



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

INCLINOMETRO PARA SUELOS BLANDOS

T E S I S

que presenta

ERNESTO HOLGUIN GOMEZ LAMADRID

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Mecánica de Suelos)

JURADO

DR. RAUL J. MARSAL CORDOBA . . . . .

DR. EULALIO JUAREZ BADILLO . . . . .

ING. GUILLERMO SPRINGALL CARAM . . . . .

DR. LEONARDO ZEEVAERT WIECHERS . . . . .

DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ. . . . .

EL COORDINADOR DE LA SECCION

LA SECRETARIA ACADEMICA

DR. J. ABRAHAM DIAZ RODRIGUEZ

M en I. GABRIELA MOELLER DE JALIFE



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 esta 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.

1.	INTRODUCCION	1
2.	OBSERVACIONES SOBRE LAS MEDICIONES DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL CON INCLINOMETRO CONVENCIONAL	3
2.1	<i>Limitaciones de la tubería</i>	3
2.2	<i>Limitaciones del torpedo de medición</i>	4
2.3	<i>Comentarios sobre el procedimiento de instalación de la tubería</i>	6
2.4	<i>Modificaciones convenientes al inclinómetro</i>	7
3.	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL INCLINOMETRO PROTOTIPO	9
3.1	<i>Tubería flexible</i>	9
3.1.1	Características geométricas	
3.1.2	Materiales utilizados	
3.1.3	Proceso de fabricación	
3.1.4	Comportamiento de la tubería	
3.2	<i>Torpedo para medir inclinaciones</i>	11
3.2.1	Características generales	
3.2.2	Soporte estructural instrumentado	
3.3	<i>Torpedo para medir giros horizontales</i>	13
3.3.1	Características generales	
3.3.2	Principio de operación	
4.	CALIBRACION DE LOS TORPEDOS DE MEDICION	15
4.1	<i>Calibración del torpedo de inclinaciones</i>	15
4.1.1	Dispositivo de calibración	
4.1.2	Calibraciones	
4.2	<i>Calibración del torpedo de giros horizontales</i>	18
4.2.1	Dispositivo de calibración	
4.2.2	Calibraciones	
5.	PROCEDIMIENTO DE ANALISIS DE LOS RESULTADOS	20
6.	SIMULACION DE LABORATORIO. COMPARACION ENTRE MEDICIONES EFEC- TUADAS DIRECTAMENTE Y CON EL INCLINOMETRO	23

6.1	<i>Descripción de las pruebas</i>	23
6.2	<i>Resultados obtenidos</i>	24
7.	TECNICA PROPUESTA PARA LA INSTALACION	28
7.1	<i>Investigación geotécnica</i>	28
7.2	<i>Material confinante</i>	29
7.3	<i>Colocación de la tubería</i>	29
8.	CONCLUSIONES	31
9.	AGRADECIMIENTOS	34
10.	REFERENCIAS	35
ANEXO Matriz de extrusión de los elementos de la tubería		

1.	INTRODUCCION	1
2.	OBSERVACIONES SOBRE LAS MEDICIONES DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL CON INCLINOMETRO CONVENCIONAL	3
	2.1 <i>Limitaciones de la tubería</i>	3
	2.2 <i>Limitaciones del torpedo de medición</i>	4
	2.3 <i>Comentarios sobre el procedimiento de instalación de la tubería</i>	6
	2.4 <i>Modificaciones convenientes al inclinómetro</i>	7
3.	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL INCLINOMETRO PROTOTIPO	9
	3.1 <i>Tubería flexible</i>	9
	3.1.1 <i>Características geométricas</i>	
	3.1.2 <i>Materiales utilizados</i>	
	3.1.3 <i>Proceso de fabricación</i>	
	3.1.4 <i>Comportamiento de la tubería</i>	
	3.2 <i>Torpedo para medir inclinaciones</i>	11
	3.2.1 <i>Características generales</i>	
	3.2.2 <i>Soporte estructural instrumentado</i>	
	3.3 <i>Torpedo para medir giros horizontales</i>	13
	3.3.1 <i>Características generales</i>	
	3.3.2 <i>Principio de operación</i>	
4.	CALIBRACION DE LOS TORPEDOS DE MEDICION	15
	4.1 <i>Calibración del torpedo de inclinaciones</i>	15
	4.1.1 <i>Dispositivo de calibración</i>	
	4.1.2 <i>Calibraciones</i>	
	4.2 <i>Calibración del torpedo de giros horizontales</i>	18
	4.2.1 <i>Dispositivo de calibración</i>	
	4.2.2 <i>Calibraciones</i>	
5.	PROCEDIMIENTO DE ANALISIS DE LOS RESULTADOS	20
6.	SIMULACION DE LABORATORIO. COMPARACION ENTRE MEDICIONES EFEC- TUADAS DIRECTAMENTE Y CON EL INCLINOMETRO	23

6.1	<i>Descripción de las pruebas</i>	23
6.2	<i>Resultados obtenidos</i>	24
7.	TECNICA PROPUESTA PARA LA INSTALACION	28
7.1	<i>Investigación geotécnica</i>	28
7.2	<i>Material confinante</i>	29
7.3	<i>Colocación de la tubería</i>	29
8.	CONCLUSIONES	31
9.	AGRADECIMIENTOS	34
10.	REFERENCIAS	35
ANEXO Matriz de extrusión de los elementos de la tubería		

## 1. INTRODUCCION

El inclinómetro es un instrumento que se utiliza para conocer la magnitud y distribución de los desplazamientos horizontales del subsuelo generados:

a) en un talud en condición de estabilidad límite, b) durante una excavación o c) por la construcción de una estructura. La medición se efectúa instalando en la masa de suelo una tubería segmentada con ranuras laterales, que se deforma al seguir los movimientos horizontales del suelo; la geometría deformada se obtiene midiendo los ángulos de inclinación respecto a la vertical de cada uno de los segmentos componentes de la tubería, con ayuda de un péndulo instrumentado que se baja a lo largo del tubo y siguiendo una orientación predeterminada\*.

