

29  
49



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE CIENCIAS

DISEÑO, FABRICACION Y PRUEBA DE DIAFRAGMAS CON  
PRESION DE RUPTURA PREFIJADA ENTRE 2 Y 23 MPa.

## TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de  
F I S I C O  
P r e s e n t a

MIGUEL ANGEL VILLANUEVA URRUTIA

México, D. F.  
1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

	INTRODUCCIÓN	(1)
CAPÍTULO I	PRESIÓN DE RUPTURA DE UN DIAFRAGMA ESFÉRICO	(4)
CAPÍTULO II	DISEÑO DEL EQUIPO	(17)
CAPÍTULO III	PRUEBAS EXPERIMENTALES	(42)
CAPÍTULO IV	ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y SELECCIÓN DE DIAFRAGMAS	(47)
	CONCLUSIONES	(64)
	REFERENCIAS	(65)

## INTRODUCCIÓN.

La física de Altas Presiones Dinámicas, constituye uno de los campos de investigación actuales más activos<sup>(1)</sup>. Esta rama de la Física permite investigar las propiedades de la materia a muy altas presiones: ecuación de estado<sup>(2)</sup>, detección de transiciones de fase o inducción de reacciones químicas violentas .

Hasta la fecha, el método más preciso para producir altas presiones dinámicas es inducir una onda de choque plana, mediante impacto<sup>(3)</sup> de un proyectil con un blanco fabricado del material que se desea estudiar.

Por este motivo, el grupo de Altas Presiones del I.F. diseñó y construyó un dispositivo llamado Generador de Ondas de Amplitud Finita ( GOAF.), que permite producir ondas de choque planas mediante impacto .

La Figura 1, muestra esquemáticamente el dispositivo llamado Generador de Ondas de Amplitud Finita ( GOAF.) el cual consta de cuatro partes:

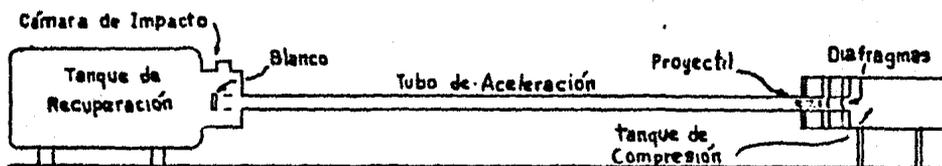


Fig. 1. Generador de Ondas de Amplitud Finita (GOAF.)

Tanque de Recuperación, Cámara de Impacto, Tubo de Aceleración y Tanque de Compresión.

Como puede verse en la Fig. 1, el extremo derecho del Tubo de aceleración y el Tanque de compresión están separados mediante dos diafragmas. Estos dos diafragmas permiten

a) Hacer el vacío en el tubo de aceleración, en la cámara de impacto<sup>(4)</sup> y en el tanque de recuperación<sup>(4)</sup>.

b) Llenar con gas a presión el tanque de compresión. Dependiendo de la velocidad y masa del proyectil, se escoge el gas: aire o helio, y su presión (entre 2 y 40 MPa<sup>(4)</sup>). El blanco se fija y alinea cuidadosamente en la cámara de impacto, y el proyectil se coloca en el extremo derecho del tubo de aceleración, junto a los dos diafragmas.

Para producir el impacto, se induce la ruptura de los dos diafragmas mediante un mecanismo que detallamos más adelante (Cap. IV, Sec. 3). La ruptura de los diafragmas permite que el gas a presión contenido en el tanque de compresión actúe sobre el proyectil, acelerándolo a lo largo del tubo de aceleración, hasta chocar con el blanco. El GOAF. permite acelerar proyectiles de 1 Kg de masa y diámetro de 75.4 mm, con velocidades finales de hasta 1000 m/s. Para obtener esta última debe utilizarse helio a 40 MPa de presión inicial en el tanque de compresión.

El impacto entre el proyectil y el blanco se observa con ayuda de una cámara rápida y uno o dos osciloscopios.

\* Un pascal (Pa) es la unidad de presión utilizada actualmente en el Sistema Internacional de Medidas y equivale a:

$$1 \text{ Pa} = 0.9866 \times 10^{-5} \text{ Atm.}$$

pios.

Una vez terminado el experimento, el proyectil y el blanco continúan juntos, penetrando en el tanque de recuperación, donde son frenados mediante el parabala<sup>(4)</sup>.

#### OBJETIVO .

El objeto de este trabajo es diseñar y construir el sistema de diafragmas cuya ruptura, inducida por un mecanismo bajo control del investigador, permite liberar repentinamente el gas a presión del tanque de compresión sobre el proyectil.

# CAPÍTULO I

## PRESIÓN DE RUPTURA DE UN DIAFRAGMA ESFÉRICO .

### I - 1 PROPIEDADES ELÁSTICAS FUNDAMENTALES.

Los diafragmas que utilizaremos para liberar el gas a presión del tanque de compresión sobre el proyectil, tienen una región debilitada con forma de casquete esférico de radio  $r$  y espesor  $\Delta r$  . Por este motivo vamos a estudiar la deformación de un cascarón esférico<sup>(5)</sup> de radio  $r$  y espesor  $\Delta r$  , sometido en su interior a una presión hidrostática  $P$  y una presión exterior nula . El material que hemos seleccionado es el duraluminio 1200 H-14 con una concentración de 94.5% Al, 4% Cu, 0.5% Mn, 0.5% Mg, y proporciones menores de Hierro y Silicio. Dada la isotropía y homogeneidad macroscópicas de este material, sus propiedades elásticas pueden ser descritas mediante el módulo de Young  $Y$  y el módulo de Poisson  $\mu$  .

La Figura 2, muestra un elemento de volumen de material, con forma de paralelepípedo recto, sometido a las fuerzas  $F$  normales que actúan sobre las caras paralelas al plano  $XY$  .

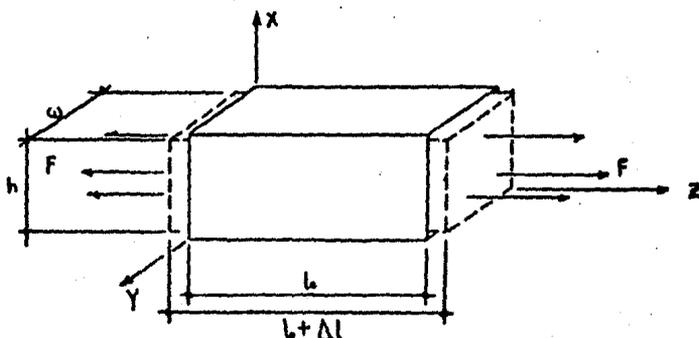


Fig.2 Deformación elástica uniaxial en Z de un paralelepípedo recto, mediante fuerzas aplicadas en sus caras paralelas. La parte punteada representa al cuerpo bajo esfuerzo.

Si  $A$  representa la superficie de cualquiera de estas caras,  $l_0$  la longitud inicial en la dirección Z y  $\Delta l$  el cambio de longitud producido por las fuerzas  $F$ , la Ley de Hooke establece que:

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

en donde  $Y$  es el módulo de Young, y  $\Delta l/l_0 = \epsilon$  es llamada, deformación unitaria .

Junto con la deformación en la dirección Z aparece una deformación transversal en las direcciones X y Y que pueden escribirse como:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta \omega}{\omega} = -\mu \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

en donde  $\mu$  es el módulo de Poisson .

Las cantidades  $\Delta l/l_0 = \epsilon_z$  ,  $\Delta h/h = \epsilon_x$  ,  $\Delta \omega/\omega = \epsilon_y$  , -

reciben el nombre de deformaciones y el cociente  $F/A = S$  recibe el nombre de esfuerzo normal. El esfuerzo normal se considera positivo, de acuerdo con la ecuación (1); cuando  $\Delta l$  es positivo, es decir cuando aumenta la longitud se llama tensión, en el caso contrario es compresión.

El signo menos en la ecuación (2) establece que un alargamiento en la dirección Z se traduce en una reducción de las dimensiones transversales. Si aplicamos fuerzas sobre las seis caras, la deformación total es la suma de las deformaciones producidas por cada una de las tres parejas de Fuerzas ( Principio de Superposición ). Notemos en la Fig. 2 que la suma de fuerzas aplicadas es nula:  $\Sigma \vec{F}_z = 0$ , en general.

$$\Sigma \vec{F} = 0 . \quad (3)$$

La Fig. 3, representa cualitativamente el comportamiento esfuerzo-deformación<sup>(6)</sup> del duraluminio. Como podemos ver: a bajo esfuerzo, antes del punto E llamado límite elástico, la deformación es directamente proporcional al esfuerzo. Si el esfuerzo disminuye hasta desaparecer, el material regresa a su forma original, si el esfuerzo se mantiene constante por un periodo de tiempo, la deformación  $\epsilon$  no cambia.

Después del límite elástico E, la pendiente de la curva esfuerzo-deformación depende de la deformación, y la Ley de Hooke ya no es válida.

Esta región se conoce como la región plástica y se caracteriza por el hecho de que la deformación es permanente o plástica; cuando el esfuerzo cesa en el punto R

el material ya no se recupera elásticamente, regresa al punto D ... ¡ ha quedado deformado !

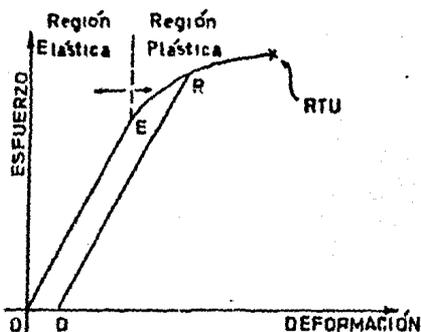


Fig. 3 Ilustración esquemática de la curva Esfuerzo-Deformación (tensión) para una aleación de aluminio.

Si continúa aumentando el esfuerzo, el material se debilita aún más, hasta llegar al punto RTU ( Resistencia de Tensión Última ), que provoca la fractura.

## I - 2 CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS.

Como hemos expuesto ya en la introducción, nuestro propósito es diseñar y construir una serie de diafragmas que deje escapar repentinamente el gas a presión del tanque de compresión sobre el proyectil.

Dichos diafragmas se someten exterior e interiormente a presiones diferentes que provocan esfuerzos grandes en su estructura. Cuando estos esfuerzos llegan a un cierto límite ( RTU en la Fig. 3 ) nuestro diafragma rompe liberando el gas.

Los diafragmas tienen una zona debilitada; una incisión en forma de cruz por la parte convexa y al centro del diafragma que permite mayor concentración de esfuerzos con ruptura más limpia, aparte de poder controlar con mayor precisión tanto el espesor efectivo ( $\Delta r'$ ) en cada diafragma como el punto o zona de ruptura.

DEFORMACIÓN DE UN CASCARÓN ESFÉRICO DE RADIO  $r$  Y ESPESOR  $\Delta r$  SOMETIDO EN SU INTERIOR A UNA PRESIÓN HIDROSTÁTICA  $\Phi$  Y UNA PRESIÓN EXTERIOR NULA<sup>(5)</sup>

Sea  $d$  un punto material del cascarón esférico antes de someter su interior a la presión  $\Phi$  y  $\mathcal{L}$  la recta que une el centro del cascarón con el punto  $d$ .

Dada la simetría esférica del problema, al someter el interior del cascarón a la presión  $\Phi$ , el punto  $d$  se desplaza a lo largo de la recta  $\mathcal{L}$  antes definida, (cf. Fig. 4).

Sean  $r$  y  $r+u(r)$  las distancias del centro al punto  $d$  antes y después de someter el interior del cascarón a la presión  $\Phi$ .

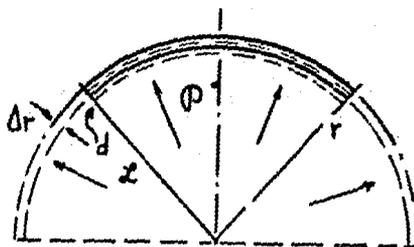


Fig.4 Cascarón esférico sujeto a presión interna ( $\Phi$ ) radialmente, detalle.

Por lo tanto la deformación  $\epsilon_z$  en la dirección radial  $Z$  esta dada por:

$$\epsilon_z = \frac{du}{dr} . \quad (4)$$

La circunferencia de cualquier círculo máximo sobre la superficie de la esfera de radio  $(r+u(r))$  cambió -- desde  $2\pi r$  a  $2\pi(r+u(r))$ . Por lo tanto la deformación circunferencial  $\epsilon$ , es:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2\pi u}{2\pi r} = \frac{u}{r} . \quad (5)$$

Esta es la deformación en cualquier dirección perpendicular al radio  $r$ . Si entonces tomamos dos ejes perpendiculares a  $r$  y perpendiculares entre sí, en un plano tangente a la esfera de radio  $(r+u)$ , y denotamos las deformaciones en las direcciones de estos ejes por  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$ , tenemos:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{u}{r} . \quad (6)$$

Consideremos ahora el equilibrio de una pequeña - porción circular (casquete) en el cascarón, de radio  $r$  y espesor  $dr$ , que subtendiendo un ángulo  $2\theta$  respecto del centro de la esfera, (cf. Fig. 5). Sean  $P$  y  $Q$  los esfuerzos radial y circunferencial.

Descomos ahora establecer la condición de equilibrio correspondiente a la ecuación (3).

Para  $\theta \ll 1$ , el elemento de volumen tiene la forma de un disco, cuyo radio y perímetro son aproximadamente  $r\theta$

y  $2\pi(r\theta)$ , (cf. Fig. 5).

Supongamos que tenemos una fuerza circunferencial  $Qdr$  que actúa sobre cada unidad de longitud en dicha circunferencia, cuyo ángulo con respecto al radio  $r$  es  $(\frac{\pi}{2} - \theta)$  (cf. Fig. 5).

