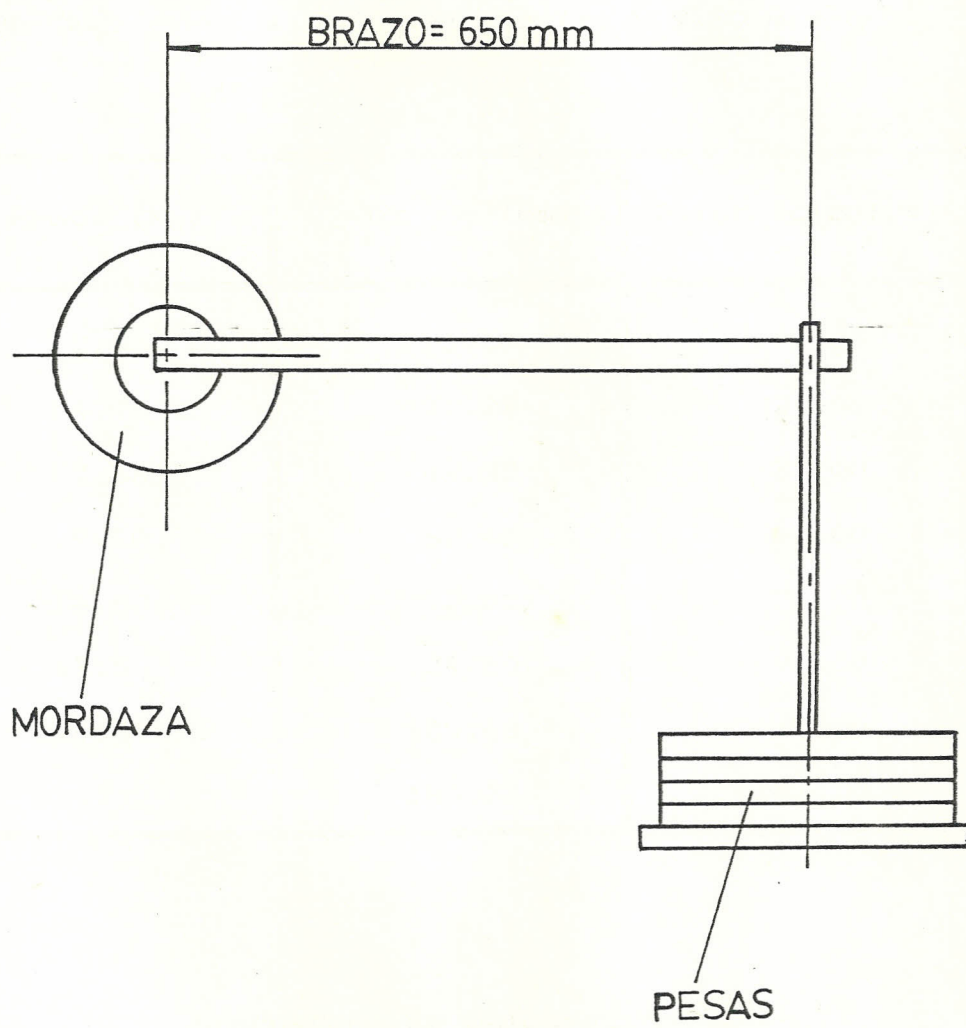


TABLA I

RESULTADOS DE LA CALIBRACION

Brazo = 0.65 metros

Torque (Nm) = Pesos (Kg) x brazo (m) x 9.80 m/seg²

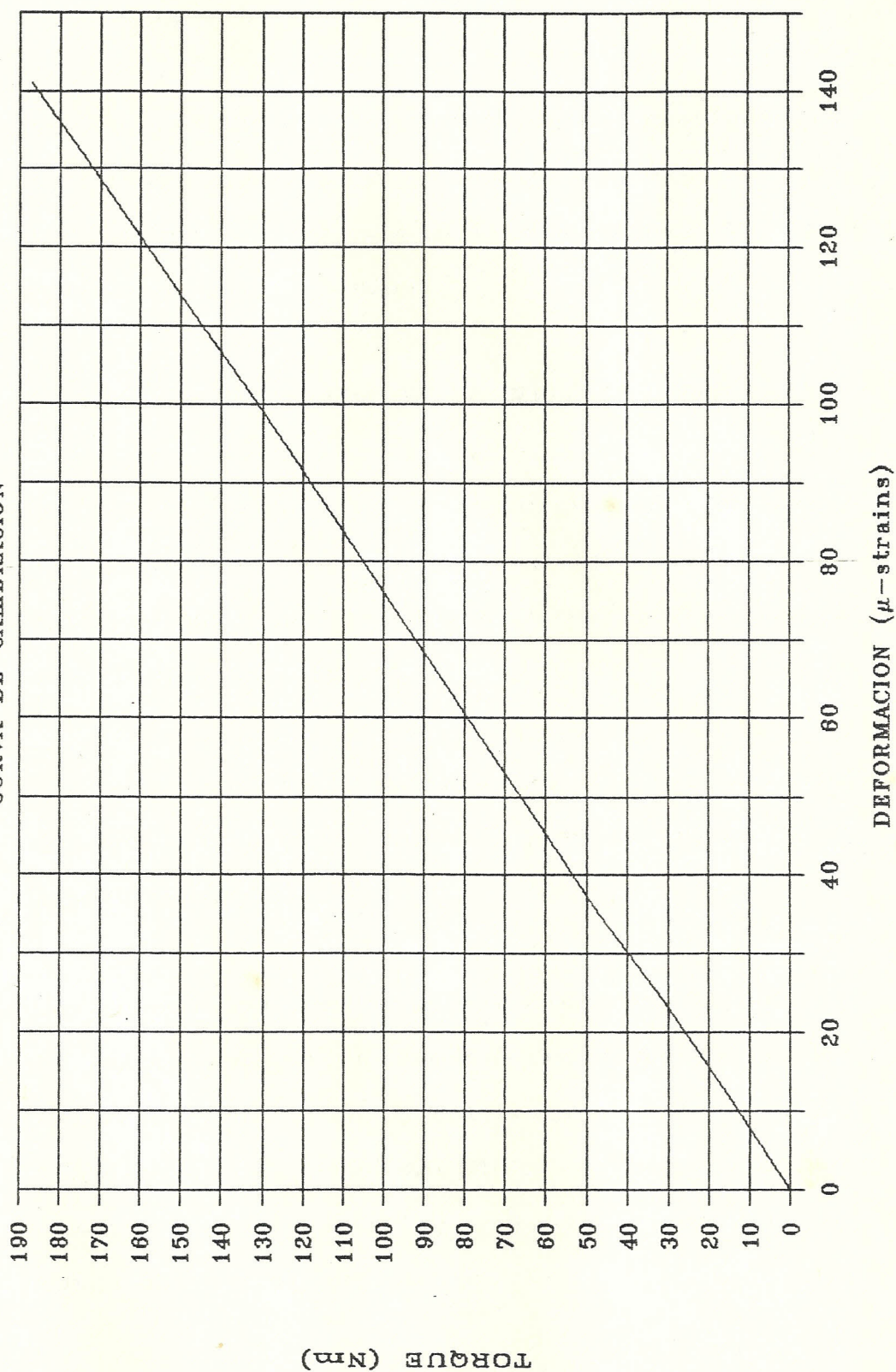
Pesos (Kg)	Torque (Nm)	Deformación(με)
2.45	15.60	12.00
4.90	31.21	24.00
7.35	46.82	35.00
9.80	62.43	47.00
14.68	93.51	71.00
19.56	124.60	95.00
24.44	155.68	118.00
29.32	186.77	141.00

Ecuación de Calibración

$$\text{Torque (Nm)} = 1.337 \times \text{Deformación } (\mu\epsilon)$$

FIGURA N^o 7

CURVA DE CALIBRACION



nueva ubicación se encuentra en la figura N^o 8.

Hay que anotar que únicamente se ha cambiado la ubicación de los extensómetros, más no su disposición en el puente de Wheatstone, ya que ésta sólo medirá torsión.

2.3. CALIBRACION DEFINITIVA DE LA CELDA DE CARGA

Una vez colocados los extensómetros en la nueva ubicación, se procedió nuevamente a realizar la calibración, de la misma forma anteriormente descrita en la sección 2.2.