La información obtenida con el inclinómetro se emplea para:

- Determinar la profundidad y forma de la superficie de deslizamiento de un talud en movimiento

\*Más adelante se ampliará este concepto.

- Conocer la magnitud, dirección y velocidad de los movimientos horizontales de un talud, tablestaca o terraplén (estructura y suelo de cimentación), durante la construcción y a largo plazo.
- Verificar teorías e hipótesis de diseño, mejorar procedimientos constructivos y evaluar la efectividad de medidas tendientes a estabilizar taludes.

En cada caso, la precisión de las mediciones depende de la compatibilidad existente entre el comportamiento del conjunto tubería-torpedo y el suelo en estudio; actualmente es común utilizar una tubería telescópica de aluminio (ref 1), que ha dado buenos resultados en obras de gran magnitud, donde los gradientes de desplazamiento son pequeños, es decir, del orden de algunos milímetros en varios metros. Sin embargo, cuando se trata de obras construidas en suelos blandos, el inclinómetro debe permitir medir desplazamientos del orden de los decímetros en espesores de suelo menores de 20 m; en estos casos, la rigidez de la tubería convencional impide seguir con fidelidad las deformaciones del suelo.

En este trabajo se describen las características de un inclinómetro desarrollado para medir grandes desplazamientos en suelos blandos; además se presentan los resultados de una simulación de laboratorio realizada para evaluar la confiabilidad de las mediciones con el inclinómetro propuesto. Finalmente, se hacen algunos comentarios y recomendaciones para el procedimiento de instalación de la tubería en el campo, el cual influye significativamente en los resultados de las mediciones con inclinómetro.



## 2. OBSERVACIONES SOBRE LAS MEDICIONES DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL CON INCLINOMETRO CONVENCIONAL

A continuación se hace una revisión de las limitaciones más importantes del inclinómetro comúnmente utilizado (ref 2), y además se enumeran las modificaciones que han servido de base para el desarrollo del inclinómetro propuesto.

### 2.1 *Limitaciones de la tubería*

La tubería debe tener las siguientes características: a) una deformabilidad lateral suficiente para reducir al mínimo la influencia de la rigidez de la tubería en los desplazamientos del suelo que la rodea, b) un radio de curva mínimo compatible con las dimensiones del torpedo de medición, para permitir su paso libremente, y c) una deformabilidad vertical que permita seguir asentamientos por consolidación.

La tubería de aluminio comúnmente utilizada (fig 1) consta de segmentos rec-tos de 1.50m de longitud, unidos entre sí mediante coples del mismo material,

sujetos con flejes o remaches de plástico; este tipo de ensamble tiene capacidad de deformación axial de 9% y radio de curvatura mínima de 7.7m antes de que se presenten deformaciones permanentes en los coples (ref 2).

Las características de esta tubería generan incertidumbres en la confiabilidad de las mediciones con inclinómetro convencional en suelos blandos por las siguientes causas:

- La rigidez de la tubería interfiere con los movimientos horizontales del suelo
- La capacidad de la tubería para telescopiarse depende de las deformaciones angulares en los coples
- La fricción entre cople y tubo provoca que las deformaciones axiales eventualmente se acumulen en sólo algunos puntos de la tubería, por lo cual pueden inducirse deformaciones horizontales asociadas a las verticales. En la ref 2 se muestra que en caso extremo, suponiendo dos segmentos de tubo unidos por una articulación, un centímetro de desplazamiento vertical generaría 12.4cm horizontales
- La longitud de los segmentos rectos de tubería generalmente se considera independiente de la magnitud del problema por analizar; así, es común utilizar tramos de 1.50m para mediciones en grandes presas y en terraplenes de altura reducida, admitiendo implícitamente que la escala del problema es irrelevante en las características de la instrumentación.

## 2.2 Limitaciones del torpedo de medición

La sonda para medir inclinaciones debe cumplir con los requisitos siguientes:

a) geometría y dimensiones compatibles con el espacio disponible en los tramos de mayor curvatura de la tubería, b) posibilidad de medir la orientación del plano donde ocurre la inclinación máxima, c) sensibilidad acorde con el desplazamiento angular máximo esperado y con el número promedio de lecturas de cada medición, y d) estabilidad del cero a cambios de temperatura.

Actualmente existen tres tipos de torpedos de uso común (Tabla 1); el diseño original, desarrollado por S.D. Wilson, tiene como elemento sensor un péndulo con un contacto en su extremo inferior, que subdivide una resistencia en dos segmentos, formando la mitad de un puente de Wheatstone; la otra parte del puente se encuentra en el receptor y consiste en un potenciómetro de precisión de 10 vueltas, operado manualmente para lograr el balance del puente. La lectura del potenciómetro al balancear el puente es proporcional a la inclinación del péndulo.

TABLA 1 CARACTERISTICAS DE LOS TORPEDOS DE MEDICION  
DE INCLINACIONES DE USO COMUN (REF 1)

Tipo de instrumentación	Sensibilidad*	Intervalo de operación	Altura total (cm)	Diámetro (cm)	Distancia entre ruedas (cm)
Péndulo y resistencia. Deformímetros eléctricos ( <i>strain gages</i> )	3'	$\pm 12^\circ$	57	6.0	30.5
Acelerómetros	1'	$\pm 53^\circ$ ( $\pm 90^\circ$ máx)	81.6	4.3	50.0

\*Nota: La sensibilidad del torpedo no es representativa de la precisión de las mediciones con el inclinómetro.