Por lo tanto, la resultante de todas estas fuerzas en el elemento de volumen en la dirección radial, es

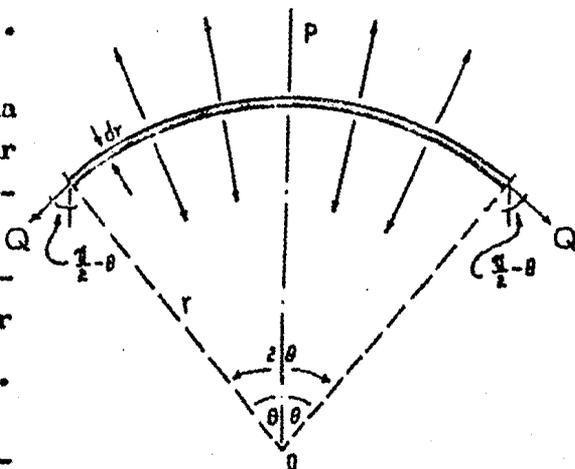


Fig. 5 Porción circular en el cascarón de radio  $r$  y espesor  $dr$ . El ángulo  $\theta$  está muy exagerado.

$$F_q = -Q dr \cdot 2\pi r \theta \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) \approx -2\pi r \theta^2 Q dr, \quad (7)$$

Las fuerzas que actúan en el elemento de volumen debidas al esfuerzo radial  $P(r)$  son: la que actúa sobre la superficie externa del elemento de volumen, en la dirección positiva radial, dada por  $P(r+dr)\pi(r+dr)^2\theta^2$ , y la que actúa sobre la superficie interior del elemento de volumen, en la dirección negativa radial, dada por  $-P(r)\pi r^2\theta^2$ , (cf. Fig. 6), donde  $r$  y  $(r+dr)$  representan los radios interior y exterior del elemento.

La fuerza total debida al esfuerzo  $P$  es:

$$F_r = \pi \theta^2 \frac{d}{dr} (r^2 P) dr, \quad (8)$$

La condición de equilibrio puede escribirse como:

$$F_r + F_q = 0 .$$

substituyendo, tenemos:

$$\pi \theta^2 d(r^2 P) - 2\pi r \theta^2 Q dr = 0 ,$$

$$\frac{d}{dr} (r^2 P) = 2 r Q \quad (9)$$

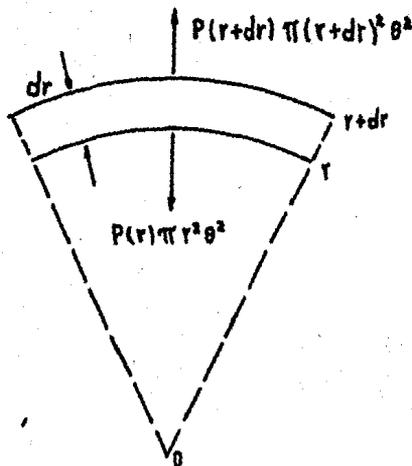


Fig. 6 Elemento de volumen de una pequeña porción circular en el cascarón sujeto a las fuerzas radiales  $P(r)$  y  $P(r+dr)$ .

Ya que los esfuerzos en las direcciones de las deformaciones  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  son  $P$ ,  $Q$  y  $Q$ , las relaciones entre esfuerzos y deformaciones son.

La deformación radial total  $\epsilon_{zT}$  : es la suma de la deformación  $\epsilon_{zP}$  producida por el esfuerzo radial  $P$ , que actúa sobre el elemento de volumen de la Fig. 7 ; de la deformación  $\epsilon_{zQ}$  debida al esfuerzo  $Q$  en la dirección  $Y$  de acuerdo con la Ley de Poisson; y de la deformación  $\epsilon_{zQ}$  debida al esfuerzo  $Q$  en la dirección  $X$  de acuerdo con la Ley de Poisson.

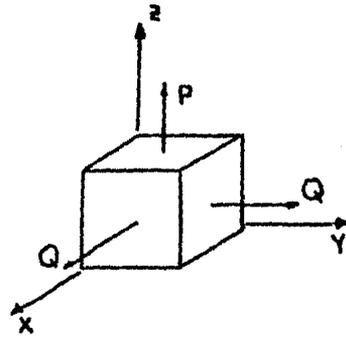


Fig.7 Elemento de volumen - mostrando las direcciones de los esfuerzos  $P, Q$  y  $Q$ .

Tenemos entonces:

$$\epsilon_{zT} = \epsilon_{zP} + \epsilon_{zQ} + \epsilon_{zQ} .$$

$$\epsilon_{zT} = \frac{P}{Y} - \mu \frac{Q}{Y} - \mu \frac{Q}{Y} ,$$

$$\therefore Y\epsilon_{zT} = P - 2\mu Q . \quad (10)$$

La deformación circunferencial total  $\epsilon_{xT}$  (o  $\epsilon_{yT}$ ) es: la suma de la deformación  $\epsilon_{xQ}$  producida por el esfuerzo circunferencial  $Q$ , que actúa sobre el mismo elemento de volumen (cf. Fig. 7) ; de la deformación  $\epsilon_{xQ}$  debida al esfuerzo  $Q$  en la dirección  $Y$  de acuerdo con la Ley de Poisson; y de la deformación  $\epsilon_{xP}$  debida al esfuerzo  $P$  en la dirección radial  $Z$ , de acuerdo con la Ley de Poisson.

Por lo tanto:

$$\epsilon_{XT} = \epsilon_{XQ} + \epsilon_{XP} \quad ,$$

$$\epsilon_{XT} = \frac{Q}{Y} - \mu \frac{Q}{Y} - \mu \frac{P}{Y} \quad ,$$

$$\therefore Y \epsilon_{XT} = Q - \mu(Q + P) = Y \epsilon_{Yr} \quad (11)$$

Substituyendo las ecuaciones (4 y 6) en las ecuaciones (10 y 11)

$$Y \frac{du}{dr} = P - 2\mu Q \quad . \quad (12)$$

$$Y \frac{u}{r} = (1 - \mu) Q - \mu P \quad . \quad (13)$$

Este sistema de ecuaciones (12 y 13) debe ser resuelto para poder obtener cada uno de los esfuerzos P y Q, en términos - del desplazamiento  $u(r)$ .

Substituyendo Q de la ecuación (12) en la ecuación (13), tenemos:

$$\frac{(1-\mu)}{2} \frac{d^2(r^2 P)}{dr^2} - \mu \frac{d(rP)}{dr} - P + \frac{\mu}{r} \frac{d(r^2 P)}{dr} = 0 \quad . \quad (14)$$

Podemos simplificar esta ecuación substituyendo  $r^2 P = y$ ,

$$\frac{d^2 y}{dr^2} - \frac{2y}{r^2} = 0 \quad . \quad (15)$$

La solución general de la ecuación (15) esta dada por:

$$y = Ar^2 + \frac{B}{r} \quad (16)$$

es decir:

$$P = A + \frac{B}{r^3} \quad (17)$$

Substituyendo P de esta ecuación en la ecuación (9), obtenemos:

$$Q = A - \frac{B}{2r^3} \quad (18)$$

Para determinar las constantes A y B, y diciendo que  $r = a$  y  $r + \Delta r = b$  son los radios interior y exterior del cascarón esférico, tenemos:

$$P(a) = -\varphi \quad (19)$$

$$P(b) = \varphi(a + \Delta r) = 0$$

obteniendo:

$$A = \frac{a^3 \varphi}{b^3 - a^3} \quad (20)$$

$$B = \frac{-(a^3 b^3)}{b^3 - a^3} \varphi$$

Substituyendo estos valores de A y B, en las ecuaciones (17 y 18), tenemos:

$$P = \frac{a^3 \rho}{b^3 - a^3} \left(1 - \frac{b^3}{r^3}\right) \quad (21)$$

$$Q = \frac{a^3 \rho}{b^3 - a^3} \left(1 + \frac{b^3}{2r^3}\right) \quad (22)$$

Los resultados anteriores (ecuaciones 21 y 22), - constituyen la solución completa al problema, mientras la de formación no exceda el límite elástico. En caso contrario el material no puede describirse con los módulos de Young y de Poisson.

Si  $\Delta r = b - a \ll a$  podemos escribir la ecuación (22) como:

$$Q \cong \frac{a \rho}{2 \Delta r} \quad (23)$$

Nosotros admitimos que la ecuación (23) sigue - siendo válida aún para deformaciones que exceden el límite - elástico (E) antes mencionado.

El análisis siguiente muestra que la hipótesis no está muy alejada de la realidad.

Supongamos que tenemos un cascarón esférico de radio interior  $a$  y espesor  $\Delta r (\ll a)$  sometido a una presión interior  $\rho$  y una presión despreciable en su exterior.

Nos interesamos por el esfuerzo en un elemento de su superficie .

Trazando un círculo máximo que pase por ese elemento de superficie, dividimos la esfera en dos hemisferios ( Fig. 8 ).

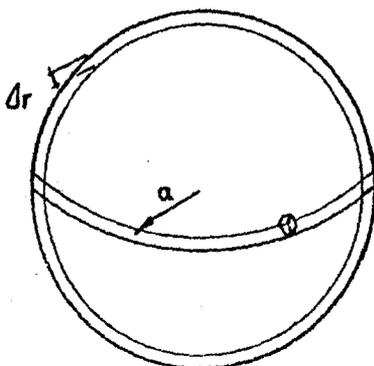


Fig. 8 Cascarón esférico sometido a presión interior  $\mathcal{P}$  con presión despreciable en el exterior.

La presión interior tiende a separar los dos hemisferios con una fuerza

$$F = \mathcal{P}A = \pi a^2 \mathcal{P} ,$$

El esfuerzo  $Q$  en la cáscara impide que se separen. La fuerza que mantiene unidas las dos mitades es  $Q(2\pi a) \Delta r$

$$\therefore Q = \frac{\pi a^2 \mathcal{P}}{2\pi a \Delta r} = \frac{a \mathcal{P}}{2 \Delta r} .$$

que es el resultado obtenido en la ecuación (23).

Nótese que en este último razonamiento no se supone la Ley de Hooke.

# CAPÍTULO II

## DISEÑO DEL EQUIPO .

### II - 1 ANTECEDENTES .

En la unión del Tubo de Aceleración con el Tanque de Compresión se localiza el sistema de disparo, el cual consiste en dos diafragmas y soportes (llamados portadiafragmas)

Los portadiafragmas fueron diseñados y fabricados en base a dos criterios:

- 1.- Como soportes de los diafragmas en el tanque de compresión.
- 2.- Como constituyentes de la cámara hermética - que permitirá probar experimentalmente los - diafragmas.

Para la fabricación de los diafragmas fue necesario asegurar reproducibilidad en características tales como curvatura, diámetro y espesor.

Adicionalmente se requirió lo siguiente:

- Diseñar y fabricar moldes (troqueles) para la fabricación en serie de los diafragmas.
- La fabricación de una mesa de pruebas.
- La fabricación de una conexión entre la bomba y la manguera con entrada para manómetro.
- La fabricación de una conexión (tapón) entre la manguera de la bomba y el portadiafragma superior (#3).

## I I - 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DISPARO .

Un elemento muy importante en el Generador de Ondas de Amplitud Finita es el sistema de disparo del proyectil.

Como se muestra en la Fig. 9, la conexión entre el Tubo de Aceleración por el lado izquierdo y el Tanque de Compresión por el lado derecho, incluye un espacio para el montaje de este sistema, el cual se acopla insertándose en seis barras guía atornilladas a los agujeros (dispuestos hexagonalmente) que tiene la tapa izquierda del Tanque de Compresión.

Una vez fijas las barras guía al Tanque de Compresión, se insertan los componentes del sistema en el siguiente orden: un juego de tres portadiafragmas (#1, #2 y #3 en la Fig. 9); un disco de 95 mm de espesor, llamado anillo de alineación, que permite alinear el primer tramo del tubo de aceleración con los discos portadiafragmas. Cada uno de estos componentes lleva contrado un agujero de  $\varnothing$  80 mm .

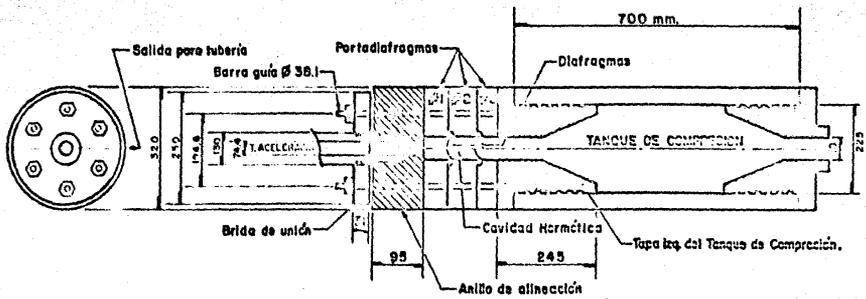


Fig. 9. Montaje del Sistema de Disparo en el tanque de compresión.

Un último elemento, llamado brida de unión, que se atornilla al tramo inicial del tubo de aceleración, completa el ensamble, permitiendo prensar todo el conjunto al tanque de compresión.

Sin duda los portadiafragmas constituyen el componente principal del sistema de disparo del proyectil, ya que al morder entre sí los dos diafragmas, determinan tres cavidades herméticas: tubo de aceleración, volumen entre diafragmas y tanque de compresión. Su diseño como componentes del sistema de disparo se muestra en la Fig. 10 .

Como se puede apreciar en dicha figura, el sistema de disparo consta de los siguientes elementos.

#### Portadiafragma # 1

Se trata de un anillo de 320 mm de diámetro exterior y 22 mm de espesor, con seis agujeros de 38.1 mm de diámetro dispuestos hexagonalmente, centrados sobre un círculo de 194.6 mm de diámetro. El anillo presenta por su cara derecha un perfil maquinado en un círculo de 100 mm de diámetro (Figs. 10 y 11), y por su cara izquierda un surco rectangular sobre un diámetro de 95 mm (Figs. 10 y 12). El perfil permite prensar al diafragma y el surco alojar un empaque PARKER SEAL\* (2-341) para sellar su unión con el anillo de

---

\* PARKER S. empaque de uso industrial, de forma toroidal hecho de hule (neopreno) altamente resistente a la fricción, que ajustado en una cavidad circular funciona como un sello impidiendo el paso de gases o líquidos entre uno y otro lados.

alineación. Este anillo en particular es usado como componente de la cámara hermética para las pruebas de ruptura.