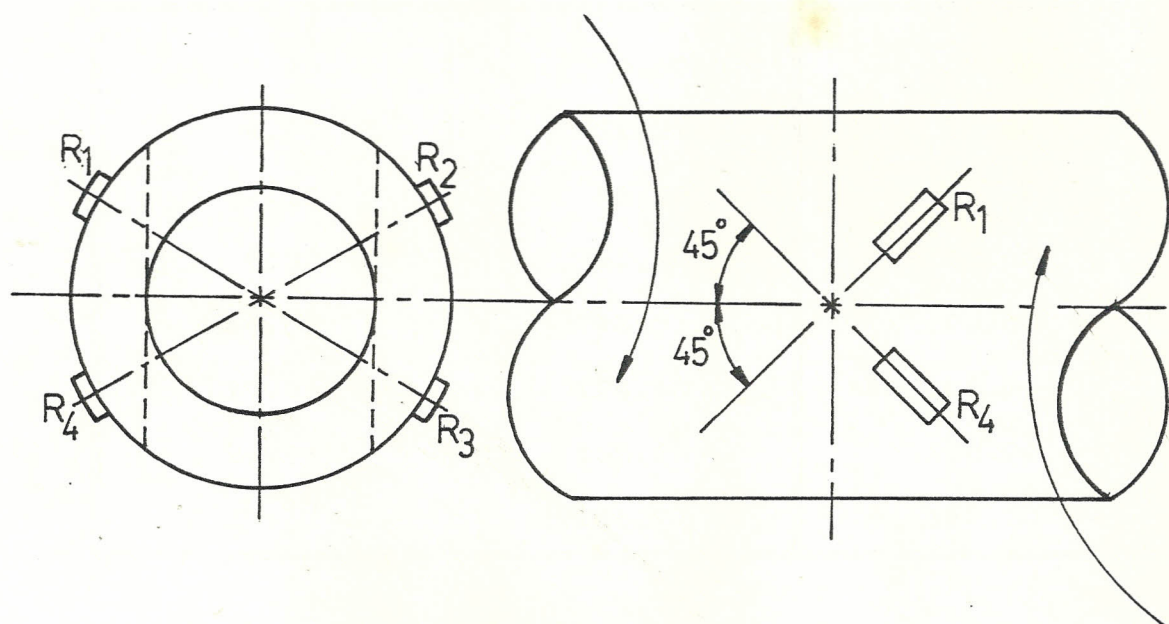
Los resultados de la calibración y la nueva curva se encuentran en la tabla II y en la figura N^o 9 respectivamente.

Los nuevos resultados muestran claramente que se ha experimentado un aumento con respecto a los valores obtenidos en la calibración anterior. El aumento es del orden del 35 %, si bien no es un aumento tan apreciable, para los fines que se busca obtener es suficiente.

La nueva ecuación que relaciona el torque con la

FIGURA Nº 8

UBICACION DEFINITIVA DE LOS EXTENSOMETROS



R1 y R4 ———> Ubicados en la cara superior

R2 y R3 ———> Ubicados en la cara inferior

TABLA II

RESULTADOS DEFINITIVOS DE LA CALIBRACION

Brazo = 0.65 metros

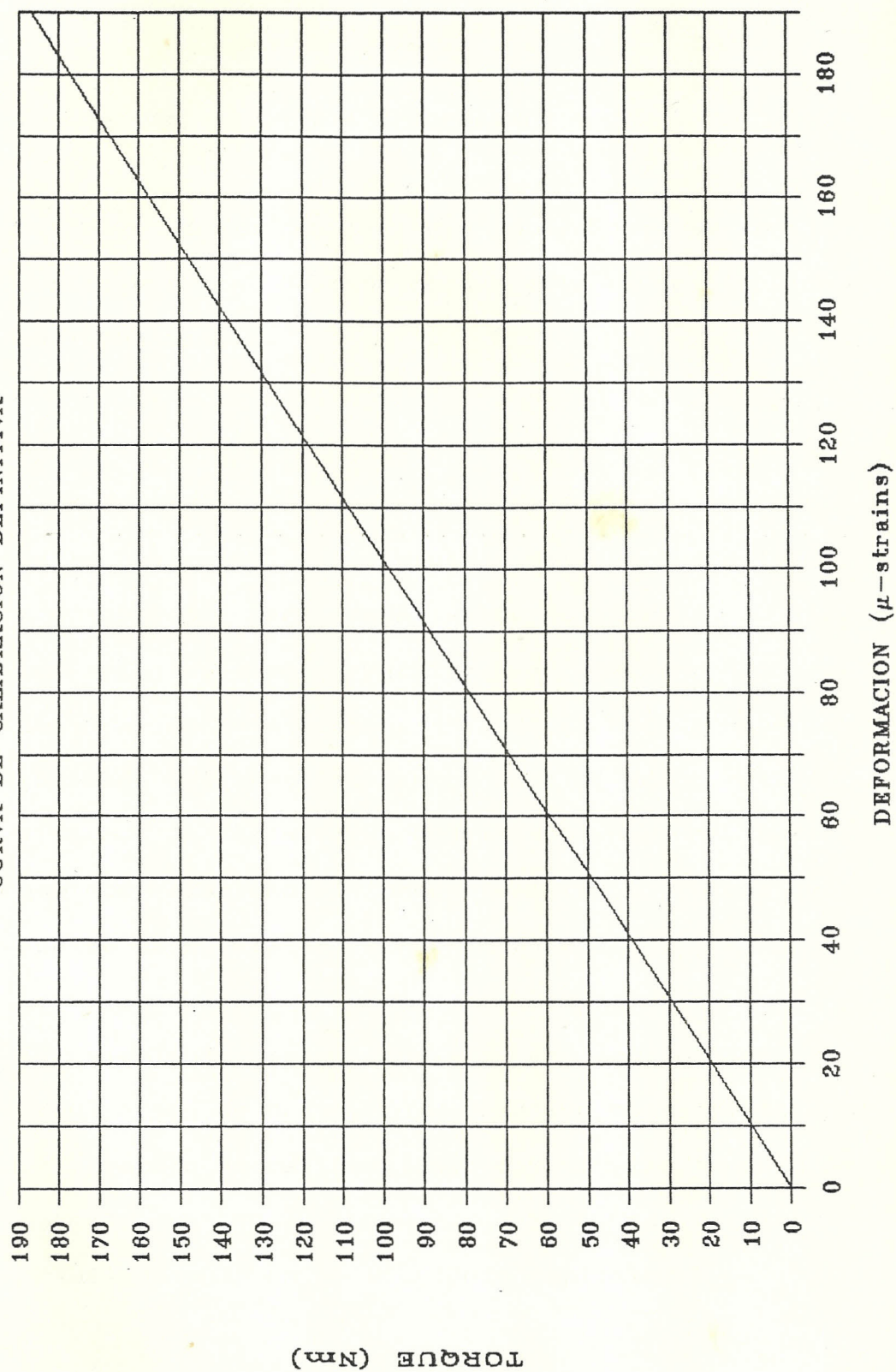
Torque (Nm) = Pesos (Kg) x brazo (m) x 9.80 m/seg²

Pesos (Kg)	Torque (Nm)	Deformación(με)
2.45	15.60	16.00
4.90	31.21	32.00
7.35	46.82	48.00
9.80	62.43	63.00
14.68	93.51	95.00
19.56	124.60	126.00
24.44	155.68	158.00
29.32	186.77	190.00

Ecuación de Calibración

$$\text{Torque (Nm)} = 0.991 \times \text{Deformación } (\mu\epsilon)$$

FIGURA N^o 9
CURVA DE CALIBRACION DEFINITIVA



deformación es :

$$\text{Torque (Nm)} = 0.991 * \text{deformación } (\mu\text{E}) \quad (46)$$

En este punto con la curva obtenida, se puede realizar la calibración de una palanca de torsión en forma manual.

Para el efecto se coloca la herramienta en la mordaza, se aplican un numero de torques, que debe estar entre 8 y 12, (para obtener resultados confiables). Para cada valor de torque de la herramienta, se registra la correspondiente lectura de deformación. Usando la ecuación de la curva de calibración, se obtiene el valor real de torque. De esta forma podemos obtener una curva que nos relacione el torque real con el torque que indica la escala de la herramienta.

El siguiente paso consiste en implementar la adquisición de datos, cuyo objetivo es automatizar el proceso de calibración, para evitar tener que hacerlo en forma manual. Esto se explicará detalladamente en el siguiente capítulo.

CAPITULO III

ADQUISICION DE DATOS

3.1. EXPLICACION DE LA ADQUISICION DE DATOS

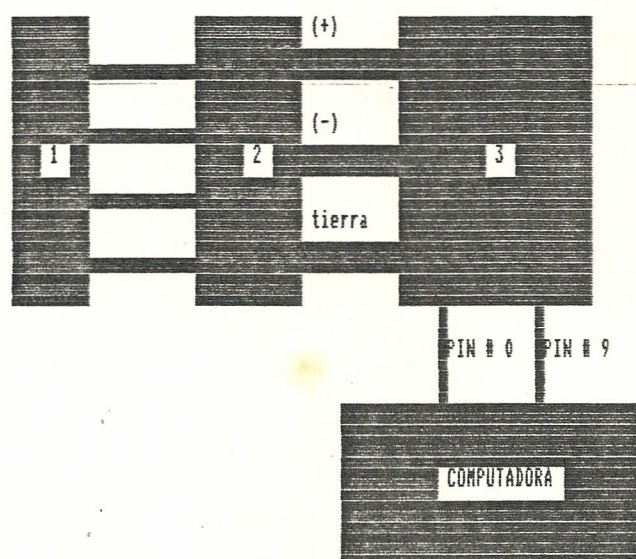
El objetivo de la adquisición de datos es efectuar la calibración de un llave de torsión, a través de el uso de una computadora.

La adquisición de datos se hará usando la salida analógica del instrumento medidor de deformaciones. Esta señal a pesar de ser amplificada por el medidor, es muy débil y la computadora no puede recibirla, por lo tanto deberá pasar a través de un amplificador. Finalmente esta señal ingresará a la computadora a través de una tarjeta que realiza la conversión de la señal analógica en señal digital.

El esquema de las conexiones de los instrumentos se encuentra en la figura N^o 10. La descripción de los mismos es la siguiente :

FIGURA Nº 10

ESQUEMA DE LOS INSTRUMENTOS



1.- Celda de carga

2.- Medidor de deformaciones

3.- Amplificador

Computador.- Tarjeta convertidora A/D (8 bits, 16 canales, medición entre 0 - 5 V)

1.- Celda de carga :

Utiliza cuatro extensómetros conectados en puente completo, la disposición de los extensómetros, mide sólo torsión.