Posteriormente se desarrolló otro torpedo instrumentado con acelerómetros; en este aparato, el movimiento de una masa guía se registra por medio de unidades sensibles, las cuales generan una fuerza de sentido opuesto al movimiento por medio de una corriente eléctrica que fluye a través de una bobina. La magnitud de la corriente necesaria para detener el movimiento de la masa es proporcional a la inclinación del sensor con respecto a la vertical.

Finalmente, el tercer tipo de sonda está provisto de un péndulo cuyo soporte está instrumentado con deformímetros eléctricos (*strain gages*) con arreglo de un puente de Wheatstone completo; la lectura necesaria para balancear el puente es proporcional a la inclinación del péndulo.

Los torpedos descritos presentan los siguientes inconvenientes:

- Los instrumentados a partir de un péndulo poseen un plano principal de operación; cuando la tubería se deforma en un plano distinto al del péndulo sensor, las mediciones se ven afectadas por la fricción y torsión inducidas en el soporte del péndulo
- La sonda con acelerómetros permite medir simultáneamente en dos direcciones ortogonales, pero sus elementos sensores requieren de una camisa protectora de longitud considerable, lo cual impide su paso a través de tramos de tubería con gran curvatura.

### 2.3 Comentarios sobre el procedimiento de instalación de la tubería

La tubería de inclinómetro puede instalarse siguiendo dos procedimientos, según el tipo de estructura a instrumentar: colocándola en perforaciones pre-

vias o ensamblando sus tramos conforme se construye un terraplén.

En el primer caso se tienen las siguientes limitaciones:

- Los coples que unen los segmentos de tubería deben ser capaces de soportar el peso de la columna de tubos; debido a que esto se logra con flejes metálicos o remaches, se dificulta el deslizamiento posterior entre tubos y coples
- Durante el descenso de la tubería a través de la perforación, pueden ocurrir giros axiales (torsión) que desorienten las ranuras de referencia
- El espacio entre las paredes de la perforación y la tubería es usual rellenarlo con arena o mortero, independientemente de la rigidez y variaciones estratigráficas del suelo en estudio; por tanto, en un suelo blando, el conjunto tubería-relleno se comporta como una columna rígida.

Por otra parte, los inconvenientes antes descritos quedan prácticamente eliminados cuando la instalación se realiza en terraplenes.

#### *2.4 Modificaciones convenientes al inclinómetro*

Los comentarios de los incisos anteriores permiten concluir que para aumentar la confiabilidad de las mediciones con inclinómetro en suelos blandos se requiere:

- a) Aumentar la flexibilidad de la tubería; esto puede lograrse disminuyendo la longitud de sus tramos componentes para acercar los puntos capaces de deformarse
- b) Desarrollar un torpedo para medir inclinaciones en cualquier dirección, es

decir, sin que posea un plano principal de funcionamiento; esta sonda deberá tener además una geometría (longitud y diámetro) compatible con la flexibilidad de la tubería. En forma complementaria, debe contarse con una sonda capaz de registrar cualquier giro en las guías de referencia de la tubería

- c) Mejorar el procedimiento de instalación, colocando como relleno un material de rigidez comparable al suelo en estudio.

### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL INCLINOMETRO PROTOTIPO

En este capítulo se describe un inclinómetro diseñado para cumplir las características anotadas en el inciso 2.4.

Se eligió una tubería de plástico de sección cuadrada y una sonda instrumentada con deformímetros eléctricos (*strain gages*); el torpedo de medición de giros de la tubería se desarrolló con base en un potenciómetro eléctrico.

#### 3.1 Tubería flexible

##### 3.1.1 Características geométricas

La tubería está constituida por elementos de sección cuadrada de 78.7mm de lado exterior, paredes de 4mm de espesor y 42mm de altura (fig 2), ligados entre sí con tela adherida al exterior de sus paredes; la separación entre elementos cuadrados es de 8mm, con lo que se evita la eventual intrusión de la

tela al interior de la tubería en la condición de deformación máxima.

Por otra parte, debe señalarse que las aristas interiores de la tubería proporcionan la referencia requerida por la sonda durante las mediciones.

### 3.1.2 Materiales utilizados

Para la construcción de la tubería se eligieron materiales plásticos, que son anticorrosivos y no degradables durante una exposición prolongada al agua, ya que en condiciones usuales el inclinómetro operará bajo el nivel freático.

Los elementos cuadrados (fig 2) se fabricaron de poliestireno industrial de alto impacto; la continuidad de la tubería la proporciona una malla comercial de nylon, de 1.5mm de abertura e hilos trenzados de 0.3mm de espesor, adherida al exterior de los cuadrados con una pintura plástica de epoxy catalizado con poliamida.

### 3.1.3 Proceso de fabricación

Para la producción en serie de los elementos cuadrados de la tubería, se diseñó y construyó una matriz de extrusión adecuada a los procesos convencionales de fabricación de piezas de plástico por inyección. La geometría y dimensiones de las diversas piezas componentes de la matriz se muestran en el Anexo; en la fig 3 se presenta esquemáticamente la secuencia de fabricación.



La tubería se construyó en tramos de tres metros, utilizando una guía de madera para alinear los elementos de plástico con la separación de 8mm entre sí; la unión entre tramos consecutivos de tubería se resolvió utilizando placas de aluminio que sujetan los cuadrados extremos con remaches *pop*.