### Portadiafragma # 2

De mismos diámetros exterior e interior, con los mismos seis agujeros, este anillo de 57 mm de espesor presenta un surco o hendidura por su parte izquierda (Figs. 10 y 11), misma que corresponde al perfil derecho del portadiafragma #1, permitiendo sostener y prensar al diafragma que se coloque entre los portadiafragmas #1 y #2. El prensado del diafragma entre estos anillos permite obtener una unión hermética. Por su cara derecha presenta otro perfil idéntico al del portadiafragma #1. Este anillo incluye un agujero radial para salida de tubería con cuerda 1/4" NPT, que permite controlar la presión entre los dos diafragmas.

### Portadiafragma # 3

Este disco tiene básicamente las mismas características que los anteriores, como puede verse en la Fig. 10. De 20 mm de espesor, presenta una hendidura por su cara izquierda. Y un surco rectangular por su cara derecha para alojar un empaque PARKER SEAL (2-341). Este anillo se maquinó primeramente como componente de la cámara hermética. Una vez que se concluyeron las pruebas de ruptura de los diafragmas, se continuó su maquinado (ver Figs. 10, 11 y 12) para poder utilizarlo como elemento del sistema de disparo.

Tanto los perfiles como las hendiduras practicados en los anillos portadiafragmas han sido probados para utilizar al diafragma como empaque; el sellado es hermético hasta 25 MPa, según nuestros resultados experimentales, pero puede ser hermético a mayor presión.

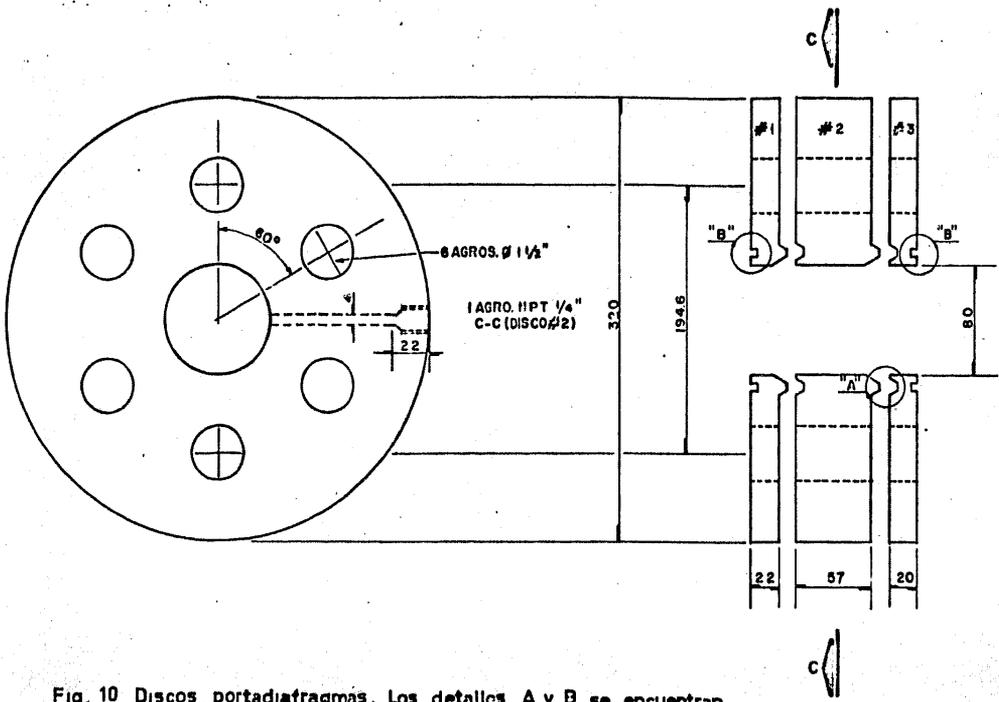


Fig. 10 Discos portadiafragmas. Los detalles A y B se encuentran en las Figuras 11 y 12

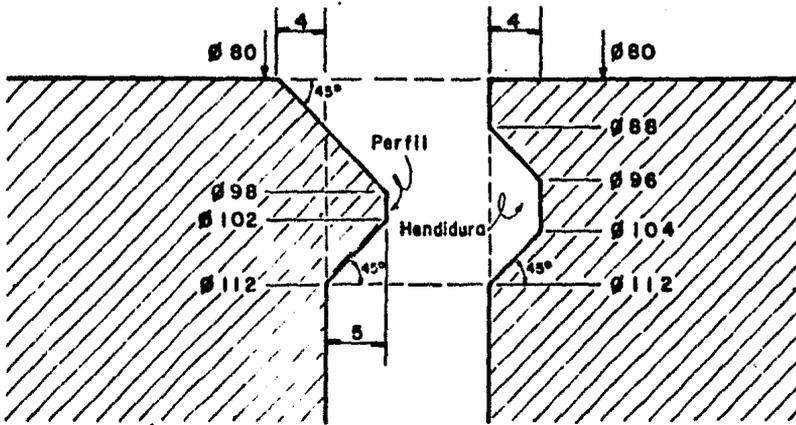


Fig. 11. Detalle A. Junta entre los portadiafragmas  
# 1 con #2 y #2 con #3

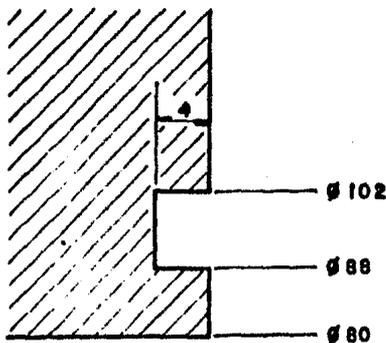


Fig. 12. Detalle B. Caja para alojar empaque (arosello  
PARQUER SEAL 2-341) en portadiafragmas #1 y #3

### I I - 3 CÁMARA HERMÉTICA .

La cámara hermética juega un papel importante en el desarrollo del experimento, ya que es el equipo básico para probar la resistencia de los diafragmas. Está constituida por los anillos portadiafragmas #1 y #3, los cuales presan entre sí el diafragma, cuya presión de ruptura se desea investigar. El prensado se realiza mediante seis tornillos de 38 mm de diámetro con cuerda de 6 hilos por pulgada, como puede verse en la Fig. 13. El portadiafragma #3, que habilita el recinto de presión, lleva colocado en su centro un tapón (ver Fig. 14 y detalles de colocación en la Fig. 15) que se atornilla a la manguera que proviene de la bomba. Todo el ensamble se puede observar en la Fig. 16 .

### I I - 4 BOMBA DE PRESIÓN .

Una vez hecho el montaje del diafragma en la cámara hermética se procede a romperlo inyectándole aceite a presión con una bomba hidráulica (la bomba que utilizamos permite producir presiones de hasta 70 MPa) accionada manualmente. La presión suministrada ( $P$ ) se mide mediante un manómetro que va colocado en una conexión (Fig. 17) que une la bomba con la manguera. El manómetro está diseñado para medir presiones en el intervalo 1 - 70 MPa, con una precisión del 1 %. Las lecturas de presión tienen una incertidumbre adicional de 0.5 MPa asociada con la escala del manómetro.

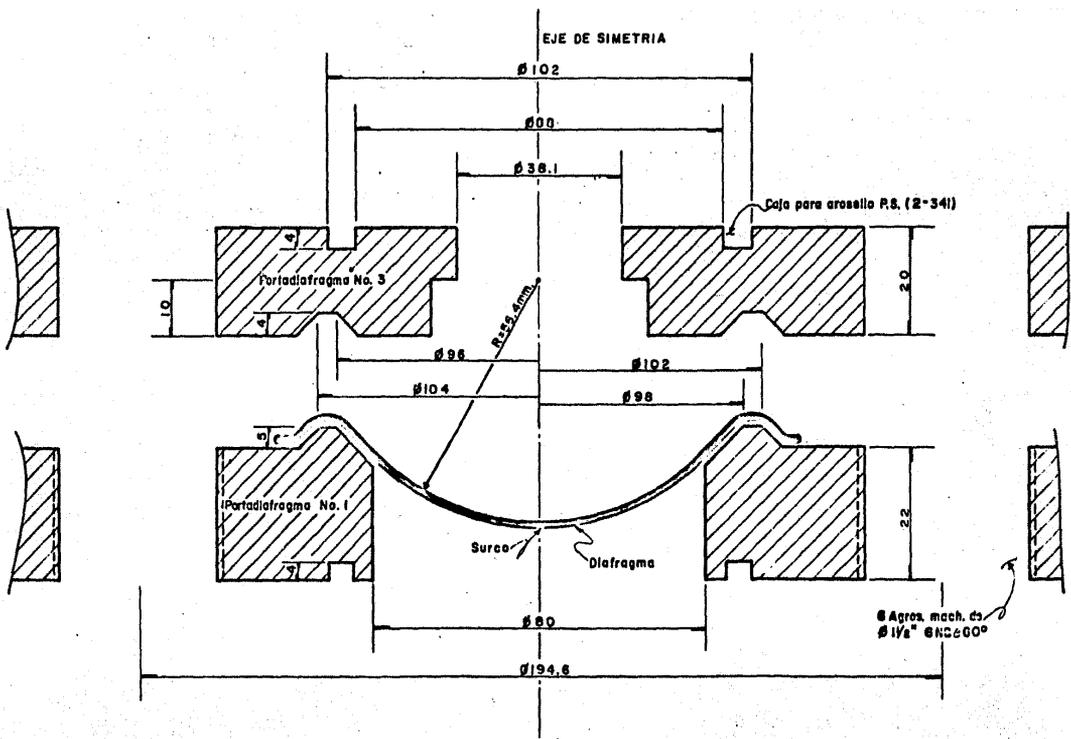


Fig.13 Cámara Hermética, corte transversal.

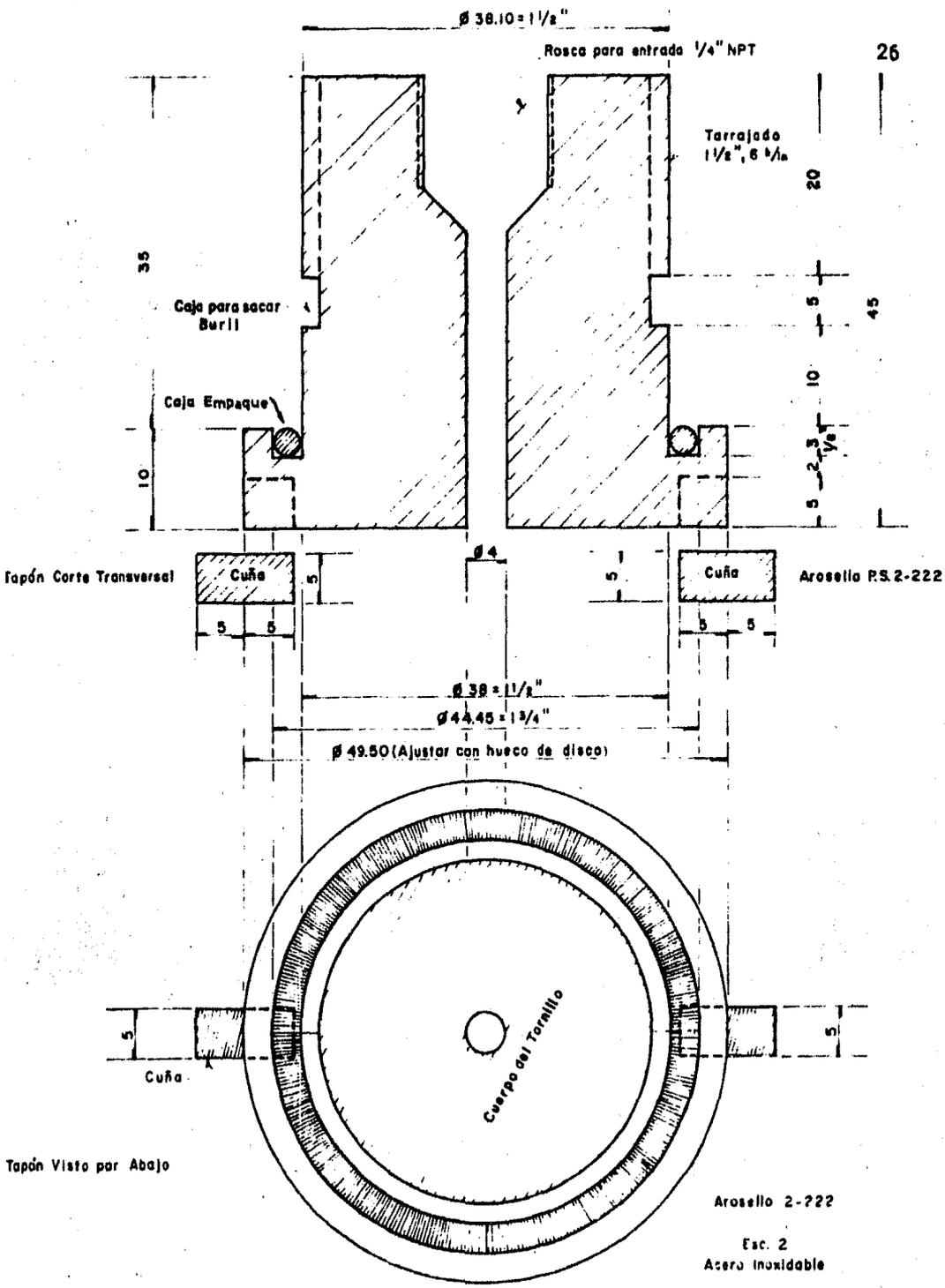


Fig.14 Detalle Tapón para conectar Portadifragma con Bamba.