2.- Medidor de deformaciones :

- Modelo P-3500 (Micro-Measurements)
- Rango de deformaciones = $\pm 19999 \mu\epsilon$
- Salida analógica, ajustable de $40 \mu V / \mu\epsilon$ hasta $440 \mu V / \mu\epsilon$.

3.- Amplificador :

- Amplificador de termocuplas marca OMEGA.
- Rango de amplificación: 1 - 2 - 5 - 10 - 25 - 50 y 100 veces.
- Amplificación de voltaje / voltaje y de voltaje / corriente.

4.- Computadora :

- Usa una tarjeta que realiza la conversión de la señal analógica en digital.
- La tarjeta utiliza un procesador de 8 bits y

puede recibir información a través de 16 canales.

3.2. CALIBRACION DE LA CELDA DE CARGA MEDIANTE ADQUISICION DE DATOS

Ya que la computadora es el elemento que realizará la medición, debemos calibrar la celda de carga, utilizando la lectura digital que ésta recibirá. Como se dijo en la descripción de los instrumentos, la tarjeta que realiza la conversión analógico - digital, trabaja con ocho bits, por lo tanto la máxima lectura digital que se puede recibir es 255.

La conversión de la señal analógica en digital, se realiza por medio de una comparación, entre un voltaje de referencia establecido en la tarjeta y la señal de magnitud desconocida que se recibe. A través de este proceso el voltaje es convertido en un número digital.

La calibración se hará en la misma forma descrita en el Capítulo II (sección 2.2.).

El objetivo de esta calibración es establecer una

relación entre el torque y la lectura digital recibida por la computadora. Para el efecto se utilizó un programa que se lista al final de éste capítulo.

El programa utilizado para la calibración tiene por objeto establecer cuál es la lectura digital para cada torque, a continuación se explica como funciona dicho programa :

De la linea 60 - 130 se realiza la adquisición de datos en sí. Se direccionan los puertos A, B, S, en numeración hexadecimal; a través de la orden OUT B,0 se realiza la comparación de la señal recibida, y con el comando INP(A), se recibe la señal.

Se efectúa la recepción de 500 datos, para tener una muestra confiable. Estos datos son asignados a un arreglo y ordenados, para encontrar un promedio entre el máximo y el mínimo valor registrados (lineas 140 - 190).

Finalmente el programa posee una opción si/no, para permitir la reutilización del mismo.

3.3. DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Para realizar la calibración digital, los instrumentos deben utilizarse teniendo en cuenta los siguientes aspectos :

- 1.- La celda de carga debe conectarse al medidor de deformaciones usando la conexión para puente completo.
- 2.- La salida analógica del medidor de deformaciones debe posicionarse en el punto de máxima amplificación, esto es, girando totalmente el control de regulación hacia la derecha.
- 3.- Las conexiones en el amplificador deben hacerse utilizando la polaridad adecuada. La ganancia del amplificador debe estar en 50. La amplificación debe realizarse en la modalidad voltaje / voltaje, ubicando el interruptor en la posición volt/volt.
- 4.- Las conexiones sobre la tarjeta de conversión analógico - digital, están hechas de tal forma, que la información se recibe a través

del canal cero.

Estando los instrumentos en su punto correcto, se procede a realizar la calibración. Para cada torque se registra la respectiva lectura digital. Los resultados de la calibración, se muestran en la tabla III.

Los valores de torque y lectura digital, se someten a un análisis mediante regresión lineal, para obtener la ecuación de calibración de la celda de carga en lectura digital.

3.4. PROGRAMA DE ADQUISICION DE DATOS

Como se dijo anteriormente, a través de la adquisición de datos se busca automatizar el proceso de calibración de la herramienta (llave de torsión). Para este efecto, se ha desarrollado un programa de computadora que permitirá obtener una tabla de calibración de la herramienta.

El programa, cuyo listado aparece al final de este capítulo, posee las siguientes características :

1.- El lenguaje de programación utilizado es

TABLA III

RESULTADOS DE LA CALIBRACION DIGITAL

Lectura digital	Torque (Nm)	Deformación($\mu\epsilon$)
5.00	15.60	16.00
10.00	31.21	32.00
15.50	46.82	48.00
21.00	62.43	63.00
31.50	93.51	95.00
42.00	124.60	126.00
53.00	155.68	158.00
63.00	186.77	190.00

Ecuación de Calibración

$$\text{Torque (Nm)} = 2.933 * \text{Lectura digital} + 1.215$$

BASIC. El programa está grabado bajo el nombre de "TORQUE". Ha sido diseñado de tal forma, que cualquier persona sin previos conocimientos de computación pueda usarlo.

2.- El programa arranca con una pantalla de presentación, seguidamente aparece la pantalla con el menú principal.

El menú principal consta de cuatro opciones :

a) Explicación del programa.- Aquí se dan algunas indicaciones para facilitar su uso.

b) Inicio de la calibración.- Esta opción nos introduce a la calibración propiamente dicha. El programa puede usar tres sistemas de unidades (Nm, kgm, lbpie), considerando que una llave de torsión puede poseer cualquiera de ellos. Una descripción más detallada a este respecto, aparece en la explicación del programa. El programa muestra como resultado una curva de calibración que sale graficada en pantalla y finalmente, existe la opción de imprimir una carta de calibración para la herramienta que estamos verificando.

c) Conexiones de los instrumentos.- Esta opción del programa, permite al usuario saber como deben conectarse los instrumentos, para su correcta utilización.

d) Salida del programa.- Permite una salida inmediata, una vez que el uso del programa ha concluido.

3.- Cada una de las pantallas indica claramente que hacer para continuar con la ejecución del programa. Siempre aparecen mensajes tales como "presione una tecla para continuar", ó se selecciona alguna opción con las palabras "si" y "no".

Al final de este capítulo, aparece un ejemplo de la carta de calibración obtenida, con el uso de la adquisición de datos.

El siguiente paso consiste en analizar que tan eficaz es la adquisición de datos, y si el equipo utilizado es el adecuado. Este análisis aparece en las conclusiones y recomendaciones.

RESULTADOS DE LA CALIBRACION

CARTA DE CALIBRACION

TORQUE HERRAMIENTA (N-M)	TORQUE REAL (N-M)
10.0	10.3
20.0	20.3
30.0	30.2
40.0	40.1
50.0	50.1
60.0	60.0
70.0	69.9
80.0	79.9
90.0	89.8
100.0	99.8
110.0	109.7
120.0	119.6
130.0	129.6
140.0	139.5
150.0	149.5
160.0	159.4
170.0	169.3
180.0	179.3
190.0	189.2
200.0	199.1

PROGRAMA PARA LA CALIBRACION EN LECTURA DIGITAL

```
10 SCREEN 0:WIDTH 80
20 CLS:COLOR 10:KEY OFF
30 DIM C(1000)
40 PRINT "PRESIONE UNA TECLA PARA INICIAR LA RECEPCION
50 A$=INKEY$: IF A$="" GOTO 50
55 BEEP
60 S=&HDE0+3
70 B=&HDE0+1
80 A=&HDE0+0
90 OUT S,128+16
100 FOR J=1 TO 500
110 OUT B,0
120 X=INP(A)
130 C(J)=X:NEXT J
140 MAX=0:MIN=C(1)
150 FOR J=1 TO 500
160 IF C(J)>MAX THEN MAX=C(J)
170 IF C(J)<MIN THEN MIN=C(J)
180 NEXT J:BEEP
190 PROM=(MAX+MIN)/2
200 PRINT "LECTURA DIGITAL (prom)=";PROM
210 PRINT "OTRA PRUEBA (S/N) ?"
220 A$=INKEY$ : IF A$="" GOTO 220
230 IF A$="s" GOTO 40
240 IF A$="n" GOTO 250 ELSE GOTO 220
250 END
```

LISTADO DEL PROGRAMA

```

10 DIM T(1000),TR(1000),C(1000),DIS(1000)
20 CLS:SCREEN 1:COLOR 1,1
30 KEY OFF
40 GOSUB 1850
50 LOCATE 4,7
60 PRINT "ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
70 LOCATE 6,7
80 PRINT "          DEL LITORAL
90 LOCATE 8,7
100 PRINT "        TOPICO DE GRADUACION
110 LOCATE 10,4
120 PRINT "ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS
130 LOCATE 11,4
140 PRINT "=====
150 LOCATE 13,4
160 PRINT "PROGRAMA PARA CALIBRAR PALANCAS DE
170 LOCATE 15,4
180 PRINT "TORQUE MEDIANTE ADQUISICION DE DATOS
190 LOCATE 17,4
200 PRINT "          DESARROLLADO POR:
210 LOCATE 19,4
220 PRINT "          Juan Carlos Zoller Castro
230 LOCATE 19,22
240 PRINT CHR$(148)
250 LOCATE 21,4
260 PRINT "          Septiembre 1989
270 GOSUB 1900
280 A%=INKEY$:IF A%="" GOTO 280
290 CLS:GOSUB 1850
300 LOCATE 5,4
310 COLOR 1
320 PRINT "          === MENU PRINCIPAL ===
330 LOCATE 9,5
340 PRINT "1.- EXPLICACION DEL PROGRAMA
350 LOCATE 11,5
360 PRINT "2.- INICIO DE LA CALIBRACION
370 LOCATE 13,5
380 PRINT "3.- CONEXIONES DE LOS INSTRUMENTOS
390 LOCATE 15,5
400 PRINT "4.- SALIDA DEL PROGRAMA
410 A%=INKEY$:IF A%="" GOTO 410
420 IF A%="1" GOTO 3730
430 IF A%="2" GOTO 470
440 IF A%="3" GOTO 2380
450 IF A%="4" GOTO 1990
460 GOTO 300
470 CLS:GOSUB 1850
480 LOCATE 4,4
490 PRINT "SELECCIONE EL SISTEMA DE UNIDADES
500 LOCATE 9,7