#### 3.1.4 Comportamiento de la tubería

El diseño de la tubería con las características descritas es susceptible de deformarse axialmente hasta 16% y tiene capacidad a la flexión correspondiente a un radio de curvatura mínimo de 0.70m (fig 4).

### 3.2 *Torpedo para medir inclinaciones*

#### 3.2.1 Características generales

En la fig 5 se muestran las partes componentes de la sonda; el elemento sensor está formado por una masa guía, sostenida por un vástago empotrado en un soporte estructural instrumentado; ambas piezas se identifican en la fig 5 con los números (1) y (2) respectivamente. El soporte instrumentado se apoya sobre la camisa de aluminio (4) y se fija firmemente con la tapa de la sonda (5), a su vez sujeta a la camisa con tornillos (6); el perno de fijación (7) determina la orientación del soporte.

La señal se envía al exterior por medio de un cable conductor blindado de ocho hilos (8), que sale por un orificio lateral en la tapa (5); el interior de la sonda queda impermeabilizado con un aro-sello (9), colocado entre la

tapa y la pared interior de la funda, y por un sello de silicón a la salida del cable conductor.

El movimiento de la sonda se guía con dos pares de ruedas laterales, uno fijo (10) y otro ajustable (11), que permiten orientarla durante su operación dentro de la tubería flexible. Adicionalmente, la sonda posee una pesa unida a su parte inferior con un cable acerado, para facilitar su paso a través de la tubería, particularmente en tramos de gran curvatura.

### 3.2.2 Soporte estructural instrumentado

Es un cilindro de acero SISA-VSP-40T en el que se labró un diafragma circular, dejando un engrosamiento en su parte central; en el diafragma se cortaron cuatro escotaduras simétricas para formar una cruz estructural, constituida así por cuatro vigas empotradas en sus extremos (fig 6); al centro del soporte se perforó un orificio para fijar el vástago de la masa guía.

El principio de operación es el siguiente: cuando la sonda de medición se inclina, la masa guía genera un momento al centro del soporte, el cual se transmite a las vigas como flexión y torsión combinadas, cuyas magnitudes dependen de la inclinación y orientación de la sonda.

Las deformaciones de las vigas se registran con deformímetros eléctricos (*strain gages*); en cada viga se adherieron dos extensómetros, con un arreglo de puente completo para cada dirección, formando así dos celdas (C1 y C2) con dos circuitos independientes. El circuito se complementó con tres resistores

para compensar los efectos de variación de temperatura; los resistores se adhirieron a la cara interna del anillo que constituye uno de los empotramientos de las vigas.

El diagrama de instrumentación y las características de las celdas se presentan en la fig 6.b.

### 3.3 *Torpedo para medir giros horizontales (torsión)*

#### 3.3.1 Características generales

El torpedo de medición de giros consta de tres partes principales (fig 7):

- a) una sonda que actúa como referencia superior y aloja al elemento sensor,
- b) una barra trasmisora de giros, la cual consta de dos flechas unidas por una junta universal, y
- c) una sonda para la referencia inferior.

En la fig 8 se muestra un corte longitudinal de la sonda de referencia superior; el elemento sensor consiste en un potenciómetro eléctrico radial, identificado en la figura con el número (1). El sensor se sujeta firmemente a la camisa de aluminio (2) por medio de tornillos (3); el vástago del potenciómetro se conecta a la barra trasmisora de giros (4) con un prisionero (5) que previene la pérdida eventual de la referencia.

La barra (4) presenta un engrosamiento que permite apoyarla sobre un rodamiento (6), el cual reacciona sobre la tapa (7); este arreglo impide que la sonda de referencia inferior grave directamente sobre el sensor (1). La señal se

envía al exterior por medio de un cable blindado de 4 hilos (8), que sale por un orificio en la camisa protectora (2); el interior de la sonda se impermeabiliza con aro-sellos (9) y con un sello de silicona colocado a la salida del cable conductor.

El movimiento de la sonda se guía con dos pares de ruedas, uno fijo (10) y el otro ajustable (11).

Por otra parte, la sonda de referencia inferior consiste en un pequeño torpedo de aluminio sólido, guiado de igual manera que la sonda del sensor.

### 3.3.2 Principio de operación

El potenciómetro eléctrico permite determinar la orientación de las ruedas de la sonda de referencia inferior con respecto a la sonda superior; como las ruedas se apoyan en las aristas interiores de la tubería, el ángulo medido corresponde al giro relativo entre dos secciones de la tubería.

Repitiendo las mediciones a intervalos iguales a la distancia entre centros de las sondas de referencia (25cm), puede determinarse por integración numérica el giro de una sección de la tubería a cualquier profundidad con respecto a la orientación de las aristas en la superficie.

#### 4. CALIBRACION DE LOS TORPEDOS DE MEDICION

##### 4.1 *Calibración del torpedo de inclinaciones*

Para calibrar la sonda medidora de inclinaciones fue necesario construir un dispositivo que permitiera fijar con precisión: a) el ángulo vertical de inclinación  $\phi$  formado por el eje longitudinal de la sonda y la vertical que pasa por el centro de ella, y b) el ángulo horizontal  $\theta$  del plano de inclinación, medido con respecto al eje de la celda 1 del soporte estructural (fig 6.a). Ambas magnitudes angulares se ilustran esquemáticamente en la fig 9.

##### 4.1.1 Dispositivo de calibración

El aparato de calibración se fabricó con un tránsito topográfico modificado para permitir la colocación de la sonda en el lugar del anteojo; para ello, se adicionó un soporte de bronce fijando uno de sus apoyos laterales al círculo

lo altimétrico del tránsito, para determinar el ángulo vertical  $\phi$  con ayuda del vernier correspondiente.