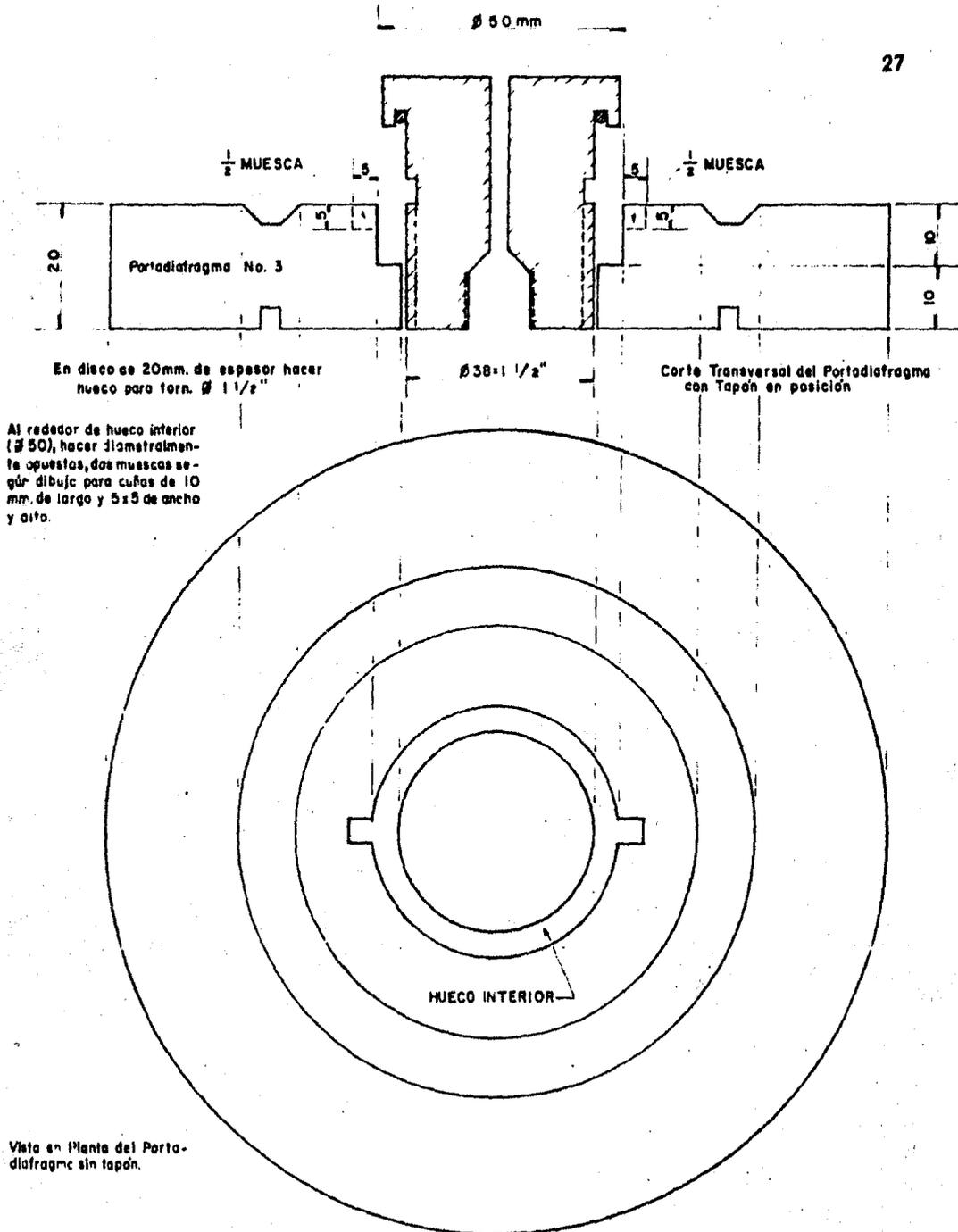


Fig.15 Detalle Disco Superior de la Cámara Hermética señalando montaje del tapon de llenado.



Fig.16 Cámara Hermética, detalle mostrando el prensado del diafragma con los portadiafragmas.

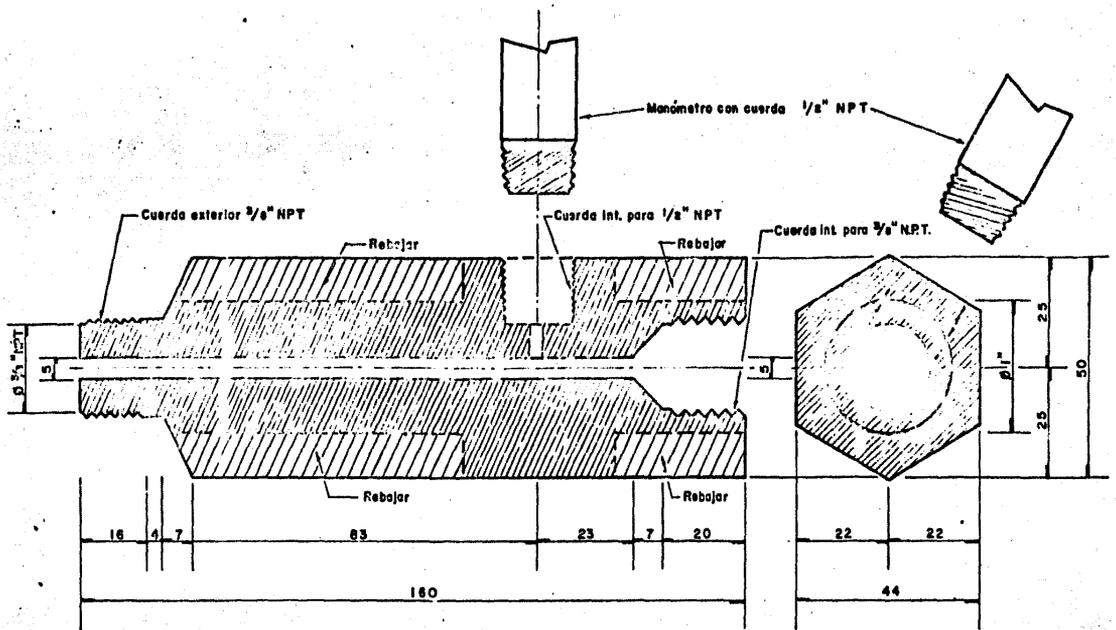


Fig.17 Conexión Bomba - Manguera - Manómetro  
 Material: Bronce con cuerdas según datos, medidas en milímetros.

## II - 5 FABRICACIÓN DE LOS DIAFRAGMAS .

El problema de mantener presión hasta un cierto límite en el Tanque de Compresión del GOAF, llevó al estudio de membranas<sup>(5)</sup> que pudieran soportar fuerzas del orden de  $6.2 \times 10^4$  Kgf distribuidas en un área aproximada de  $100 \text{ cm}^2$  para una presión máxima de 60.8 MPa .

Debe usarse un material suave que pueda ser fracturado a las presiones prefijadas (2 a 23 MPa), dúctil y de fácil adquisición en el mercado. El duraluminio 1200 H-14 fue seleccionado por cubrir esas necesidades.

Considerando las medidas adoptadas para los portadiafragmas, se procedió a diseñar un diafragma de acuerdo al dibujo de la Fig. 18, en donde se muestra la sección transversal del diafragma cuyo perfil forma un círculo de  $\varnothing 100$  mm que coincide perfectamente con el perfil del portadiafragma inferior #1 y la hendidura que presenta el portadiafragma superior #3, (cf. Fig. 13) .

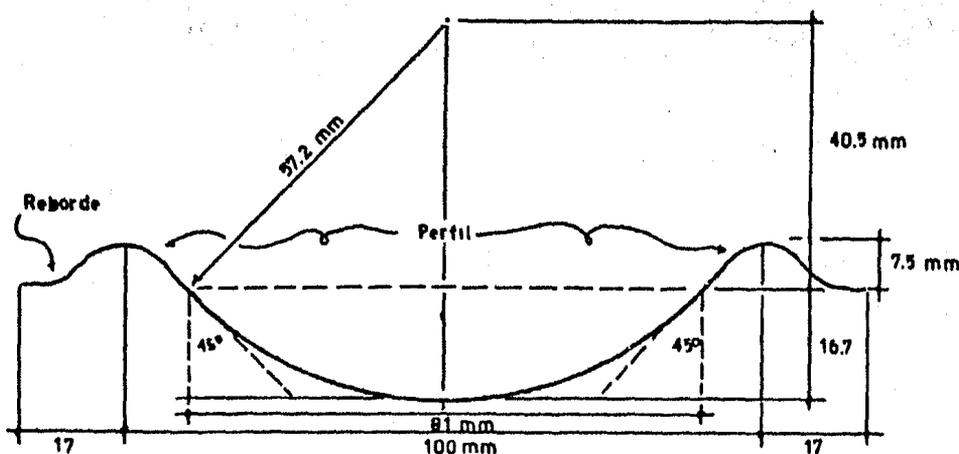


Fig 18. Corte Transversal, prototipo de diafragma.

El diseño del diafragma prevee un reborde que permite sujetarlo perfectamente, evitando así que se deslice entre los portadiafragmas.

Fue necesario disponer de diafragmas cuyos espesores variaran desde 0.30 mm hasta 5.00 mm lográndose este intervalo de la siguiente manera. Para espesores desde 0.30 mm hasta 2.00 mm se utilizó placa de Duraluminio aleación 1200 H-14 calibre 14 de 2.1 mm de espesor y  $5.72 \text{ Kg/m}^2$ , haciéndose el rebajado necesario mediante una segueta, hasta obtener el espesor deseado. Y para espesores desde 2.00 mm hasta 5.0 mm se utilizó placa de Duraluminio aleación 1200 H-14 calibre 4 de 6.00 mm de espesor y  $16.38 \text{ Kg/m}^2$ , haciéndose el rebajado por el mismo método, hasta obtener el espesor deseado.

#### I I - 6 CÁLULO DE LOS TORNILLOS NECESARIOS PARA LOS PORTADIAFRAGMAS .

Los tornillos están diseñados para resistir los esfuerzos que se generen en los portadiafragmas cuando se tenga una presión máxima ( $P$ ) de 60.8 MPa en el tanque de compresión.

El cálculo es el siguiente: la fuerza que resiste un diafragma de diámetro 100 mm, a una presión de 60.8 MPa en el tanque de compresión, es:

$$\text{Fuerza} = (\text{Presión}) (\text{Área del Diafragma})$$

$$= 60.8 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2)$$

$$= 486\,400 \text{ N} = 49612.8 \text{ Kgf}$$

$F = 50\,000 \text{ Kgf}$       Fuerza de empuje en los  
diafragmas.

Los tornillos necesarios para resistir este empuje, están --  
calculados mediante el Área necesaria de resistencia ( $A_{nec.}$ )  
definida como:

$$A_{nec.} = \frac{F}{f} \quad \text{donde } F = \text{Fuerza de empuje} \quad (24)$$

$$f = \text{Esfuerzo admisible}$$

$$(1200 \text{ Kg/cm}^2)$$

$$A_{nec.} = \frac{50\,000}{1200} = 41.6 \text{ cm}^2 \approx 42 \text{ cm}^2$$

Para obtener la cantidad de tornillos de acuerdo con su Área  
neta de fijación ( $A_n$ ) y considerando que un tornillo de --  
1 1/2" de diámetro, tiene una  $A_n = 8.35 \text{ cm}^2$ .

$$\frac{A_{nec.}}{A_n} = \frac{42 \text{ cm}^2}{8.35 \text{ cm}^2} = 5 \text{ tornillos de } \varnothing 1 \frac{1}{2}''$$

Los 5 tornillos de 1 1/2" de diámetro serían sufi-  
cientes para resistir el empuje  $F$  dado, sin embargo se propu-  
sieron 6 de estos tornillos para tener el máximo de seguri-  
dad de trabajo.

## I I - 7 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS EN LA ZONA REBAJADA DEL DIAFRAGMA .

Los diafragmas tienen un surco en forma de cruz por su lado convexo, al centro. El objetivo de este surco es controlar la presión de ruptura del diafragma, así como asegurar que la ruptura empieza en el centro del diafragma.

El efecto del surco es debilitar el diafragma con centrando los esfuerzos.

La Fig. 19, muestra un paralelepípedo rebajado, sometido a esfuerzos  $F_1$  y  $F_2$  en sus extremos.

En equilibrio tenemos que:  
 $F_1 + F_2 = 0$ . El esfuerzo  $Q$  en la cara derecha del modelo es,  $Q = F_2 / (h \Delta r)$  y el esfuerzo  $Q'$  en la cara izquierda del modelo es,  $Q' = - F_1 / (h \Delta r')$ .

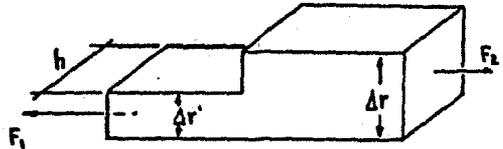


Fig. 19 Concentración de esfuerzos en el rebajado.

Vemos que:

$$Q' = Q \frac{\Delta r}{\Delta r'} \quad (25)$$

La ecuación (25) es el esfuerzo obtenido en la parte rebajada del modelo debido a una presión interior ( $P$ ) y es igual al producto del esfuerzo circunferencial  $Q$  con el cociente de los espesores de la parte entera  $\Delta r$  a la parte rebajada  $\Delta r'$ .

## I I - 8 DISEÑO Y FABRICACION DE TROQUELES .

Para poder utilizar los diafragmas que hemos diseñado es necesario que sus características sean reproducibles: espesor y radio de curvatura. Con el fin de efectuar las pruebas teniendo constantes estos parámetros, se diseñó un par de troqueles que los dieran estas características, de acuerdo con las medidas previstas por los portadiafragmas: diámetro del perfil de 100 mm, pendientes del perfil a  $45^{\circ}$  con la vertical y diámetro del hueco de 80 mm según la Fig. 20

Se utilizaron dos bloques de acero al carbón, que se maquinaron de acuerdo al dibujo de la Fig. 21 . El troquel se diseñó para funcionar en una prensa con capacidad para 30 Tons. suficiente para doblar nuestras placas cortadas previamente a un diámetro de 150 mm . Además se agregaron a los troqueles un par de guías de acero para facilitar el deslizamiento de la pieza macho, y un cilindro de sujeción soldado al troquel macho que se atornilla al pistón de la prensa (Fig. 22). En la Fig. 23 se aprecia claramente la disposición de los troqueles en la prensa.