```

```

510 PRINT "1.- NEWTONS-METRO
520 LOCATE 11,7
530 PRINT "2.- KILOGRAMOS-METRO
540 LOCATE 13,7
550 PRINT "3.- LIBRAS-PIE
560 Z$=INKEY$:IF Z$="" GOTO 560
570 IF Z$="1" GOTO 1930
580 IF Z$="2" GOTO 1950
590 IF Z$="3" GOTO 1970
600 GOTO 480
610 CLS:GOSUB 1850
620 LOCATE 4,4
630 PRINT "SELECCIONE EL NUMERO DE TORQUES
640 LOCATE 5,4
650 N=0
660 INPUT"PARA LA CALIBRACION=";N
670 IF N<> INT(N) GOTO 620
680 LOCATE 7,4
690 PRINT"INGRESE DATOS EN ORDEN ASCENDENTE
700 LOCATE 8,4
710 PRINT "          (de 8 a 12 datos)
720 FOR I=1 TO N
730 LOCATE 9+I,5:PRINT I;".-"
740 LOCATE 9+I,11
750 INPUT "TORQUE =" ;T(I)
760 NEXT I
770 LOCATE 23,4
780 PRINT "SON CORRECTOS LOS DATOS (S/N) ?"
790 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 790
800 IF A$="n" GOTO 620
810 COLOR 1:CLS
820 S=&HDE0+3
830 B=&HDE0+1
840 A=&HDE0+0
850 OUT S,128+16
860 FOR I=1 TO N:CLS
870 LOCATE 4,4
880 PRINT "TORQUE A CALIBRAR=";T(I);X$
890 LOCATE 22,4
900 PRINT "PRESIONE UNA TECLA PARA EMPEZAR
910 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 910
920 BEEP
930 FOR K=1 TO 500:NEXT K
940 REM FOR J=1 TO 500
950   OUT B,0
960   X=INP(A)
970   C(J)=X
980 REM NEXT J
990 MAX=0:MIN=C(1)
1000 REM FOR J=1 TO 500

```

```

1010 IF C(J)>MAX THEN MAX=C(J)
1020 IF C(J)<MIN THEN MIN=C(J)
1030 REM NEXT J
1040 LOCATE 8,4
1050 INPUT "LECTURA DIGITAL=";PROM
1060 REM PROM=(MAX+MIN)/2
1070 LOCATE 10,4
1080 PRINT "LECTURA DIGITAL PROMEDIO=";PROM
1090 DIG(I)=PROM
1100 TORQUE = PEND*PROM+INTE
1110 LOCATE 6,4
1120 PRINT "TORQUE REAL=";TORQUE;X$
1130 LOCATE 22,4
1140 PRINT " PRESIONE UNA TECLA PARA CONTINUAR
1150 LOCATE 14,4
1160 IF I=N THEN PRINT "===== FIN DE LA CALIBRACION =====
1170 TR(I)=TORQUE
1180 DIF=ABS ((TR(I)-T(I))/T(I))*100
1190 LOCATE 12,4
1200 PRINT "ERROR = "
1210 LOCATE 12,13
1220 PRINT USING "#####.##";DIF:LOCATE 12,20:PRINT " %"
1230 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 1230
1240 NEXT I
1250 REM ----- graficacion -----
1260 GOSUB 2080
1270 REM regresion lineal
1280 CLS:S=0:T=0:V=0:U=0
1290 FOR I=1 TO N
1300 S=S+T(I)
1310 T=T+TR(I)
1320 U=U+T(I)*TR(I)
1330 V=V+T(I)^2
1340 NEXT I
1350 D=S^2-N*V
1360 M=(S*T-N*U)/D
1370 B=(S*U-V*T)/D
1380 CLS:W=0
1390 REM ecuacion de calibracion de la herramienta
1400 REM seleccion de los intervalos en la tabla
1410 COLOR 2:FOR K=1 TO 1000:NEXT K
1420 LOCATE 3,4
1430 PRINT "SELECCIONE LOS DATOS PARA LA CARTA DE CALIBRACION
1440 LOCATE 12,4
1450 INPUT "MAXIMO TORQUE EN LA CARTA=";TMAXIMO
1460 LOCATE 15,4
1470 INPUT "INTERVALOS EN LA CARTA=";INTERVALOS
1480 CLS:W=7
1490 FOR I=1 TO 79:LOCATE 1,I
1500 PRINT CHR$(223):NEXT I

```



```

1510 LOCATE 2,5
1520 PRINT "          CARTA DE CALIBRACION
1530 FOR I=1 TO 79:LOCATE 3,I
1540 PRINT CHR$(220):NEXT I
1550 FOR X=INTERVALOS TO TMAXIMO STEP INTERVALOS
1560 IF W=19 THEN GOSUB 2040
1570 W=W+1
1580 THERR=M*X+B
1590 LOCATE 5,9:PRINT "  TORQUE HERRAMIENTA
1600 LOCATE 6,15:PRINT X$
1610 LOCATE 5,40:PRINT "    TORQUE REAL
1620 LOCATE 6,46:PRINT X$
1630 LOCATE W,16
1640 PRINT USING "#####.##";X
1650 LOCATE W,46
1660 PRINT USING "#####.##";THERR
1670 NEXT X
1680 LOCATE 23,4
1690 PRINT "  DESEA OBSERVAR LOS RESULTADOS NUEVAMENTE (S/N) "
1700 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 1700
1710 IF A$="s" GOTO 1480
1720 LOCATE 23,4
1730 PRINT "  QUIERE UNA IMPRESION DE LOS RESULTADOS (S/N) "
1740 A$=INPUT$(1)
1750 IF A$="s" GOTO 4330
1760 IF A$="n" GOTO 1770 ELSE 1740
1770 LOCATE 23,4
1780 PRINT "  QUIERE OBSERVAR LA CURVA DE CALIBRACION NUEVAMENTE (S/N) ? "
1790 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 1790
1800 IF A$="s" THEN GOSUB 2080
1810 LOCATE 23,4:FOR K=1 TO 1000:NEXT K
1820 PRINT "          PRESIONE UNA TECLA PARA RETORNAR AL MENU "
1830 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 1830
1840 GOTO 290
1850 SCREEN 1:LINE(0,0)-(320,10),2,BF
1860 LINE(0,189)-(320,199),2,BF
1870 LINE(0,0)-(10,199),2,BF
1880 LINE(310,0)-(320,199),2,BF
1890 RETURN
1900 LOCATE 23,4
1910 PRINT "  presione una tecla para continuar
1920 RETURN
1930 PEND=2.933:INTE=1.215:X$="  (N-M)"
1940 GOTO 610
1950 PEND=.299:INTE=.124:X$="  (KG-M)"
1960 GOTO 610
1970 PEND=2.159:INTE=.894:X$="(LB-PIE)"
1980 GOTO 610
1990 CLS
2000 SCREEN 0:WIDTH 80

```

```

2010 FOR I=1 TO 1000:NEXT I
2020 LOCATE 15,25:PRINT "***** FIN DEL PROGRAMA *****"
2030 END
2040 LOCATE 23,4:W=7
2050 PRINT "          === PRESIONE UNA TECLA PARA SEGUIR ==="
2060 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 2060
2070 CLS:RETURN
2080 CLS:SCREEN 0:SCREEN 2
2090 REM ejes coordenados
2100 LINE (100,170)-(101,0),,BF
2110 LINE (100,170)-(640,171),,BF
2120 X1=100:Y1=170
2130 FOR I=1 TO N
2140 X2=INT(500*T(I)/T(N))+100
2150 Y2=INT(170-150*TR(I)/TR(N))
2160 Q=INT(500*T(I)/T(N))+100
2170 R=INT(170-TR(I)*150/TR(N))
2180 LINE (Q,170)-(Q+2,164),,BF
2190 LINE (100,R)-(112,R+1),,BF
2200 LINE (X1,Y1)-(X2,Y2)
2210 X1=X2:Y1=Y2
2220 H=62*T(I)/T(N)+11
2230 V=21-18*TR(I)/TR(N)
2240 LOCATE 23,H:PRINT USING "####.#";T(I)
2250 LOCATE V,4:PRINT USING "####.#";TR(I)
2260 NEXT I
2270 LOCATE 1,38
2280 PRINT "CURVA DE CALIBRACION"
2290 LOCATE 1,4:PRINT "TORQUE REAL";X$
2300 LOCATE 18,63:PRINT "TORQUE HERRAMIENTA"
2310 LOCATE 19,63:PRINT "      ";X$
2320 LINE (300,25)-(475,50),1,B
2330 LOCATE 5,40:PRINT " PRESIONE UNA TECLA"
2340 LOCATE 6,40:PRINT " PARA CONTINUAR"
2350 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 2350
2360 SCREEN 0:WIDTH 80
2370 RETURN
2380 CLS:SCREEN 0:WIDTH 80
2390 FOR K=1 TO 1000:NEXT K
2400 LOCATE 1,20
2410 REM PRINT "          ESQUEMA DE LAS CONEXIONES"
2420 LOCATE 2,20
2430 REM PRINT "          ====="
2440 COLOR 15
2450 FOR I=6 TO 14
2460 FOR J=1 TO 8
2470 LOCATE 10,4:PRINT " 1 "
2480 LOCATE I,J
2490 PRINT CHR$(219)
2500 NEXT J:NEXT I