Adicionalmente, en la parte central de la sonda se marcaron perimetralmente referencias a cada  $10^\circ$  a partir del eje de la celda 1 del soporte sensible, para fijar el ángulo horizontal  $\theta$ . En la foto de la fig 10 se presenta la sonda durante una de las calibraciones.

#### 4.1.2 Calibraciones

La sonda se orientó variando el ángulo horizontal  $\theta$  (fig 8) de  $0$  a  $360^\circ$  en incrementos de  $10^\circ$ ; en cada una de estas posiciones, se hizo variar la inclinación  $\phi$  de la sonda de  $0$  a  $45^\circ$ , con incrementos de  $1^\circ$  para  $0^\circ < \phi < 10^\circ$  y de  $5^\circ$  para  $10^\circ < \phi < 45^\circ$ , además de  $\phi = 0.5^\circ$ .

El procedimiento de calibración es el siguiente:

- a) Se nivela el dispositivo de calibración
- b) Se monta y sujeta la sonda en el soporte, orientándola según el  $\theta$  deseado con ayuda de las marcas exteriores
- c) Se coloca la sonda verticalmente, lo cual corresponde a una lectura  $\phi = 0^\circ$  en el círculo altimétrico
- d) Se toman las lecturas de las celdas 1 y 2 del soporte sensible con un puente de Wheatstone
- e) Se varía  $\phi$  según la secuencia descrita, repitiendo (d) en cada posición.

En la fig 11 se muestra la calibración de la celda 1 para valores de  $\theta$  entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; el comportamiento es similar en los demás cuadrantes y en la celda 2. Las gráficas correspondientes a cada dirección no son lineales debido a que para todo  $\theta$  y  $\phi$  no nulos, la masa guía induce en las vigas del soporte sensible (fig 6) un estado de flexión y torsión combinadas.

Para el uso práctico de las calibraciones se utiliza la presentación de la fig 12, con la cual puede obtenerse el  $\theta$  y  $\phi$  correspondiente a una pareja de lecturas de las celdas 1 y 2; en forma complementaria, en la fig 13 se presenta la calibración en escala doble logarítmica, que facilita la interpolación. En estas gráficas se observa que la sensibilidad de la sonda es de  $\theta = \pm 2^\circ$  y  $\phi = \pm 0.5^\circ$  en todo el intervalo considerado.

Finalmente, cabe aclarar que la asimetría de las curvas de calibración con respecto a los ejes de cada celda, C1 y C2, se debe a errores de alineación de los deformímetros eléctricos con respecto al eje longitudinal de las vigas instrumentadas (ver fig 6); por otra parte, la salida de las celdas, es decir, el número de unidades de puente correspondiente a un intervalo de valores de  $\phi$ , puede igualarse agregando un resistor al circuito, para obtener una sensibilidad homogénea en ambos ejes C1 y C2. Con este arreglo, las curvas de calibración corresponderían a círculos concéntricos con ecuaciones fácilmente programables en una computadora, lo cual reduciría notablemente el tiempo de procesamiento de las lecturas.

## 4.2 Calibración del torpedo de giros horizontales

En este caso se construyó un dispositivo que permitiera variar (fig 14):

a) el ángulo horizontal  $\Delta\theta$  entre los planos verticales en que se alojan las ruedas de cada sonda de referencia, y b) el ángulo vertical  $\phi$  definido por los ejes de las flechas de la barra transmisora de giros.

### 4.2.1 Dispositivo de calibración

El torpedo de giros horizontales se calibró utilizando el dispositivo para el torpedo de inclinaciones (ver inciso 4.1.1), al que se le adicionó un soporte formado por una pieza de bronce guiada con dos placas paralelas de nylon; las guías de nylon tienen un borde en forma de arco circular, con marcas a cada grado, que permiten sostener la sonda de referencia superior con distintas inclinaciones respecto a la vertical. El giro entre sondas se fija con ayuda del tránsito; en las fotos de la fig 15 se muestra el dispositivo de calibración.

### 4.2.2 Calibraciones

Las calibraciones se efectuaron variando el ángulo vertical  $\phi$  (fig 14) en incrementos de  $5^\circ$ , en un intervalo de  $\pm 20^\circ$ ; para cada inclinación, se cambió la orientación de la sonda de referencia inferior con giros horizontales  $\Delta\theta$  entre  $+10^\circ$  y  $-10^\circ$  con respecto a la posición inicial en incrementos de  $1^\circ$ .

Los pasos a seguir en la calibración son los siguientes:



- a) Se nivela el dispositivo de calibración
- b) Se montan y sujetan las sondas de referencia en los soportes de bronce; la sonda inferior se fija en posición vertical, correspondiente a una lectura  $\phi = 0^\circ$  en el círculo altimétrico
- c) Se coloca la sonda superior en el ángulo de inclinación  $\phi$  deseado con ayuda de las marcas en las guías de nylon
- d) Se toma la lectura del potenciómetro eléctrico con un voltímetro
- e) Se varía  $\Delta\theta$  de acuerdo al procedimiento descrito, repitiendo (d) para cada orientación.

La fig 16 presenta los resultados de las calibraciones; se observa que la respuesta del potenciómetro es lineal en todo el intervalo considerado, sin existir diferencias apreciables para los distintos ángulos de inclinación  $\phi$ .

La constante obtenida es  $7.143^\circ/V$ , con una sensibilidad del torpedo  $\Delta\theta = \pm 0.1^\circ$ , mayor que la del torpedo para medir inclinaciones, lo cual garantiza la confiabilidad de las correcciones de orientación de la tubería.