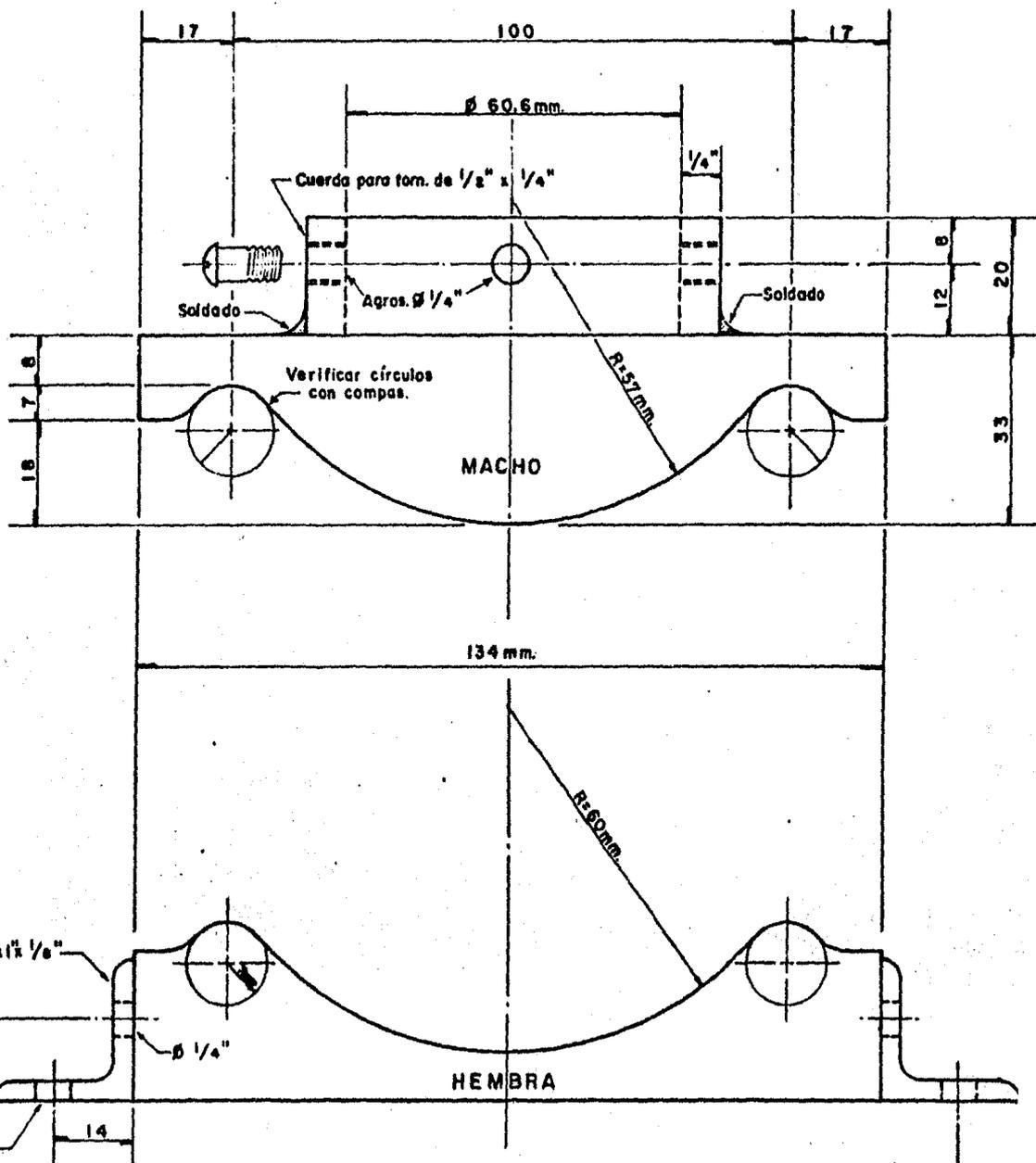
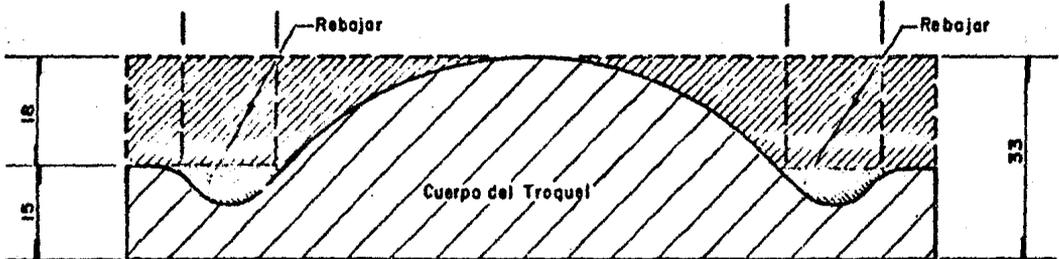
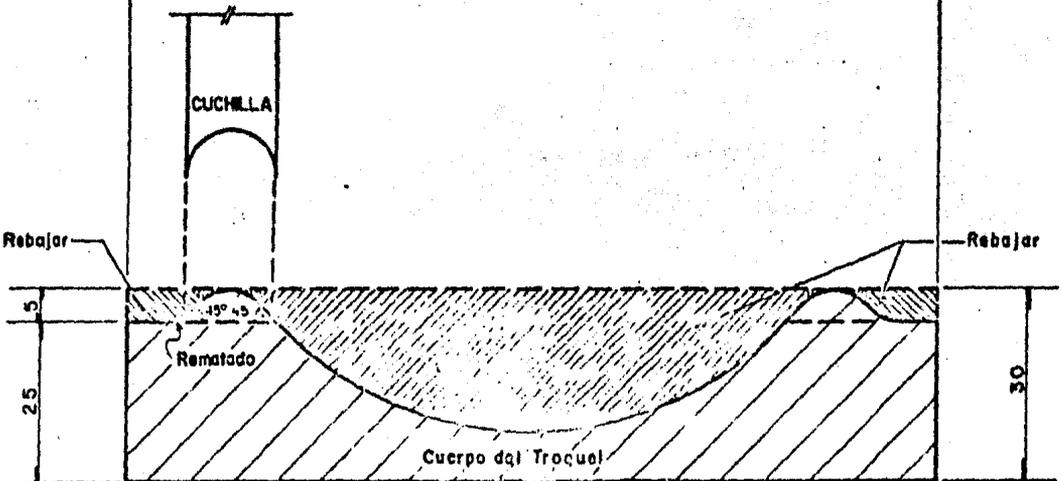


Fig.20 Detalle troqueles para formado de diafragmas.



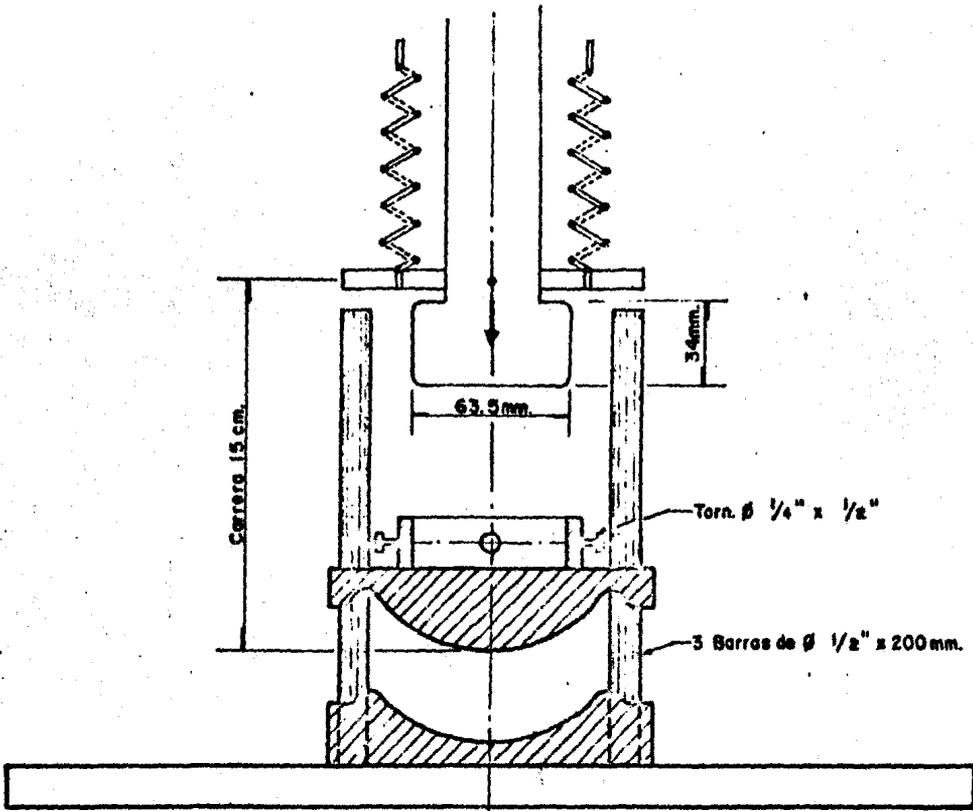
Fabricado de Troquel Macho  
Bloque de 134x134x33 mm.

134 mm.

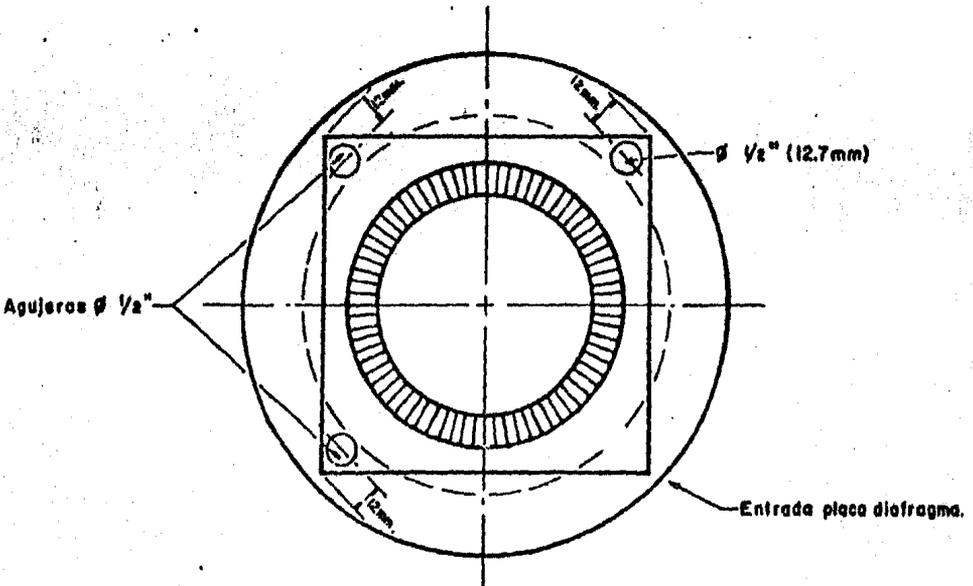


Fabricado de Troquel Hembra  
Bloque de 134x134x30 mm.

Fig.21 Fabricado de Troquel Macho y Hembra



Disposición de los Troqueles en la Prensa.



Troqueles: vista en planta.

Fig.22 Dibujo moldes para montaje.

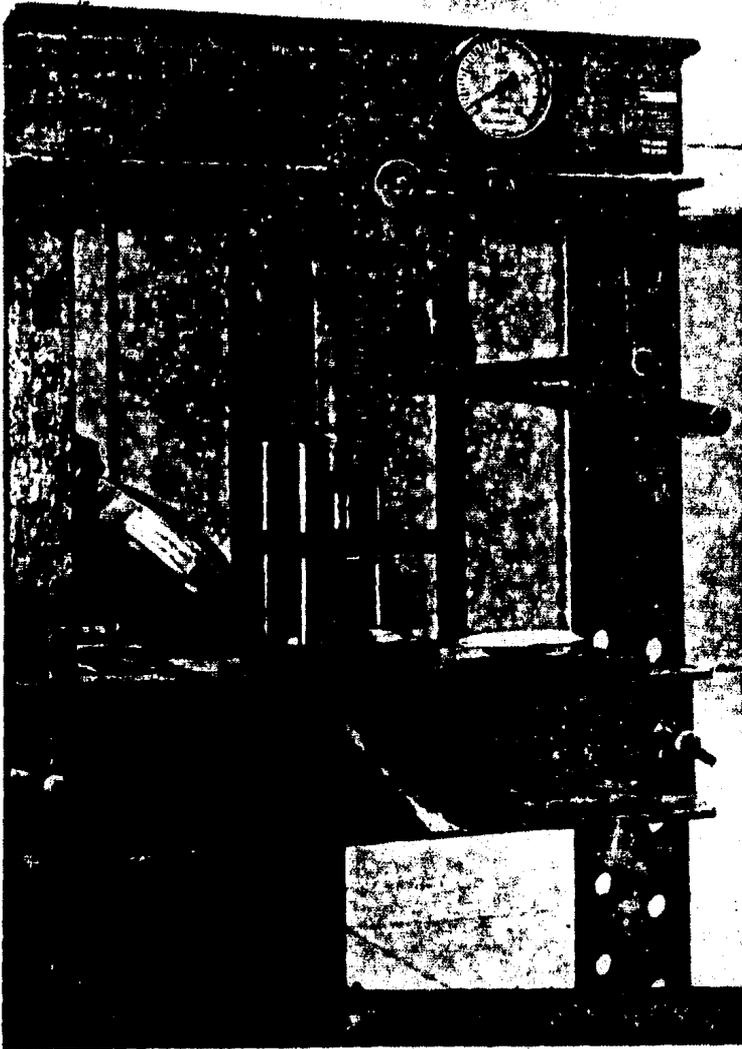


Fig. 23 Montaje Prensa Troquel.

## I I - 9 FABRICACIÓN Y MONTAJE DE LA MESA DE PRUEBAS .

La mesa de pruebas consta de un pedestal de tubo de hierro de 4" de diámetro y altura de 1.20 m que se fija al piso. En su parte superior lleva soldada una plancha de acero sobre la cuál se atornilla un armazón de ángulo con dos planchas a desnivel. En el desnivel superior van colocados los portadiafragmas formando la "cámara hermética" (Fig. 24), en el inferior se puede descansar al portadiafragma superior #3 cuando se desmonta el ensamble (Fig. 25). Por la parte lateral, y verticalmente, va colocada la bomba hidráulica con su conexión bomba-manguera, que nos permite llevar el aceite a presión hasta el tapón de entrada en los portadiafragmas, como se observa en la misma Fig. 25 .