```

```
2510 FOR J=9 TO 19
2520 COLOR 4:LOCATE 7,J
2530 PRINT CHR$(220)
2540 COLOR 9:LOCATE 9,J
2550 PRINT CHR$(220)
2560 COLOR 6:LOCATE 11,J
2570 PRINT CHR$(220)
2580 COLOR 2:LOCATE 13,J
2590 PRINT CHR$(220):NEXT J
2600 COLOR 14
2610 FOR J= 6 TO 14
2620 FOR I=20 TO 30
2630 LOCATE J,I
2640 PRINT CHR$(219)
2650 LOCATE 10,25:PRINT " 2 "
2660 NEXT I:NEXT J
2670 FOR I=31 TO 41
2680 COLOR 4
2690 LOCATE 6,32
2700 PRINT "(+)"
2710 LOCATE 7,I
2720 PRINT CHR$(219)
2730 COLOR 9
2740 LOCATE 9,32
2750 PRINT "(-)"
2760 COLOR 9
2770 LOCATE 10,I
2780 PRINT CHR$(219)
2790 COLOR 2
2800 LOCATE 12,32
2810 PRINT "tierra"
2820 COLOR 2
2830 LOCATE 13,I:PRINT CHR$(219)
2840 NEXT I
2850 COLOR 10
2860 FOR I=6 TO 14
2870 FOR J=41 TO 60
2880 LOCATE 10,50:PRINT " 3 "
2890 LOCATE I,J
2900 PRINT CHR$(219)
2910 NEXT J:NEXT I
2920 FOR I=15 TO 18
2930 COLOR 9:LOCATE 16,46:PRINT "PIN # 0"
2940 LOCATE I,45:PRINT CHR$(219)
2950 COLOR 4:LOCATE 16,56:PRINT "PIN # 9"
2960 LOCATE I,55:PRINT CHR$(219)
2970 NEXT I
2980 COLOR 12:FOR I=18 TO 22
2990 FOR J=35 TO 65
3000 LOCATE 20,45
```

```

3010 PRINT " COMPUTADORA "
3020 LOCATE 1,J:PRINT CHR$(219)
3030 NEXT J:NEXT I
3040 LOCATE 23,5
3050 REM PRINT "      ***** PRESIONE UNA TECLA PARA CONTINUAR *****
3060 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 3060
3070 CLS:COLOR 2
3080 LOCATE 1,10
3090 PRINT "      DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS
3100 LOCATE 2,10
3110 PRINT "      =====
3120 LOCATE 4,1
3130 PRINT "1.- CELDA DE CARGA :
3140 LOCATE 6,5
3150 PRINT "-UTILIZA CUATRO EXTENSOMETROS CONECTADOS EN PUENTE COMPLETO
3160 LOCATE 8,5
3170 PRINT "-LA DISPOSICION DE LOS EXTENSOMETROS SENSASOLO TORSION
3180 LOCATE 10,1
3190 PRINT "2.- MEDIDOR DE DEFORMACION :
3200 LOCATE 12,5
3210 PRINT "-ESPECIFICACIONES
3220 LOCATE 14,5
3230 PRINT "-SE UTILIZA LA SALIDA ANALOGICA DEL INSTRUMENTO SELECCIONANDO
3240 LOCATE 16,5
3250 PRINT " LA AMPLIFICACION EN POSICION MAXIMA
3260 LOCATE 18,1
3270 PRINT "3.- AMPLIFICADOR :
3280 LOCATE 20,5
3290 PRINT "-AMPLIFICADOR DE TERMOCUPLAS MARCA OMEGA
3300 LOCATE 23,20
3310 PRINT "***** PRESIONE UNA TECLA PARA CONTINUAR *****
3320 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 3320
3330 CLS:LOCATE 4,5
3340 PRINT "-SELECCIONE LA GANANCIA DEL AMPLIFICADOR EN 50
3350 LOCATE 6,5
3360 PRINT "-POSICIONE EL INTERRUPTOR EN LA POSICION VOLT/VOLT
3370 LOCATE 9,5
3380 PRINT "4.- COMPUTADORA :
3390 LOCATE 11,5
3400 PRINT "-LA RECEPCION DE LA SENAL SE HACE A TRAVES DE UNA TARJETA DE CONVER-

3410 LOCATE 11,27:PRINT CHR$(165):LOCATE 13,5
3420 PRINT " SION ANALOGICO A DIGITAL DE 8 BITS Y 16 CANALES. SE RECIBE LA SENAL

3430 LOCATE 13,70:PRINT CHR$(165):LOCATE 15,5
3440 PRINT " A TRAVES DEL CANAL # 1. ESTA TARJETA PUEDE MEDIR ENTRE 0 Y +5 VOLTS

3450 LOCATE 17,5
3460 PRINT " SOLO PUEDEN MEDIRSE VALORES POSITIVOS, LA MINIMA LECTURA QUE SE PUE

```



```

3470 LOCATE 19,5
3480 PRINT " DE REALIZAR ES DE 19 mV.
3490 LOCATE 23,10
3500 PRINT "**** PRESIONE UNA TECLA PARA RETORNAR AL MENU ****
3510 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 3510
3520 GOTO 290
3530 CLS:SCREEN 2:SCREEN 0:COLOR 7
3540 FOR K=1 TO 1000:NEXT K
3550 LOCATE 1,1
3560 PRINT CHR$(201)
3570 LOCATE 1,78
3580 PRINT CHR$(187)
3590 LOCATE 23,1
3600 PRINT CHR$(200)
3610 LOCATE 23,78
3620 PRINT CHR$(188)
3630 FOR I=2 TO 77
3640 LOCATE 1,I
3650 PRINT CHR$(205):NEXT I
3660 FOR I=2 TO 77:LOCATE 23,I
3670 PRINT CHR$(205):NEXT I
3680 FOR I=2 TO 22:LOCATE 1,1
3690 PRINT CHR$(186):NEXT I
3700 FOR I=2 TO 22:LOCATE 1,78
3710 PRINT CHR$(186):NEXT I
3720 RETURN
3730 CLS:COLOR 7
3740 GOSUB 3530
3750 COLOR 10:LOCATE 3,15
3760 PRINT " ===== EXPLICACION DEL PROGRAMA ====="
3770 LOCATE 7,5
3780 PRINT "ESTE PROGRAMA HA SIDO CONCEBIDO DE TAL FORMA QUE PUEDA SER UTILIZADO

3790 LOCATE 9,5
3800 PRINT "POR CUALQUIER PERSONA SIN PREVIOS CONOCIMIENTOS DE PROGRAMACION DE

3810 LOCATE 11,5
3820 PRINT "COMPUTADORES.
3830 LOCATE 14,5
3840 PRINT "LA UTILIDAD FUNDAMENTAL DE ESTE PROGRAMA ES PERMITIR LA CALIBRACION
3850 LOCATE 16,5
3860 PRINT "DE PALANCAS DE TORSION, Y PERMITIR DE ESTA FORMA ESTABLECER LA PRECI

3870 LOCATE 18,5
3880 PRINT "SION DE DICHA HERRAMIENTA O HABILITAR UNA QUE ESTUVIESE INSERVIBLE.
3890 GOSUB 4250
3900 CLS:COLOR 7
3910 GOSUB 3530
3920 LOCATE 4,5
3930 PRINT "-PARA REALIZAR LA CALIBRACION DE LA HERRAMIENTA, SE DEBE SELECCIONAR

```

```

3940 LOCATE 6,5
3950 PRINT " EL SISTEMA DE UNIDADES QUE POSEE LA ESCALA DE LA HERRAMIENTA.
3960 LOCATE 9,5
3970 PRINT "-SE RECOMIENDA SELECCIONAR ENTRE 8 Y 12  DATOS PARA  LA CALIBRACION,

3980 LOCATE 11,5
3990 PRINT " DE ESTA FORMA SE OBTENDRAN RESULTADOS MAS CONFIABLES, LOS RANGOS DE

4000 LOCATE 13,5
4010 PRINT " TORSION PARA OBTENER BUENOS RESULTADOS SON :
4020 LOCATE 15,15
4030 PRINT "(0 - 250)  NEWTONS x METRO
4040 LOCATE 17,15
4050 PRINT "(0 - 30 )  KILOGRAMOS x METRO
4060 LOCATE 19,15
4070 PRINT "(0 - 200)  LIBRAS x PIE
4080 GOSUB 4250
4090 CLS:GOSUB 3530
4100 COLOR 10:LOCATE 4,5
4110 PRINT "-NO SE DEBEN UTILIZAR TORQUES DEMASIADO CERCANOS A CERO, YA QUE ESTO

4120 LOCATE 6,5
4130 PRINT " PRODUCIRA ERRORES, ES ACONSEJABLE INICIAR LA  CALIBRACION  DESDE UN

4140 LOCATE 8,5
4150 PRINT " PUNTO POR LO MENOS LEJAND UN 10 % DEL CERO.
4160 LOCATE 11,5
4170 PRINT "-PARA OBTENER LA CARTA DE CALIBRACION, SE DEBE INTRODUCIR COMO DATOS

4180 LOCATE 13,5
4190 PRINT " EL MAXIMO TORQUE EN LA ESCALA, Y COMO INTERVALO, LA MINIMA DIVISION

4200 LOCATE 15,5
4210 PRINT " DE LA HERRAMIENTA EN CUESTION.
4220 LOCATE 18,5
4230 PRINT "## NOTA : LAS OPCIONES (S/N) FUNCIONAN SOLO CON LETRAS MINUSCULAS
4240 GOTO 4290
4250 LOCATE 21,10
4260 PRINT "  ##### PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR  #####
4270 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 4270
4280 RETURN
4290 COLOR 9:LOCATE 21,10
4300 PRINT "  =====>> PRESIONE UNA TECLA PARA RETORNAR AL MENU
4310 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 4310
4320 GOTO 290
4330 CLS:COLOR 10

4340 LPRINT "                                CARTA DE CALIBRACION
4350 LPRINT "
4360 LPRINT "                                TORQUE HERRAMIENTA                                TORQUE REAL"
4370 LPRINT "                                ";X$;"                                ";X$
4380 LPRINT "