## 5. PROCEDIMIENTO DE ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presenta un procedimiento simplificado de cálculo basado en la hipótesis de que el cable de la sonda sigue el eje de la tubería durante las mediciones a distintas profundidades; así, conociendo la longitud de cable entre mediciones  $M$  y la pareja de valores  $\theta$  y  $\phi$  correspondiente, pueden determinarse las proyecciones de la deformada en dos planos ortogonales (fig 17).

Las coordenadas de los puntos pertenecientes a la deformada se obtienen haciendo una integración de los cambios de inclinación a lo largo de la tubería, medidos a partir del punto superficial  $P_1$  cuya posición debe determinarse con mediciones topográficas de precisión; así, para un punto  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  se tiene:

$$x_i = \sum_{j=1}^i x_j; \quad y_i = \sum_{j=1}^i y_j; \quad z_i = \sum_{j=1}^i z_j \quad (1)$$

donde

$$x_j = M \operatorname{sen} \phi_j \cos \alpha_j \quad (2)$$

$$y_j = M \operatorname{sen} \phi_j \operatorname{sen} \beta_j \quad (3)$$

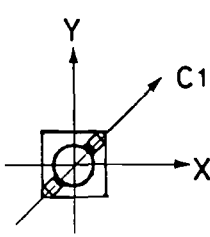
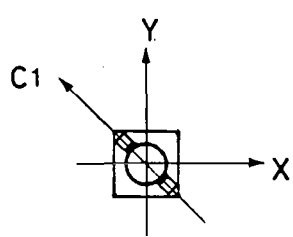
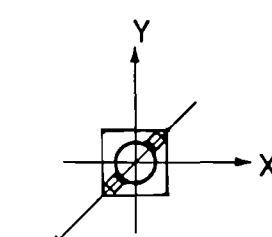
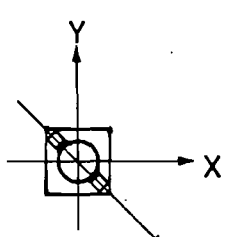
$$z_j = M \cos \phi_j \quad (4)$$

$\alpha, \beta$  magnitudes angulares función de  $\theta$  y de la orientación de la celda 1 (Tabla 2)

El resultado obtenido puede verificarse integrando a partir de la última lectura, en aquellos casos donde pueda suponerse fijo el extremo inferior de la tubería durante el proceso de deformación.

El error asociado al procedimiento de cálculo descrito no puede definirse con precisión, ya que depende de la sensibilidad de la sonda y la geometría de cada caso particular; además, varía con la profundidad y separación entre lecturas, no siempre es acumulativo y eventualmente puede compensarse. En el siguiente capítulo se describen las pruebas de laboratorio que permitieron acotar este error en geometrías típicas.

TABLA 2. CALCULO DE LAS COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE LA GEOMETRIA DEFORMADA

ORIENTACION DEL EJE DE LA CELDA 1		PRIMER CUADRANTE		SEGUNDO CUADRANTE		TERCER CUADRANTE		CUARTO CUADRANTE	
									
$\theta (^{\circ})$		$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
DE	A								
45	135	$\theta - 45$	$45 - \theta$	$135 - \theta$	$135 - \theta$	$\theta + 135$	$\theta - 45$	$315 - \theta$	$\theta - 135$
135	225	$45 - \theta$	$\theta - 225$	$\theta - 135$	$135 - \theta$	$225 - \theta$	$225 - \theta$	$\theta + 45$	$\theta - 135$
225	315	$\theta - 45$	$\theta - 225$	$135 - \theta$	$\theta - 315$	$\theta - 225$	$225 - \theta$	$315 - \theta$	$315 - \theta$
315	45	$45 - \theta$	$45 - \theta$	$\theta - 135$	$\theta - 315$	$225 - \theta$	$\theta - 45$	$\theta - 315$	$315 - \theta$

Para  $P_i(x_i, y_i, z_i)$

$$\left. \begin{aligned}
 x_i &= \sum_{j=1}^i x_j & ; & \quad x_j = M \operatorname{sen} \phi_j \cos \alpha_j \\
 y_i &= \sum_{j=1}^i y_j & ; & \quad y_j = M \operatorname{sen} \phi_j \operatorname{sen} \beta_j \\
 z_i &= \sum_{j=1}^i z_j & ; & \quad z_j = M \cos \phi_j
 \end{aligned} \right\}$$

## 6. SIMULACION DE LABORATORIO. COMPARACION ENTRE MEDICIONES EFECTUADAS DIRECTAMENTE Y CON EL INCLINOMETRO

A fin de evaluar la confiabilidad de las mediciones con el inclinómetro descrito, se efectuaron pruebas para ensayar la operación del instrumento y determinar la repetibilidad de las mediciones y el error asociado al procedimiento simplificado de cálculo, comparando los resultados de las mediciones con la geometría real.

### *6.1 Descripción de las pruebas*

Las pruebas de laboratorio consistieron en imponer a la tubería una geometría cuyo desplazamiento horizontal va aumentando con la profundidad; la simulación se efectuó en tres etapas: a) deformando la tubería en un solo plano (*serie 1*), b) agregando una componente de desplazamiento en un plano ortogonal (*serie 2*), y c) dando una ligera torsión en toda la longitud de la tubería (*serie 3*).

Para las pruebas fue necesario contruir una estructura que soportara la tubería y a la vez proporcionara un marco de referencia confiable; dicha estructura debería permitir sostener un tramo de tubería de 4m por lo menos y deformarla en dos planos ortogonales un máximo de 30cm a distintas profundidades.