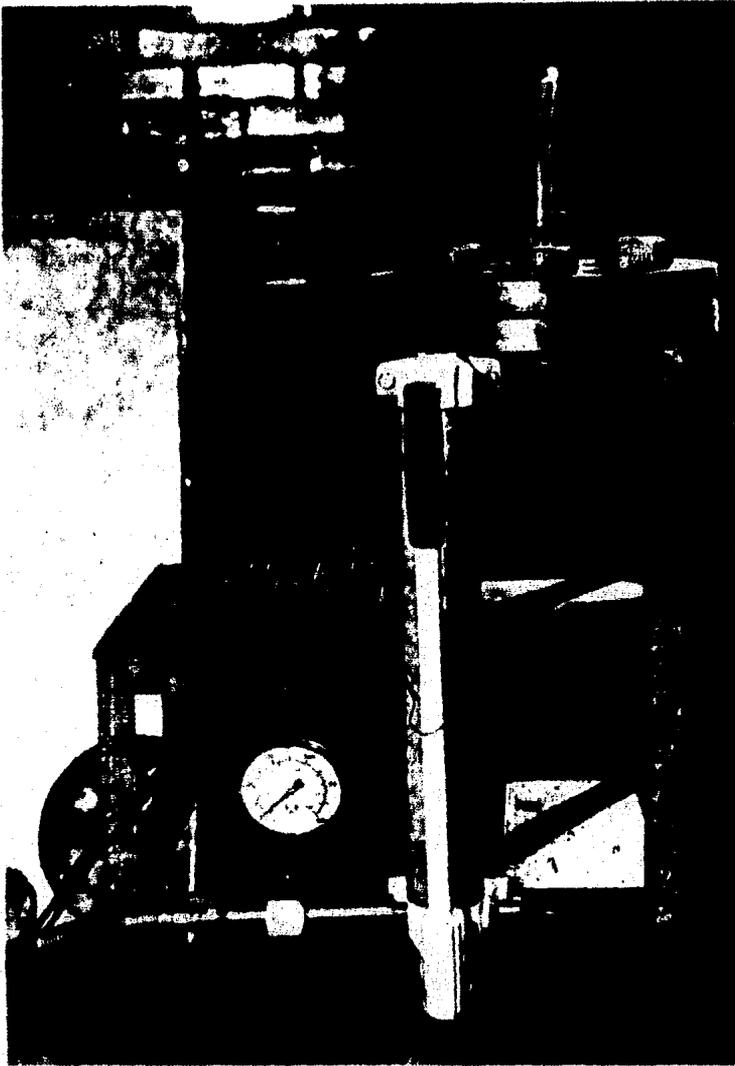


Fig.24 Mesa de Pruebas: montaje de los porta -  
diafragmas en posición para el experimento. El  
diafragma ya está prensado.

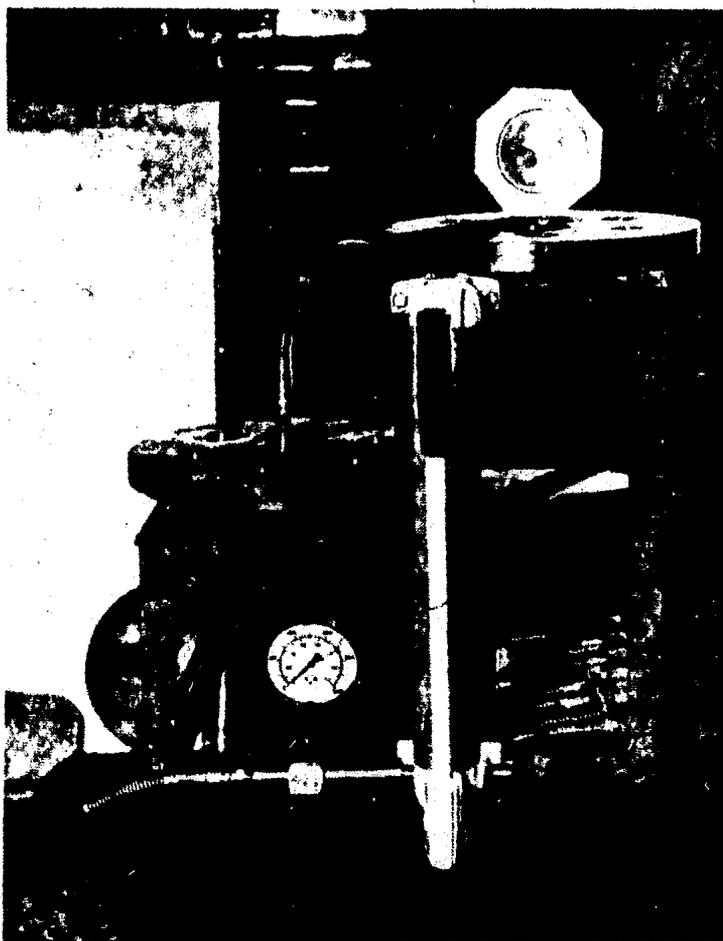


Fig. 25: Mesa de Pruebas con los portadiafragmas desmontados.

## CAPÍTULO III

### PRUEBAS EXPERIMENTALES .

En este capítulo explicaremos brevemente las distintas etapas del experimento, así como algunos comentarios útiles para su realización.

#### I I I - 1 OBJETIVO DE LA PRUEBA .

El objetivo es: Medir la presión de ruptura ( $P_r$ ) de un diafragma en función del espesor efectivo ( $\Delta r$ ) de la hendidura en su lado convexo.

#### I I I - 2 ASPECTOS GENERALES .

El experimento consiste básicamente en prensar un diafragma de espesor conocido ( $\Delta r$ ), entre dos discos de acero llamados portadiafragmas que funcionan como "cámara hermé

tica (ver II-3, pág. 24). Mediante la ayuda de una bomba hidráulica que se conecta al portadiafragma superior se realiza el presionado. El experimento concluye en el momento en que el diafragma de espesor conocido cede a una cierta presión llamada su "presión de ruptura".

### I I I - 3

### EXPERIMENTO .

#### 3.A DESARROLLO DE LA PRUEBA TIPO .

El desarrollo de la prueba requiere de: fijar la mesa de pruebas (ver II-9, pág. 39) al pedestal, colocar el diafragma en la cámara hermética y de fijar perfectamente el manómetro a la conexión bomba-manguera. Todo esta listo para iniciar el presionado (cf. Fig. 24). Al comenzar es necesario bombear suavemente, haciendo que la aguja del manómetro alcance cada marca muy lentamente, esto permite que el diafragma vaya expandiéndose homogéneamente, con la ventaja de tener siempre un valor cercano para cualquier repentino descenso en la aguja. Es importante notar que inmediatamente antes que ocurra la ruptura del diafragma, se observa que la aguja alcanza una posición en la escala, pero tiene un ligero descenso\*, en el siguiente empuje se observa que al rebasar dicha posición, la aguja instantáneamente se desploma a cero, informándonos que ha ocurrido la ruptura, es en este valor que anotamos la presión de ruptura para dicho diafragma.

---

\* Debido a que el material comienza a fluir (región plástica), ver Fig. 3 página 7 .

### I I I - 3.B CALIBRADO DE LOS DIAFRAGMAS .

Una vez que se tienen cortados y troquelados los diafragmas del calibre más cercano al espesor deseado (ver - II-5, pág. 30), se procede a efectuarles el rebajado o cruz necesario, ranurando su lado convexo, midiendo cada vez, el espesor existente.

Esta medición se efectuó con la ayuda de un medidor de profundidad tipo "indicador de carátula" que consta por su parte inferior de un vástago retráctil, que al introducirse en el cuerpo del medidor, hace girar la aguja de lectura, proporcionando un valor en milímetros correspondiente a aquella disminución del vástago. El procedimiento a seguir en la medición de los diafragmas es el siguiente.

Debe montarse el medidor por su lado fijo sobre una mesa, abajo de él se coloca y fija un poste terminado en punta que se hace tocar con el vástago. Aquí, se ajusta el cero de la escala. En seguida se levanta el vástago para colocar el diafragma encima del poste, alineando la punta del vástago con el centro de la cruz del diafragma, y se libera el vástago, éste regresa y se observa entonces una disminución de su viaje. Disminución, que en la carátula del medidor, nos da el valor del espesor que se mide.

### I I I - 3.C HERRAMIENTAS Y APARATOS DE MEDIDA .

Las herramientas utilizadas en el montaje del diafragma en la cámara hermética, incluyen una llave francesa para aberturas de 1 1/2" y un medidor vernier para medir el

avance del apretado. La experiencia mostró que para sellar - herméticamente los diafragmas es necesario comprimirlos  $1 \text{ mm} \pm 0.2$ , si se excede esta compresión pueden guillotinarsse sus bordes.

Para medir la presión hidrostática que se genera en la bomba se tiene un manómetro marca WIKA que mide en dos escalas diferentes: la escala externa que alcanza hasta 10 - Kpsi. de presión y la escala interna que alcanza hasta 70 -- MPa con una precisión del 1%. Estas lecturas tienen una incertidumbre adicional de 0.5 MPa asociadas con la escala del manómetro.

Como ya lo hemos comentado en este mismo capítulo (sección 3.B) para medir los espesores de los diafragmas se utilizó un medidor de profundidad, con carátula graduada en centésimas de milímetro. Este aparato tiene por su parte inferior un vástago y por su parte superior un soporte para fi jación. El vástago es retráctil, definiendo así una medida - al introducirse en el cuerpo del medidor, esta cantidad re - presenta un espesor puesto que el vástago no ha regresado a su posición original. El medidor tiene una precisión del 1%.

#### I I I - 4 RECOMENDACIONES NECESARIAS .

Es necesario que al iniciar la experiencia, el equipo en general esté limpio de cualquier residuo o polvo, - para evitar daño a los portadiafragmas (ralladuras), que pro - voquen escapes de aceite.

Una precaución importante es, comprobar el nivel de aceite en la bomba hidráulica.

La observación previa del diafragma también es importante, esto es: las superficies deben estar aceptablemente lisas, la región donde se localiza la incisión en cruz debe ser cortada con mucha precisión, asegurando que los ejes de la cruz tengan la misma longitud y que se haya hecho un lijado suave en esta parte para evitar asperezas que dificulten medir la profundidad de surco.

Así mismo, es importante efectuar el montaje de los portadiafragmas siempre en la misma posición para poder determinar las posibles fugas de acuerdo a la zona manchada de aceite.

Finalmente, el apretado de los seis tornillos de la cámara hermética, debe ser uniforme alternado y suave para evitar estrangulamientos en el diafragma, esto es, que el diafragma funcione en cierta forma como junta de sellado.

#### I I I - 5      MODIFICACIONES .

Una modificación más ventajosa sería efectuar las hendiduras de los diafragmas mediante un método por electrólisis. Este método nos ofrece un hendido más limpio con bordes homogéneos y a la profundidad necesaria con precisión de centésimas de milímetro.

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y SELECCIÓN DE DIAFRAGMAS.

### I V - 1 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados experimentales son presentados en las Tablas I y II de acuerdo con la siguiente nomenclatura.

# Exp. representa el número de identificación de cada diafragma.

$\Delta r$  representa el espesor neto en el centro - del diafragma troquelado, antes de efectuar la hendidura en forma de cruz.

a representa el radio interior del diafragma.

X, Y las dimensiones de la cruz.

t la profundidad de la cruz.

$\Delta r' = \Delta r - t$  espesor efectivo del diafragma en la zona

debilitada por el corte en cruz.

Pr presión de ruptura expresada en MPa ( $10^6$  Pa)

En las Tablas I y II, todas las dimensiones están en milímetros excepto Pr que está en MPa .

El estudio de los datos obtenidos en esta tesis - permitirán valorar los experimentos efectuados.

Los resultados presentados en la Tabla I corresponden a diafragmas fabricados a partir de placa de duraluminio calibre 14 (2.0 mm de espesor nominal) y los de la Tabla II a diafragmas fabricados a partir de placa de duraluminio calibre 4 (6.0 mm de espesor nominal) .

# Exp	$\Delta r$	a	X	Y	t	$\Delta r'$	Pr MPa
# 9	1.94	56.0	29.8	29.4	1.59	0.35	1.96
#10	1.94	59.7	26.8	26.0	1.54	0.40	4.12
#11	1.97	57.2	23.8	23.4	1.26	0.71	5.49
#36	2.04	57.0	-----	-----	0.91	1.13	5.39
#17	1.93	56.0	19.4	19.9	0.77	1.16	6.37
#20	2.01	57.0	19.2	19.2	0.70	1.31	6.76
# 7	1.94	57.1	39.0	38.0	0.49	1.45	6.86
#18	1.97	58.2	-----	-----	0.38	1.59	6.86

TABLA I . Datos obtenidos para los Diafragmas con placa calibre 14 de espesor nominal (2.0mm).

# Exp	$\Delta r$	a	X	Y	t	$\Delta r'$	Pr	MPa
#35	3.83	57.8	28.4	29.8	1.58	2.25	16.38	
# 8	5.99	56.0	40.9	41.9	3.69	2.31	16.96	
#12	5.95	53.1	40.7	41.7	3.57	2.38	17.16	
#28	6.03	58.0	39.2	39.2	3.40	2.63	17.55	
#31	6.02	59.2	39.1	39.4	3.02	3.00	18.63	
# 5	6.00	58.4	40.3	39.7	2.50	3.45	20.98	
#30	6.05	58.3	-----	-----	2.35	3.70	21.08	
#33	6.04	56.9	-----	-----	1.34	4.70	23.53	

TABLA II . Datos obtenidos para los Diafragmas con placa calibre 4 de espesor nominal (6.00 mm) .

Se midió para cada diafragma todas las dimensiones que pueden repercutir en su presión de ruptura (TABLAS I y II). Nosotros sólo hemos encontrado una relación entre el espesor efectivo  $\Delta r'$  (variable independiente) y la presión de ruptura Pr (variable dependiente). La Fig. 26, representa la gráfica de dichas columnas.

Los datos de las columnas  $\Delta r'$  y Pr en la Tabla I - (Tabla II) corresponden a espesores inferiores (superiores) a 2.0 mm .

#### I V - 2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .

Reagrupando nuestros datos para diafragmas de 2.0 mm de espesor formamos la Tabla III .