```

4390 FOR X=INTERVALS TO TMAXIMO STEP INTERVALS

4400 THERR = M*X + B

4410 LPRINT USING "

#####.4

#####.4"

;X,THERR

4420 LPRINT "

4430 NEXT X

4440 GOTO 1770

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En base de los resultados de este trabajo, se puede afirmar :

- 1.- Se ha cumplido con el objetivo que se planteó al iniciar el presente trabajo. Es decir el dispositivo calibrador funciona eficazmente para el propósito para el cual fue diseñado.
- 2.- La celda de carga posee una respuesta de tipo lineal, es decir, existe una total proporcionalidad entre el torque y la deformación.
- 3.- Ya que el comportamiento de la celda de carga es lineal, podemos con la curva de calibración, extrapolar valores de torque mucho mayores a aquellos con los que ésta se realizó.
- 4.- En cuanto a resistencia mecánica se refiere, la celda de carga superó en mucho a lo que teóricamente se esperaba obtener. Los cálculos

realizados teóricamente, arrojaban un factor de seguridad del orden de 10, para un torque de 250 Nm. Los resultados experimentales superan ampliamente este resultado teórico.

5.- Las deformaciones que se obtuvieron experimentalmente, fueron mucho menores que las calculadas utilizando las ecuaciones de Resistencia de Materiales. Esto demuestra cuán aproximadas son éstas, para la configuración de la celda de carga motivo del presente informe.

6.- La modificación efectuada con respecto a la configuración original de la celda de carga, fué acertada. Si ésta no se hubiese realizado, las deformaciones obtenidas, habrían sido demasiado pequeñas para el rango de torque en el que se trabajó (0 - 250 Nm).

7.- El dispositivo calibrador, puede funcionar en dos modalidades: Utilizando unicamente el medidor de deformaciones, para realizar la calibración en forma manual, o bien puede usarse el computador, y relizar dicha calibración en forma automática con el empleo de la adquisición de datos.

8.- Los resultados que se obtienen usando la adquisición de datos, no son muy confiables cuando se utilizan torques que se encuentran algo cercanos a cero. Debido al hecho que el amplificador utilizado, no es adecuado, ya que la amplificación no es muy precisa.

Para una misma señal del medidor de deformaciones, el amplificador envía al computador una señal que no es constante. Por lo tanto la calibración posee un cierto grado de error. Dicho error se observa en el ejemplo de calibración que aparece en el Capítulo III.

Para este ejemplo, se usaron los mismos torques utilizados en la calibración tanto manual, como digital. Se observa que para torques pequeños, el error es de aproximadamente un cinco por ciento, mientras que para torques mayores, el error es menor al uno por ciento.

En la curva de calibración se evidencia la existencia de un intercepto, esto significa que a pesar de que la señal es nula, ya hay un torque presente. Nuevamente este efecto es ocasionado por el error que introduce el amplificador.

9.- La tarjeta que realiza la conversión de la señal analógica en digital, posee la capacidad de realizar mediciones entre 0 y +5 voltios, pero el amplificador utilizado puede enviar un voltaje máximo de 2 voltios. Por lo tanto significa que se está utilizando la tarjeta a menos del 50 por ciento de su capacidad. Por esta razón se introduce un error.

10.- Finalmente el dispositivo calibrador, puede ser usado eficazmente en condiciones de laboratorio, siendo más confiable la calibración en forma manual que utilizando la computadora. Sin embargo el proceso de adquisición puede mejorarse si se usa un amplificador que se ajuste a nuestros requerimientos de precisión.

RECOMENDACIONES

Basándonos en las ventajas y desventajas que presenta el dispositivo calibrador, se plantean las siguientes recomendaciones:

1.- El bastidor que soporta el dispositivo calibrador, debe anclarse a tierra, para evitar, que al aplicar

torques elevados, éste llegue a voltearse y ocasione molestias en el proceso de calibración.

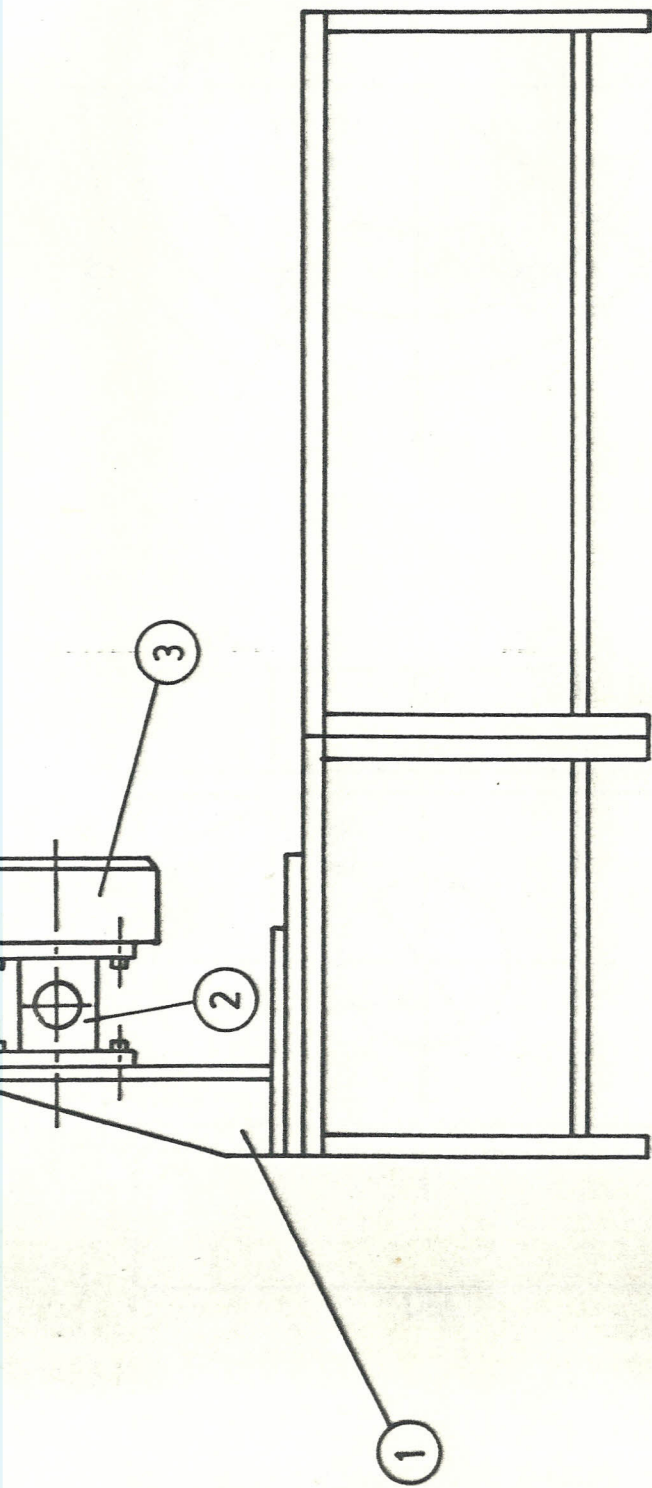
2.- El proceso de amplificación de la señal enviada por el medidor de deformaciones, debe mejorarse. El amplificador usado, no es el adecuado para el efecto. Su uso fue improvisado, debido a la inexistencia de un equipo más adecuado.

3.- Finalmente, debe estudiarse la posibilidad de construir un instrumento, que reemplace al medidor de deformaciones y al amplificador. Y que a su vez automáticamente balancee el puente de Wheatstone, realizando la amplificación de la señal, en los niveles adecuados, para los propósitos que se busca obtener.