Lo anterior se logró con una armadura (fig 18) de sección cuadrada de 60cm por lado y 6m de altura, con travesaños a cada 60cm; para dar los desplazamientos horizontales se construyeron soportes en forma de cruz (fig 19), que al apoyarse en los travesaños de la columna proporcionararan puntos de control a cada 60cm.

La columna se fijó al piso y a las paredes de una esquina para garantizar su rigidez; posteriormente se hicieron marcas en todos los travesaños con ayuda de un tránsito topográfico, según dos planos ortogonales; estas marcas sirvieron de apoyo para medir directamente los desplazamientos con ayuda de las crucetas.

En la fig 19 se ilustra esquemáticamente el uso de las cruces de fijación para el montaje y medición directa en una prueba.

## 6.2 Resultados obtenidos

En las figs 20 a 30 se muestran las proyecciones en dos planos ortogonales de las geometrías medidas directamente y las calculadas con los promedios de tres conjuntos de mediciones con los torpedos prototipo; las geometrías ensayadas y los resultados de cada serie se comentan a continuación.

a) *Serie 1.* Consistió en desplazar horizontalmente la tubería en la sección a 1.8m de profundidad, manteniendo los tramos extremos en posición vertical; el desplazamiento se hizo en incrementos de 5cm hasta alcanzar un máximo de 30cm, correspondiente a la mayor curvatura admisible. Las lecturas de inclinación se hicieron con una separación de 10cm (distancia entre las ruedas del torpedo), medida en el cable, para disminuir el error de interpretación.

Las gráficas obtenidas (figs 20 a 25) presentan las siguientes características:

- La magnitud del desplazamiento máximo se determinó con una diferencia horizontal de 0.2 a 1.4cm
- La profundidad del *pico* de desplazamientos calculado siempre está por arriba del punto de control correspondiente; la diferencia vertical máxima es de 6cm
- El ajuste entre la geometría medida directamente y la calculada es menor en el tramo localizado bajo el *pico* de desplazamientos; el error de medición aumenta con la magnitud del desplazamiento máximo
- El error asociado al tramo inferior de la tubería está comprendido entre 1 y 4.7cm
- El error por unidad de longitud de medición está comprendido entre 0.11 y 0.67% para el *pico* de desplazamientos y entre 0.23 y 1.15% en el tramo inferior
- Los errores por unidad de longitud de las pruebas 1 y 2 son los únicos que pueden compararse con el error asociado al torpedo convencional (Slope Indicator series 200B, ref 1), ya que en estos casos la pendiente máxima es menor de 6°; así, el error del inclinómetro propuesto (entre 0.11 y 0.22%) es como máximo 2.75 veces mayor al del inclinómetro convencional

b) *Serie 2.* A las geometrías de la *serie 1* con desplazamientos máximos de 10, 20 y 30cm se les agregó un desplazamiento ortogonal de 10cm en el extremo inferior de la tubería, lográndose así configuraciones deformadas en el espacio (figs 26 a 28); en las gráficas obtenidas se observa lo siguiente:

- La geometría calculada en el plano YZ (donde se aloja el *pico* de desplazamientos) se ajusta mejor a la configuración real que en la *serie 1*; estas diferencias pueden explicarse si se considera que existe un error asociado al control de profundidad de la medición el cual cambia su valor dependiendo de la trayectoria del cable dentro del tubo; por tanto, la precisión de la deformada calculada varía en los tramos que siguen a las zonas de mayor curvatura
- La geometría calculada en el plano XZ está ligeramente desplazada hacia arriba y a la derecha con respecto a la medición directa; el error es de 0.8 a 2.4cm medidos horizontalmente, correspondiendo el valor menor a la configuración donde el *pico* de desplazamientos es de 30cm
- El error de medición en las ordenadas aumenta con la magnitud del desplazamiento máximo (*pico*), mientras que en las abscisas sucede lo contrario
- El error por unidad de longitud se encuentra entre 0.22 y 0.67% tanto para el *pico* de desplazamientos como en el tramo inferior

c) *Serie 3.* A las geometrías de la *serie 1* con desplazamientos máximos de 5 y 25cm se añadió una componente de torsión axial uniforme en toda la longitud de la tubería; la desviación angular máxima entre las guías de las secciones extremas del tubo de 4m fue 14°; la separación entre lecturas de torsión fue 25cm (ver inciso 3.3.2). En estas pruebas se obtuvieron los resultados siguientes (ver figs 29 y 30):

- La geometría calculada en el plano donde se aloja el *pico* de desplazamientos



permanece sensiblemente igual a la obtenida en la *serie 1*

- La geometría calculada en el plano ortogonal XZ presenta ligeros desplazamientos con respecto a la vertical, principalmente a la altura del *píco* y en el tramo inferior, generándose una configuración espacial ficticia
- El desplazamiento lateral aparente inducido por la torsión de la tubería es de 0.4 a 1.8cm
- La geometría corregida con las mediciones de torsión (ver inciso 3.3.2) mostró diferencias máximas de 0.2cm con respecto a la configuración obtenida en la *serie 1*.

## 7. TECNICA PROPUESTA PARA LA INSTALACION

Las modalidades del procedimiento de instalación de la tubería de inclinómetro en perforaciones previas deben establecerse tomando en cuenta las características del suelo en el sitio y la obra por estudiar; por tanto, en el proceso de instrumentación deben contemplarse las siguientes etapas:

1. Investigación de la estratigrafía y propiedades de los suelos
2. Caracterización del material confinante
3. Colocación de la tubería

A continuación se describen brevemente cada una de ellas, enfatizando los aspectos más significativos para lograr un comportamiento adecuado de la tubería.