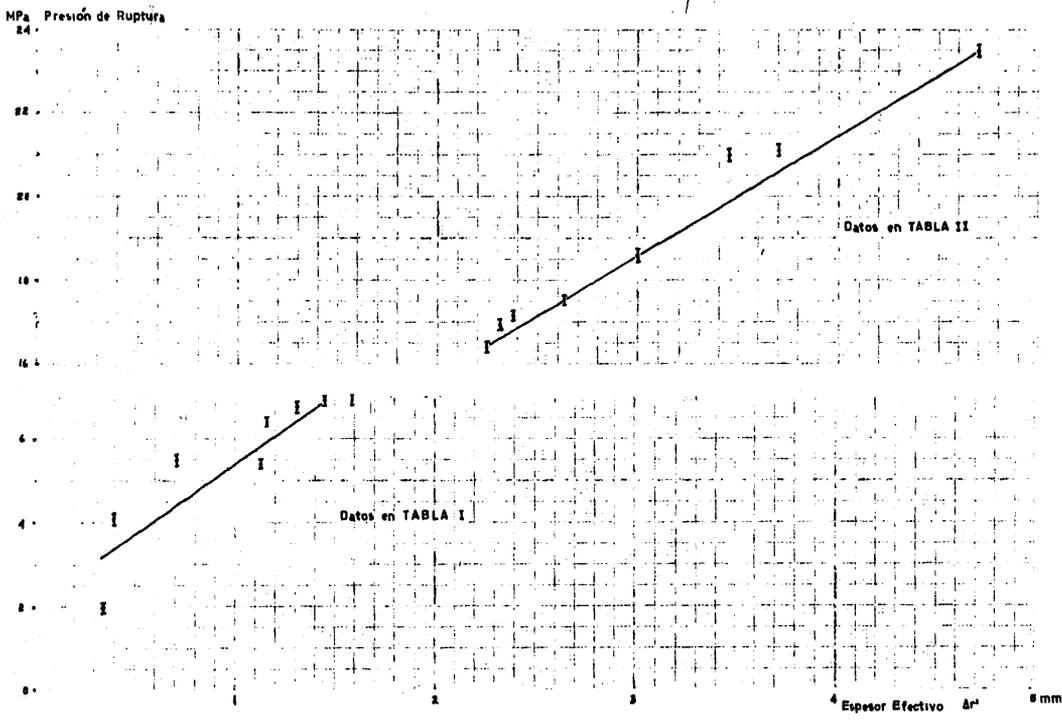


Fig. 26 Presión de Ruptura como función del espesor efectivo del Diafragma. Los puntos de la izquierda corresponden a placa de 2.00 mm de espesor neto, los de la derecha a placa de 6.00 mm de espesor neto.

Espesor Efectivo $\Delta r'$ X mm	Presión de Ruptura		Desviaciones de la Media				
	Y	MPa	$x=X-\bar{X}$	$y=Y-\bar{Y}$	$x^2$	$y^2$	xy
0.35	1.96		-0.66	-3.51	0.43	12.32	2.32
0.40	4.12		-0.61	-1.35	0.37	1.82	0.82
0.71	5.49		-0.30	0.02	0.09	0.00	0.00
1.13	5.39		0.12	-0.08	0.01	0.00	0.01
1.16	6.37		0.15	0.90	0.02	0.81	0.13
1.31	6.76		0.30	1.29	0.09	1.66	0.39
1.45	6.86		0.44	1.39	0.19	1.93	0.61
1.59	6.86		0.58	1.39	0.34	1.93	0.81
$\Sigma = 8.10$	$\Sigma = 43.81$				$\Sigma = 1.54$	20.47	5.09
$\bar{X} = 1.01$	$\bar{Y} = 5.47$						

TABLA III . Obtenida a partir de la Tabla I para hacer el análisis estadístico.

Como puede observarse en la parte izquierda de la Fig. 26, los puntos se colocan aproximadamente sobre una recta. La recta de regresión determinada por mínimos cuadrados,  $\hat{Y} = b(X - \bar{X}) + \bar{Y}$  tiene por datos:

$$\bar{X} = 1.01 \text{ mm}$$

$$\bar{Y} = 5.47 \text{ MPa}$$

$$b = \frac{\Sigma(xy)}{\Sigma x^2} = \frac{5.09}{1.54} = 3.30 \text{ MPa/mm} \quad (26)$$

$$\text{es decir : } \hat{Y} = 3.30 X + 2.14 \quad (27)$$

donde  $\hat{Y}$  es el valor estimado correspondiente a cualquier X (en MPa).

b la pendiente llamada coeficiente de regresión de muestra (MPa/mm).

$\bar{X}, \bar{Y}$  las coordenadas promedio en mm y MPa .

X el espesor efectivo, ( $\Delta r'$ ).

En seguida elaboramos la siguiente Tabla para comparar los puntos muestrales con las correspondientes  $\hat{Y}$  estimadas, para obtener medidas de la "bondad del ajuste" de la recta de mínimos cuadrados con los datos .

Espe- sor $\Delta r'$	Presión de Ruptura	Pres. de Rup. Estimada	Desviación de la Regresión	Cuadrado de la Desviación
X	Y MPa	$\hat{Y}$	$d_{y\hat{y}} = Y - \hat{Y}$	$d_{y\hat{y}}^2$
0.35	1.96	3.29	-1.33	1.77
0.40	4.12	3.46	0.66	0.44
0.71	5.49	4.48	1.01	1.02
1.13	5.39	5.87	-0.48	0.23
1.16	6.37	5.97	0.40	0.16
1.31	6.76	6.46	0.30	0.09
1.45	6.86	6.92	-0.06	0.00
1.59	6.86	7.39	-0.53	0.28
			$\Sigma = -0.03$	$\Sigma = 3.99$

TABLA IV . Comparación de las presiones de ruptura con los valores estimados, también se muestran las desviaciones .

La suma de los cuadrados de las desviaciones  $\Sigma d_{y\hat{y}}^2$  es la base de una estimación del error en el ajuste de la recta de mínimos cuadrados. Los correspondientes grados de libertad con  $n=8$  son  $n-2=6$  . Tenemos entonces:

$$S_{y\hat{y}}^2 = \frac{\Sigma d_{y\hat{y}}^2}{(n-2)} = 0.66 \text{ (MPa)}^2 \quad (28)$$

donde  $S_{y\hat{y}}^2$  es la "desviación cuadrada media de la regresión". Así que la "desviación estandar muestral de regresión" resultante, es:

$$S_{y\hat{y}} = 0.81 \text{ MPa}$$

Y la "desviación estandar muestral del coeficiente de regresión" es:

$$S_b = \frac{S_{y \cdot x}}{\sqrt{\sum x^2}} = 0.65 \text{ MPa/mm} \quad (29)$$

Si  $\beta$  representa el "verdadero" valor del coeficiente de regresión y  $b$  es su estimación, entonces  $(b - \beta / S_b)$  tiene distribución  $t$  de student con  $(n-2)$  grados de libertad. Puede decirse que con 95% de probabilidad:

$$b - t_{0.05} S_b \leq \beta \leq b + t_{0.05} S_b$$

donde  $t_{0.05} = 2.447$  es el valor de la  $t$  de student para 95% de confianza y  $n-2=6$  grados de libertad.

El verdadero valor del coeficiente de regresión  $\beta$  se encuentra en el intervalo  $1.7 \leq \beta \leq 4.9$  con 95% de probabilidad.

Predicción de la Línea de Regresión de Población con  $\hat{Y} - \mu = (\hat{Y} - \alpha) + (b - \beta)X$ . El error estandar estimado de  $\hat{Y}$  es

$$S_{\hat{Y}} = S_{y \cdot x} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^2}{\sum x^2}} = \sqrt{\frac{S_{y \cdot x}^2}{n} + \left(\frac{S_{y \cdot x}^2}{\sum x^2}\right) x^2}$$

$$S_{\hat{Y}} = \sqrt{0.082 + 0.43 x^2} \quad (30)$$

correspondiendo a cualquier  $\hat{Y}$ , la estimada de punto de  $\mu$ , es

$$\hat{Y} - t_{0.05} S_{\hat{Y}} \leq \mu \leq \hat{Y} + t_{0.05} S_{\hat{Y}} \quad (31)$$

La Tabla V , muestra los intervalos de confianza para la presión de ruptura y la Fig. 27, muestra gráficamente la zona de confianza .

Recta de Regresión			Franjas de Confianza			
Esposor $\Delta r'$	Presión de Ruptura Estimada	Desviación de la Media en x	Error st. Estimado	Intervalos de Confianza		
X mm	$\hat{Y}$ MPa	$x = X - \bar{X}$	$S_{\hat{y}}$	$tS_{\hat{y}}$	$\hat{Y} - tS_{\hat{y}}$	$\hat{Y} + tS_{\hat{y}}$
0.35	3.29	-0.66	0.52	1.27	2.02	4.56
0.40	3.46	-0.61	0.49	1.20	2.26	4.66
0.71	4.48	-0.30	0.35	0.85	3.63	5.33
1.13	5.87	0.12	0.30	0.73	5.14	6.60
1.16	5.97	0.15	0.30	0.74	5.23	6.71
1.31	6.46	0.30	0.35	0.85	5.61	7.31
1.45	6.92	0.44	0.41	1.00	5.92	7.92
1.59	7.39	0.58	0.48	1.16	6.23	8.55

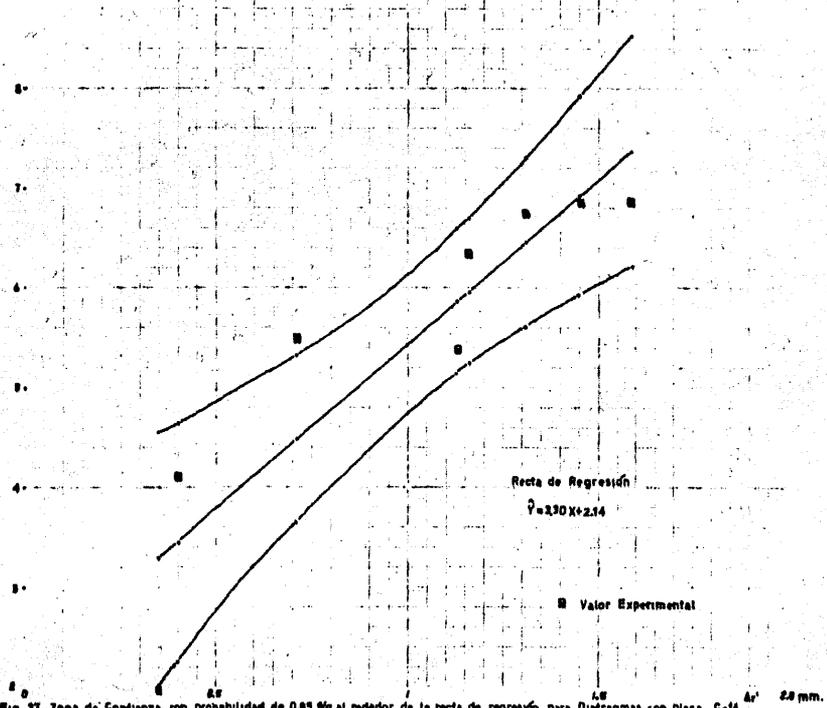
TABLA V . Franjas de confianza para la recta de Regresión de la Fig. 27 .

El coeficiente de correlación muestral r es:

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \approx 0.91 \quad (32)$$

Con esto, concluimos el análisis para los diafragmas de espesor nominal de 2.00 mm .

Presión de Ruptura  
MPa.



Un análisis similar al anterior se presenta enseguida para los diafragmas de espesor neto de 6.0 mm .

Reagrupando nuestros datos para diafragmas de 6.0 mm de espesor formamos la Tabla VI .

Espesor Efectivo $\Delta r'$ X mm	Presión de Ruptura		Desviaciones de la Media				
	Y	MPa	$x=X-\bar{X}$	$y=Y-\bar{Y}$	$x^2$	$y^2$	xy
2.25	16.38		-0.80	-2.65	0.64	7.02	2.12
2.31	16.96		-0.74	-2.07	0.55	4.28	1.53
2.38	17.16		-0.67	-1.87	0.45	3.50	1.25
2.63	17.55		-0.42	-1.48	0.18	2.19	0.62
3.00	18.63		-0.05	-0.40	0.00	0.16	0.02
3.45	20.98		0.40	1.95	0.16	3.80	0.78
3.70	21.08		0.65	2.05	0.42	4.20	1.33
4.70	23.53		1.65	4.50	2.72	20.25	7.42
$\Sigma = 24.42$	$\Sigma = 152.27$				$\Sigma = 5.12$	$\Sigma = 45.40$	$\Sigma = 15.07$
$\bar{X} = 3.05$	$\bar{Y} = 19.03$						

TABLA VI . Obtenida a partir de la Tabla II para hacer el análisis estadístico.

Como puede observarse en la parte derecha de la Fig. 26, los puntos se colocan aproximadamente sobre una recta. La recta de regresión determinada por mínimos cuadrados,  $\hat{Y} = b(X-\bar{X}) + \bar{Y}$  tiene por datos:

$$\bar{X} = 3.05 \text{ mm}$$

$$\bar{Y} = 19.03 \text{ MPa}$$

$$b = \frac{\Sigma(xy)}{\Sigma x^2} = \frac{15.07}{5.12} = 2.94 \text{ MPa/mm} \quad (33)$$

$$\text{es decir : } \hat{Y} = 2.94 X + 10.16 \quad (34)$$

donde  $\hat{Y}$  es el valor estimado correspondiente a cualquier X (en MPa)

b la pendiente llamada coeficiente de regresión de muestra (MPa/mm).

$\bar{X}, \bar{Y}$  las coordenadas promedio en mm y MPa .

X el espesor efectivo , ( $\Delta r'$ ).

En seguida elaboramos la siguiente Tabla para comparar los puntos muestrales con las correspondientes  $\hat{Y}$  estimadas, para obtener medidas de la "bondad del ajuste" de la recta de mínimos cuadrados con los datos .

Espesor $\Delta r'$ X	Presión de Ruptura Y MPa	Pres. de Rup. Estimada $\hat{Y}$ $\mu$	Desviación de la Regresión $d_{yx} = Y - \hat{Y}$	Cuadrado de la Desviación $d_{yx}^2$
2.25	16.38	16.67	-0.29	0.08
2.31	16.96	16.85	0.11	0.01
2.38	17.16	17.06	0.10	0.01
2.63	17.55	17.79	-0.24	0.06
3.00	18.63	18.88	-0.25	0.06
3.45	20.98	20.20	0.78	0.61
3.70	21.08	20.94	0.14	0.02
4.70	23.53	23.88	-0.35	0.12

$$\Sigma = 0.00 \quad \Sigma = 0.97$$

TABLA VII . Comparación de las presiones de ruptura con los valores estimados, también se muestran las desviaciones .