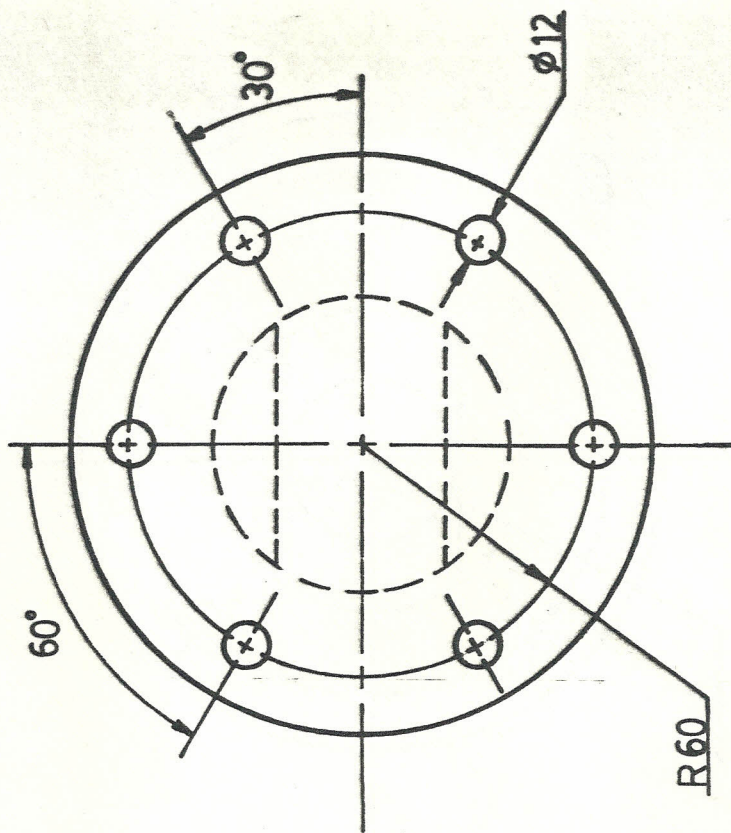
A P E N D I C E S

A P E N D I C E A

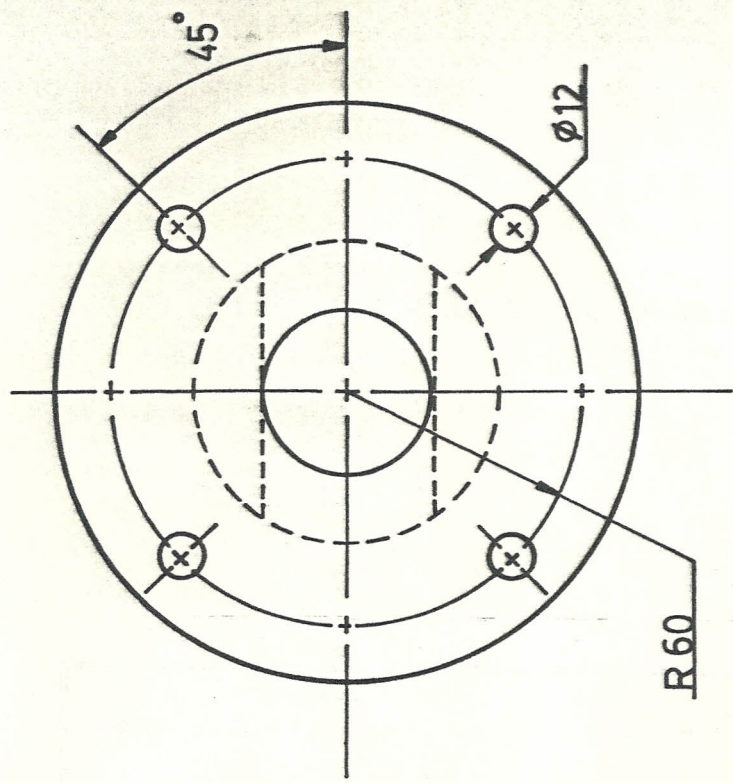
PLANOS DEL DISPOSITIVO



No.	Denominación	Cant.	Material
1	Bastidor o Soporte	1	Plancha de Acero
2	Celda de carga	1	Acero ASSAB 705
3	Mordaza	1	Hierro Fundido Gris ASTM-40
	Fecha	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Dib.	C. Zoller		
Rev.	Urquiza		
Comp.			
DISPOSITIVO CALIBRADOR			ESPOL



Material: ACCA B 708



A P E N D I C E B

ESPECIFICACIONES DE LA CELDA DE CARGA

Peso : 2.41 Kg

Dimensiones :

Longitud = 100 mm

Diámetro = 75 mm

Sensibilidad : 0.991 Newtons x metro

Resolución : 1.010 micro-strains

Extensómetros :

Serie : EA - 06 - 120 LZ - 120

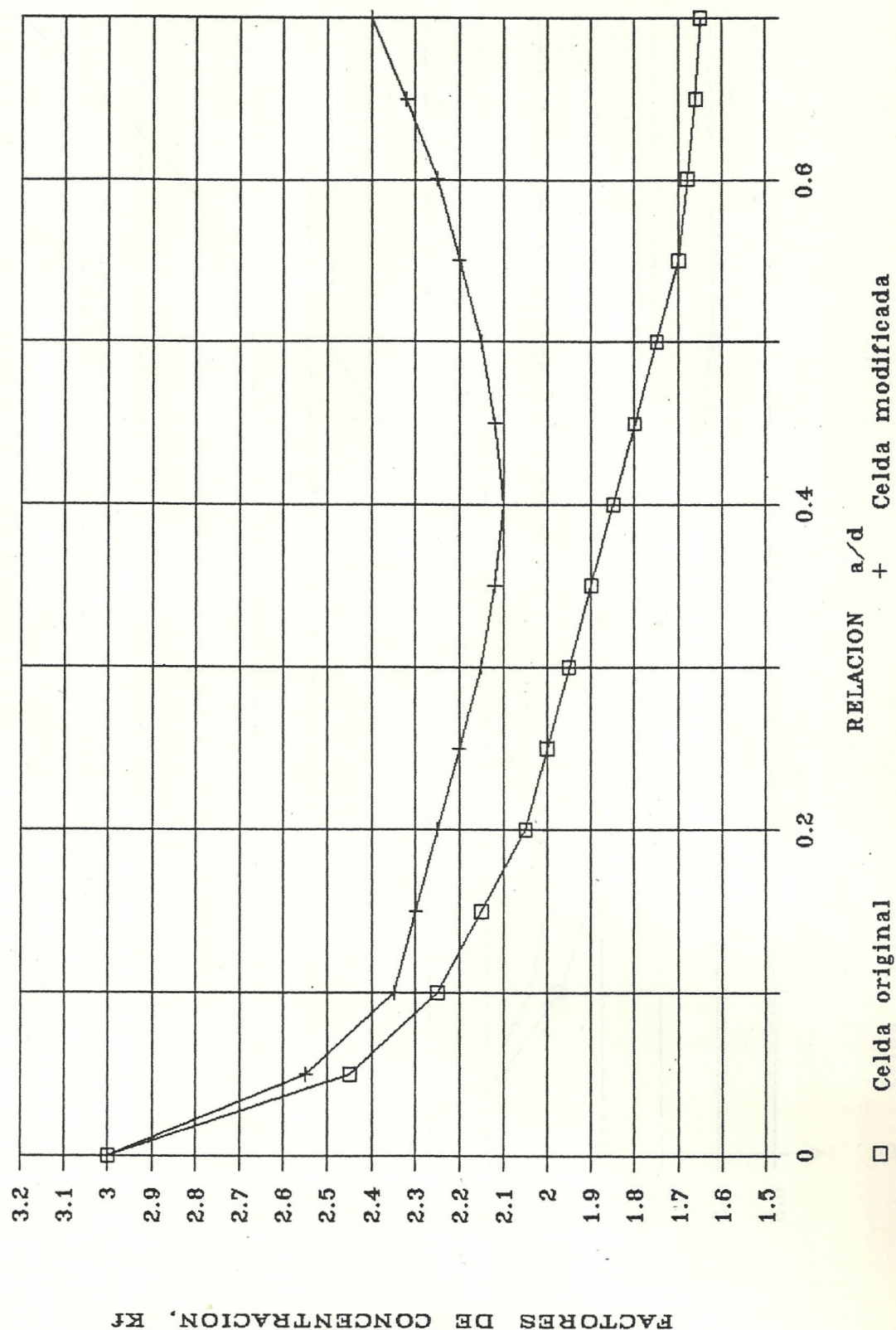
Resistencia : $120 \pm 0.3\% \Omega$

Factor del medidor : $2.05 \pm 0.5\%$

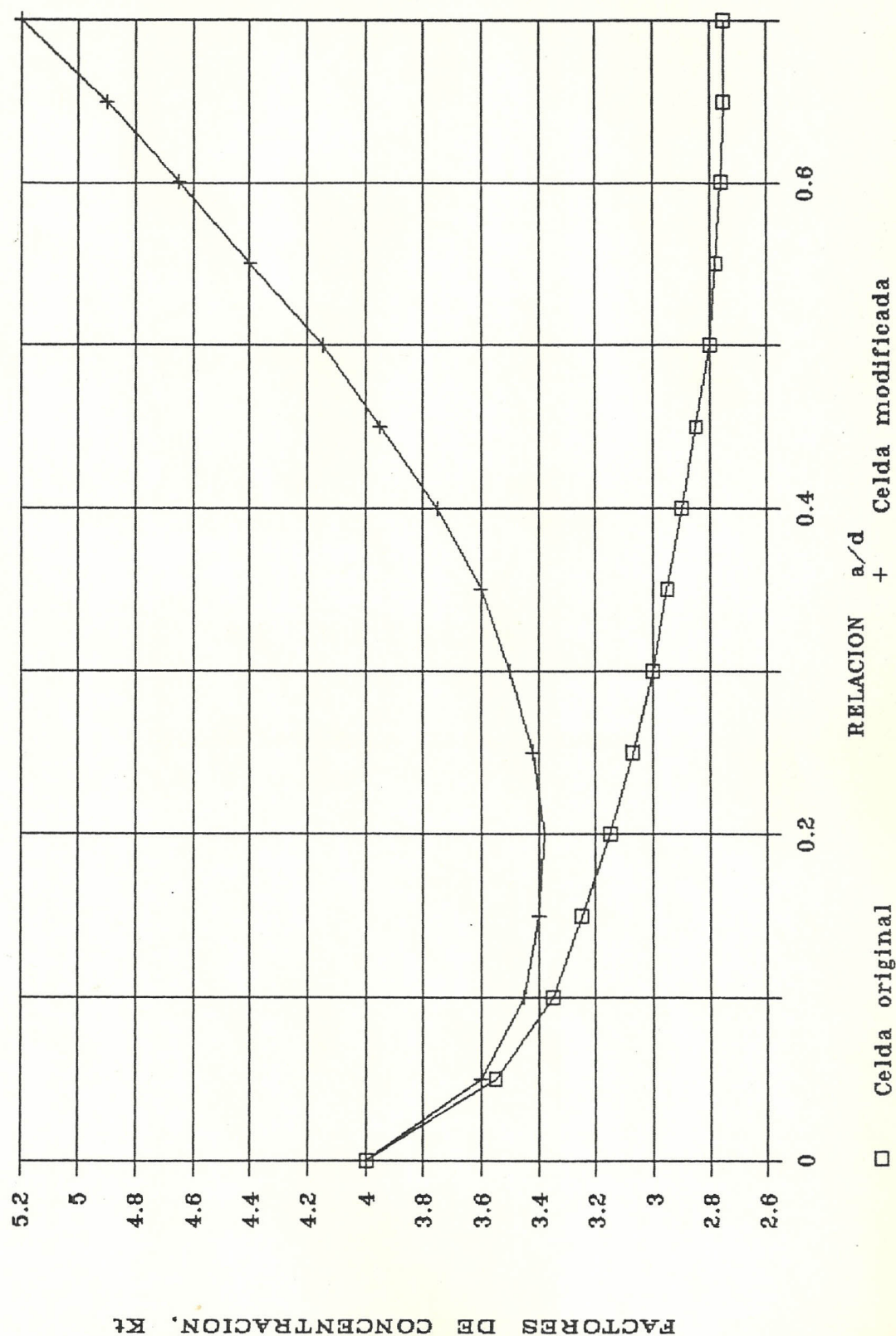
A P E N D I C E C

FACTORES DE CONCENTRACION DE ESFUERZOS

FACTORES DE CONCENTRACION PARA FLEXION

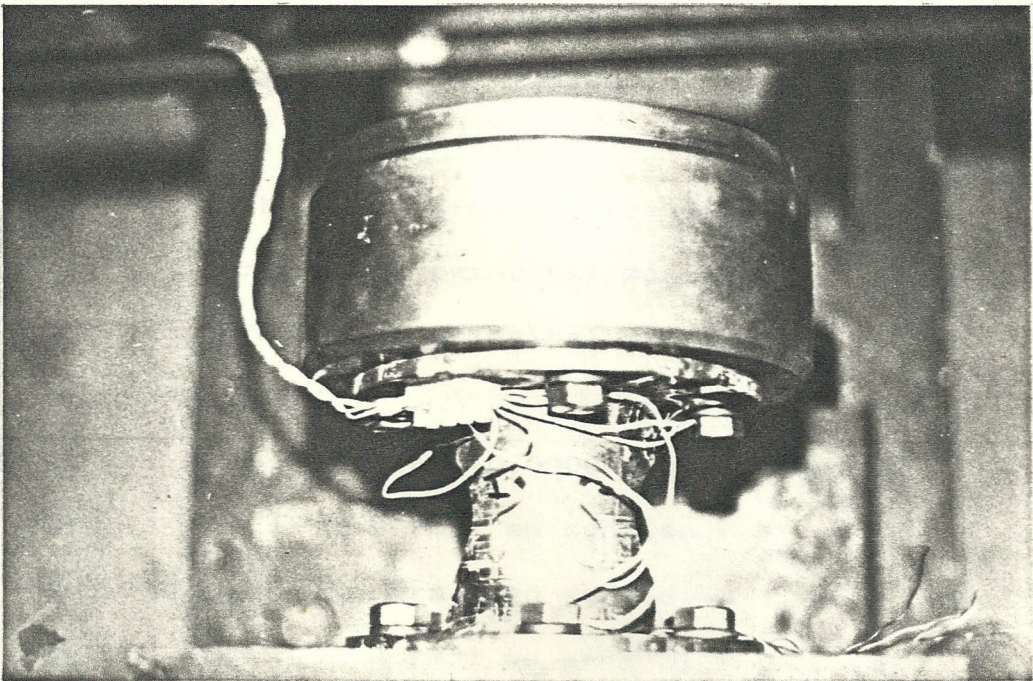
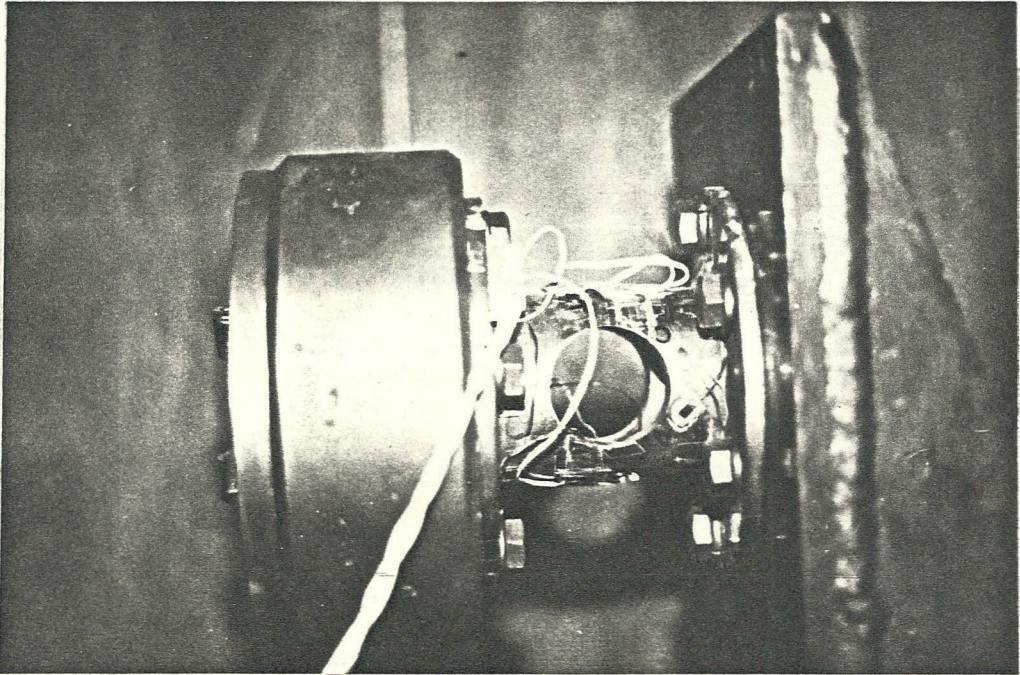


FACTORES DE CONCENTRACION PARA TORSION



A P E N D I C E D

FOTOGRAFIAS DE LA CELDA DE CARGA



A P E N D I C E E

SIMBOLOS EMPLEADOS

E	Voltaje de alimentación para el puente de Wheatstone
Eo	Voltaje de salida del puente de Wheatstone
Kgm	Kilogramos x metro
lbpie	Libras x pie
MPa	Mega-Pascales (1'000.000 Newtons/m ²)
Nm	Newton x metro
R	Resistencia del extensómetro
Rg	Resistencia del medidor
Sy	Resistencia última a la fluencia
ΔR	Cambio de la resistencia eléctrica
ε ₁	Deformación principal máxima
ε ₂	Deformación principal mínima
θ	Angulo
με	micro-strains (0.000001 metros/metro)
σ _r	Esfuerzo normal en sentido r
σ _θ	Esfuerzo normal en sentido θ
σ _x	Esfuerzo normal en sentido x

$\sigma_{\max}$	Esfuerzo normal máximo
$\sigma_{\min}$	Esfuerzo normal mínimo
σ_{equiv}	Esfuerzo normal equivalente
Σr	Sumatorio de fuerzas en sentido r
$\Sigma \theta$	Sumatorio de fuerzas en sentido θ
r_{xy}	Esfuerzo cortante actuando sobre xy
$r_{r\theta}$	Esfuerzo cortante actuando sobre $r\theta$
Φ	Función de Esfuerzos de Airy

BIBLIOGRAFIA

1. BUDYNAS, R. Advanced Strength and Applied Stress Analysis, John Willey & Sons, USA, 1984, P. 327-338.
2. HEARN, E. J. Mechanics of Materials, v. I-II, Pergamon Press Ltd., Oxford, 1985, p. 706-711.
3. JUVINALL, ROBERT C. Fundamentals of Machine Design, John Willey & Sons, USA, 1983.
4. LÖHRLEIN, H. "Adquisición de datos" (Apuntes de clases, ESPOL, 1989)
5. ORCES, E. "Mecánica de Sólidos Avanzada I" (Apuntes de clases, ESPOL, 1989).
6. PERRY, C. The Strain Gage Primer, Mc Graw-Hill, USA, 1962.
7. PETERSON, R. E. Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, 1974.

8. REISMANN, H. - PAWLIK, P. Elasticity: Theory and Applications, Pergamon Press, Oxford, 1985.
9. SHIGLEY - MITCHEL, Diseño en Ingeniería Mecánica, Mc Graw Hill, Mexico, 1980
10. SIKONOWIZ, W. Introducción al IBM PC, Mc Graw Hill, Mexico, 1984.
11. REY, C. Periféricos interactivos para su ordenador, Ediciones Siglo Cultural, Madrid, 1986.
12. URQUIZO, G. "Análisis Experimental de Esfuerzos" (Apuntes de Clases, ESPOL, 1989).