La suma de los cuadrados de las desviaciones  $\Sigma d_{yx}^2$  es la base de una estimación del error en el ajuste de la recta de mínimos cuadrados. Los correspondientes grados de libertad con  $n=8$  son  $n-2=6$  . Tenemos entonces:

$$S_{y \cdot x}^2 = \frac{\Sigma d_{yx}^2}{(n-2)} = 0.16 \text{ (MPa)}^2 \quad (95)$$

donde  $S_{y \cdot x}^2$  es la "desviación cuadrada media de la regresión". Así que la "desviación estandar muestral de regresión" resultante, es:

$$S_{y \cdot x} = 0.40 \text{ MPa}$$

Y la "desviación estandar muestral del coeficiente de regresión" es:

$$S_b = \frac{S_{y \cdot x}}{\sqrt{\sum x^2}} = 0.18 \text{ MPa/mm} \quad (36)$$

Si  $\beta$  representa el "verdadero" valor del coeficiente de regresión y  $b$  es su estimación, entonces  $(b - \beta) / S_b$  tiene distribución  $t$  de student con  $(n-2)$  grados de libertad. Puede decirse que con 95% de probabilidad:

$$b - t_{0.05} S_b \leq \beta \leq b + t_{0.05} S_b$$

donde  $t_{0.05} = 2.447$  es el valor de la  $t$  de student para 95% de confianza y  $n-2=6$  grados de libertad.

El verdadero valor del coeficiente de regresión  $\beta$  se encuentra en el intervalo  $2.50 \leq \beta \leq 3.38$  con 95% de probabilidad.

Predicción de la Línea de Regresión de Población con  $\hat{Y} - \mu = (\hat{Y} - \alpha) + (b - \beta)X$ . El error estandar estimado de  $\hat{Y}$  es

$$S_{\hat{Y}} = S_{y \cdot x} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^2}{\sum x^2}} = \sqrt{\frac{S_{y \cdot x}^2}{n} + \left(\frac{S_{y \cdot x}^2}{\sum x^2}\right) x^2}$$

$$S_{\hat{Y}} = \sqrt{0.02 + 0.03 x^2} \quad (37)$$

correspondiendo a cualquier  $\hat{Y}$ , la estimada de punto de  $\mu$ , es:

$$\hat{Y} - t_{0.05} S_{\hat{Y}} \leq \mu \leq \hat{Y} + t_{0.05} S_{\hat{Y}} \quad (38)$$

La Tabla VIII, muestra los intervalos de confianza para la presión de ruptura y la Fig. 28, muestra gráficamente la zona de confianza.

Recta de Regresión			Franjas de Confianza			
Espesor $\Delta r'$	Presión de Ruptura Estimada	Desviación de la Media en x	Error st. Estimado	Intervalos de Confianza		
X mm	$\hat{Y}$ MPa	$x = X - \bar{X}$	$S_{\hat{Y}}$	$tS_{\hat{Y}}$	$\hat{Y} - tS_{\hat{Y}}$	$\hat{Y} + tS_{\hat{Y}}$
2.25	16.67	-0.80	0.20	0.49	16.18	17.16
2.31	16.85	-0.74	0.19	0.46	16.39	17.31
2.38	17.06	-0.67	0.18	0.44	16.62	17.50
2.63	17.79	-0.42	0.16	0.39	17.40	18.18
3.00	18.88	-0.05	0.14	0.34	18.54	19.22
3.45	20.20	0.40	0.16	0.39	19.81	20.59
3.70	20.94	0.65	0.18	0.44	20.50	21.38
4.70	23.88	1.65	0.32	0.78	23.10	24.66

TABLA VIII . Franjas de confianza para la recta de Regresión de la Fig. 28 .

El coeficiente de correlación muestral r es:

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \approx 0.99 \quad (39)$$

Y concluimos el análisis para los diafragmas de espesor nominal de 6.00 mm .

Presión de Ruptura  
MPa

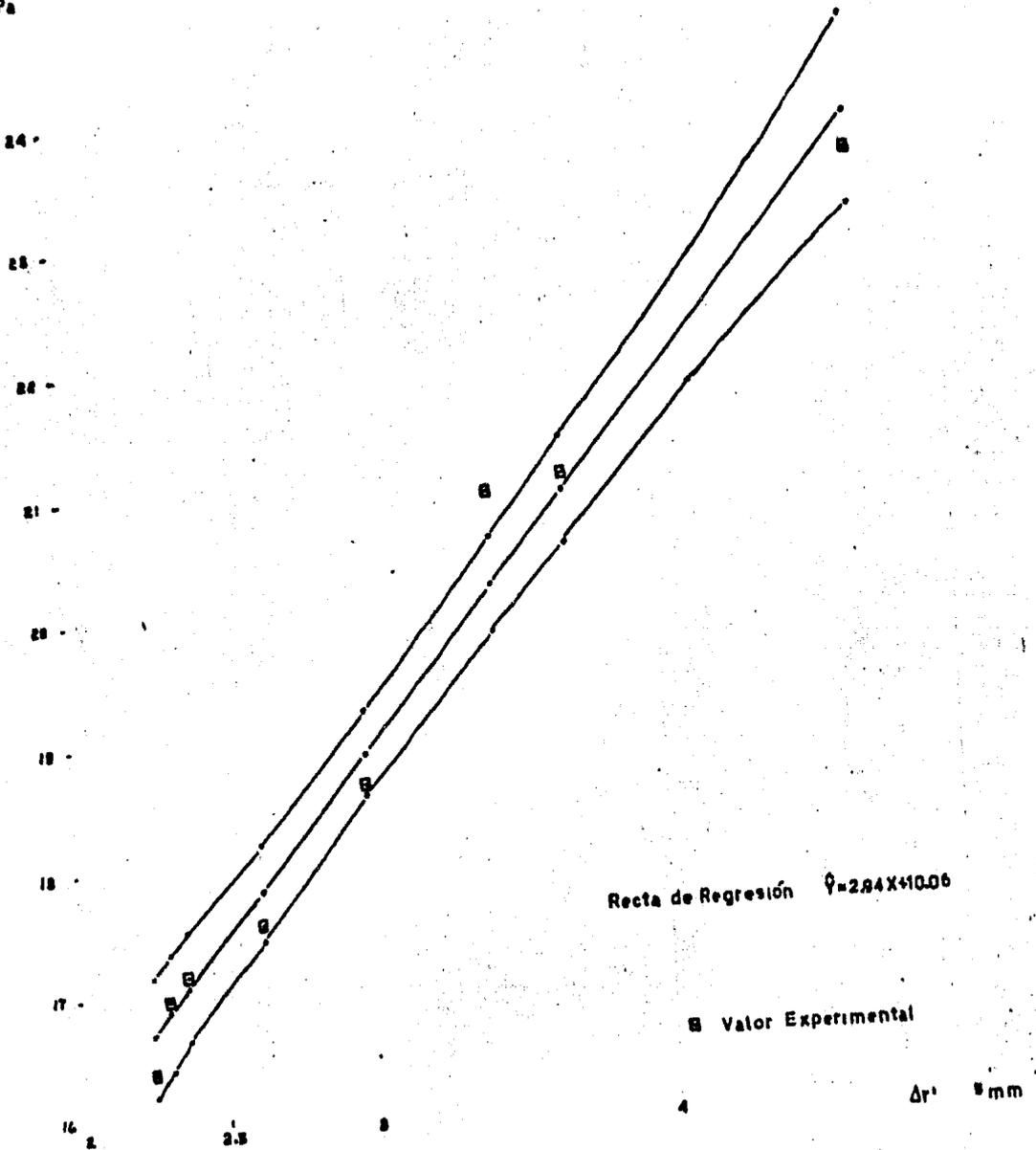


Fig 28 Zona de Confianza con probabilidad de 0.95% al rededor de la recta de regresión para Diafragmas con placa C4.

### I V - 3 SELECCIÓN DE DIAFRAGMAS.

El Generador de Ondas de Amplitud Finita, está diseñado para trabajar con una presión inicial de llenado del Tanque de Compresión entre 5 y 40 MPa.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten escoger un par de diafragmas, de manera que la presión de ruptura de este sistema se pueda fijar con una precisión idéntica a la del manómetro utilizado para controlar la presión del tanque de compresión.

Estos dos diafragmas deben seleccionarse de acuerdo con el siguiente criterio: Sea  $P$  la presión de llenado inicial del tanque de compresión con  $5 \text{ MPa} \leq P \leq 40 \text{ MPa}$ . Descaemos un sistema de diafragmas con presión de ruptura  $P$ . Consideramos la recta  $P_r = P/2$  en la gráfica espesor-presión de ruptura. Sea  $\Delta r'$  su intersección con la curva que limita inferiormente la zona de confianza. Seleccionemos entonces dos diafragmas de espesor  $\Delta r'$ . Estos dos diafragmas son iguales y constituyen el sistema de diafragmas.

Una vez montados los dos diafragmas, se procede al llenado del tanque de compresión y del volumen entre diafragmas hasta  $P/2$ , cerrando entonces la válvula de entrada al volumen entre diafragmas. Se continúa el llenado del tanque de compresión hasta la presión  $P$ . El tanque de compresión esta listo para el experimento.

Cada diafragma soporta una diferencia de presiones de  $P/2$ , correspondiente al límite inferior de ruptura de la franja de confianza de 0.95, (los diafragmas tienen --

probabilidad 0.025 de romper en estas condiciones) .

Para hacer el experimento se permite la salida -- del gas, contenido en el volumen entre diafragmas mediante la apertura de una válvula (que une este volumen con un tanque de expansión para no desperdiciar el gas). La diferencia de presión entre el volumen entre diafragmas y el tanque de compresión empieza a aumentar hasta que rompe el diafragma. La presión obtenida del tanque de compresión y la que había en el volumen entre diafragmas se aplica entonces contra el diafragma que separa al proyectil rompiendo este último .

La precisión esta dada por la presión con que se puede llenar el tanque de compresión.

Ejemplo: se desea hacer un experimento con  $P = 34$  MPa, consultando la gráfica espesor-presión de ruptura (Fig. 28) , la recta  $P_r = 17$  MPa corta la curva inferior en el punto correspondiente a  $\Delta r' = 2.5$  mm . Fabricemos dos diafragmas de espesor 2.6 mm (para mayor seguridad) .

Llenamos el volumen entre diafragmas y el tanque de compresión a 17 MPa, cerramos la entrada de gas al volumen entre diafragmas y continuamos el llenado del tanque de compresión hasta  $P = 34$  MPa .

En este momento, los diafragmas soportan una diferencia de presión de 17 MPa, como los diafragmas con  $\Delta r' = 2.6$  mm tienen presión de ruptura entre 17.3 y 18.1 MPa no rompen.

Para hacer el experimento, como dijimos más arriba, se permite la salida del gas entre diafragmas, aumentando la diferencia de presiones que soporta el diafragma del lado del tanque de compresión. Al romperse este (entre 17.3

y 16.1 MPa), el gas del tanque de compresión inmediatamente se aplica contra el diafragma que tiene al otro lado al proyectil, rompiendolo también y finalmente el gas se expulsa lanzando al proyectil, a lo largo del Tubo de Aceleración .

## CONCLUSIONES.

Se diseñó un sistema de diafragmas que permite realizar experimentos con el Generador de Ondas de Amplitud -- Finita. La presión de ruptura del sistema de diafragmas puede fijarse con una precisión  $\Delta P$  que coincide con la del manómetro utilizado para medir la presión en el Tanque de Compresión .

El diseño de estos diafragmas puede verse en la Fig. 18, pág. 30, fabricándoles de Duraluminio 1200 H-14 (94.5 % Al, 4% Cu, 0.5% Mn, 0.5% Mg, y proporciones menores de Hierro y Silicio), con el dispositivo mostrado en las Figs. 22 y 23 .

La selección del espesor del diafragma debe hacerse conforme al párrafo 3 del Capítulo IV, pág. 60 en donde también se detalló el principio físico del disparo .

Dada la importancia de caracterizar completamente al material que se utiliza en la fabricación de los diafragmas, se realizaron distintas pruebas para determinar su tamaño de grano (Ataque Químico y Pulido Electroquímico) en los Laboratorios de Metalurgia del Instituto de Física. Sin embargo los resultados obtenidos no fueron confiables.

## REFERENCIAS.

- (1) "SHOCK WAVES IN CONDENSED MATTER" 1983  
 Proceedings of the Am. Phys. Soc.  
 Topical Conference. North Holland (1984)  
 Edited by J. R. Asay, R. A. Graham,  
 G. K. Straub.
- (2) PRIETO F. E.  
 "EQUATION OF STATE OF METALS AT HIGH PRESSURES"  
 Escuela Latino Americana de Física. 1962.  
 UNIVERSIDAD DE MEXICO .
- (3) GEHRING JOHN W. Jr.  
 CH. IV, "THEORY OF IMPACT ON THIN TARGETS AND  
 SHIELDS AND CORRELATION WITH EXPERIMENT"  
 In book "HIGH-VELOCITY IMPACT PHENOMENA"  
 Edited by RAY KINSLOW  
 Academic Press 1970
- (4) GENIS JUAREZ E. A.  
 TESIS DE LICENCIATURA 1984  
 U.N.A.M.
- (5) TIMOSHENKO S.  
 "THEORY OF PLATES AND SHELLS"  
 McGraw-Hill Book Co, Inc. 1940  
  
 SOUTHWELL R. V.  
 "AN INTRODUCTION TO THE THEORY OF ELASTICITY"  
 Oxford University Press Second Ed. 1941  
 UNIVERSITY OF OXFORD
- (6) BARRETT C.R., NIX W.D., TETELMAN A.S.  
 "THE PRINCIPLES OF ENGINEERING MATERIALS"  
 Prentice-Hall, Inc. 1973  
 STANFORD UNIVERSITY, UNIVERSITY OF CALIFORNIA  
 AT LOS ANGELES.