### 7.1 *Investigación geotécnica*

El estudio del subsuelo se efectúa conforme a la secuencia siguiente:

- a) Ejecución de sondeos con cono eléctrico para determinar las variaciones estratigráficas con la profundidad y definir los espesores de estratos blandos y duros
- b) Obtención de muestras inalteradas representativas de cada estrato
- c) Realización de ensayos de laboratorio para definir módulos de deformación de cada estrato
- d) Clasificación de los diferentes estratos de acuerdo a su rigidez relativa.

### 7.2 *Material confinante*

En el caso de suelos blandos resulta conveniente confinar la tubería con una mezcla de bentonita y el suelo del sitio, con características semejantes al suelo que la rodea; eventualmente puede requerirse agregar cemento en pequeñas proporciones cuando se atraviesen estratos de mayor rigidez. Para ello, en el laboratorio deberán realizarse ensayos con diferentes mezclas de suelo-bentonita-cemento-agua, tendientes a reproducir con mayor fidelidad la deformabilidad de los distintos estratos encontrados.

### 7.3 *Colocación de la tubería*

La secuencia de instalación es la siguiente:

- a) Se realiza una perforación de diámetro ligeramente mayor a la diagonal del tubo (p.ej. 5 pulg), profundizando el barreno más allá de la zona de influencia probable de la estructura en estudio; en los casos en que exista un estrato resistente a poca profundidad, conviene perforar en él unos tres metros como mínimo



- b) Se baja la tubería de inclinómetro dentro de la perforación con ayuda de una armadura o tubo guía interior que permita mantenerlo extendido, es decir, con deformación axial nula; el tubo deberá orientarse de manera que el probable plano principal de desplazamientos sea perpendicular a una de sus caras
- c) Se empotra la tubería en el estrato resistente, inyectando mortero en la base con ayuda de una manguera auxiliar sujeta al exterior del tubo; debe vigilarse que la cantidad de mortero inyectado sea igual al volumen necesario para rellenar el espacio anular entre la tubería y el estrato resistente, sin excederlo
- d) Se inyecta la mezcla suelo-bentonita-cemento-agua de propiedades similares a cada uno de los estratos atravesados
- e) Una vez totalmente rellenado el barreno, se esperará el tiempo necesario para permitir la restructuración del material confinante, que servirá además como soporte del tubo; en ese momento, se retirará la armadura guía y se efectuará la primera serie de lecturas de inclinaciones y torsiones, para conocer la posición inicial de la tubería.

## 8. CONCLUSIONES

- La precisión de las mediciones con inclinómetro depende de la compatibilidad existente entre el comportamiento de la tubería, su material confinante y el suelo en estudio, además de la sensibilidad de los torpedos de medición
- La tubería de inclinómetro propuesta admite curvaturas máximas correspondientes a un radio de 0.7m y deformación axial hasta de 16%
- El torpedo desarrollado para medir inclinaciones permite determinar, a partir de mediciones simultáneas en dos direcciones ortogonales, la magnitud de la inclinación máxima de la tubería y la orientación del plano vertical donde ocurre. La sensibilidad de esta sonda es  $\theta = \pm 2^\circ$  y  $\phi = \pm 0.5^\circ$  en las determinaciones del ángulo horizontal (*azímut*) y de inclinación máxima, respectivamente; esta sensibilidad puede aumentarse mejorando las características de los deformímetros eléctricos y modificando el diseño del

soporte estructural instrumentado para permitir que las celdas trabajen independientemente

- El torpedo de giros horizontales permite medir torsiones de la tubería con sensibilidad de  $\Delta\theta = \pm 0.1^\circ$ , mayor que la del torpedo registrador de inclinaciones
- La simulación de laboratorio permitió definir un error por unidad de longitud menor de 0,38% en las pruebas con desplazamiento lateral máximo de 15cm. Por otra parte, cuando la tubería alcanza su flexión máxima (correspondiente a desplazamientos de 30cm en 1.2m) este error puede incrementarse hasta 1.15% en los tramos subsecuentes a la zona de mayor curvatura; este error se debe a que la determinación de profundidad basada en marcas en el cable no es suficientemente precisa para conocer la posición de la sonda dentro de la tubería cuando ésta sufre deformaciones notables
- La torsión de la tubería en las geometrías ensayadas no modificó el cálculo de la configuración deformada en el plano de mayor desplazamiento; sin embargo, en un plano ortogonal se generó un desplazamiento ficticio de 6% del horizontal máximo
- El ajuste entre la geometría real de la tubería y la calculada depende del espaciamiento entre lecturas; por ello, conviene realizar una medición preliminar para identificar tramos de mayor curvatura y así aumentar la densidad de lecturas en esas zonas

- La importancia de utilizar un material confinante de rigidez similar al suelo en estudio para aumentar la confiabilidad de las mediciones requiere una investigación específica, no contemplada en este trabajo.
- Los resultados del trabajo experimental de laboratorio deben verificarse en el campo, instalando el inclinómetro propuesto y efectuando observaciones paralelas con un inclinómetro convencional, para determinar la influencia de la rigidez de la tubería en las mediciones de un caso real.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Raúl J. Marsal por la dirección y revisión crítica de esta tesis

Al Ing. Enrique Santoyo por sus valiosas ideas para la concepción general del inclinómetro desarrollado

Al Instituto de Ingeniería por el apoyo material prestado para la realización de este trabajo



## 10. REFERENCIAS

1. Mikkelsen, P.E. & Wilson, S.D., "Borehole inclinometers for slope stability problems", 5th Annual Short course on Field instrumentation of soil and rock, University of Missouri-Rolla, EUA, 1981
2. Santoyo V, E. y Díaz M, C., "Comportamiento de la tubería de inclinómetro en suelos blandos", Informe interno Proy. 1514, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1982

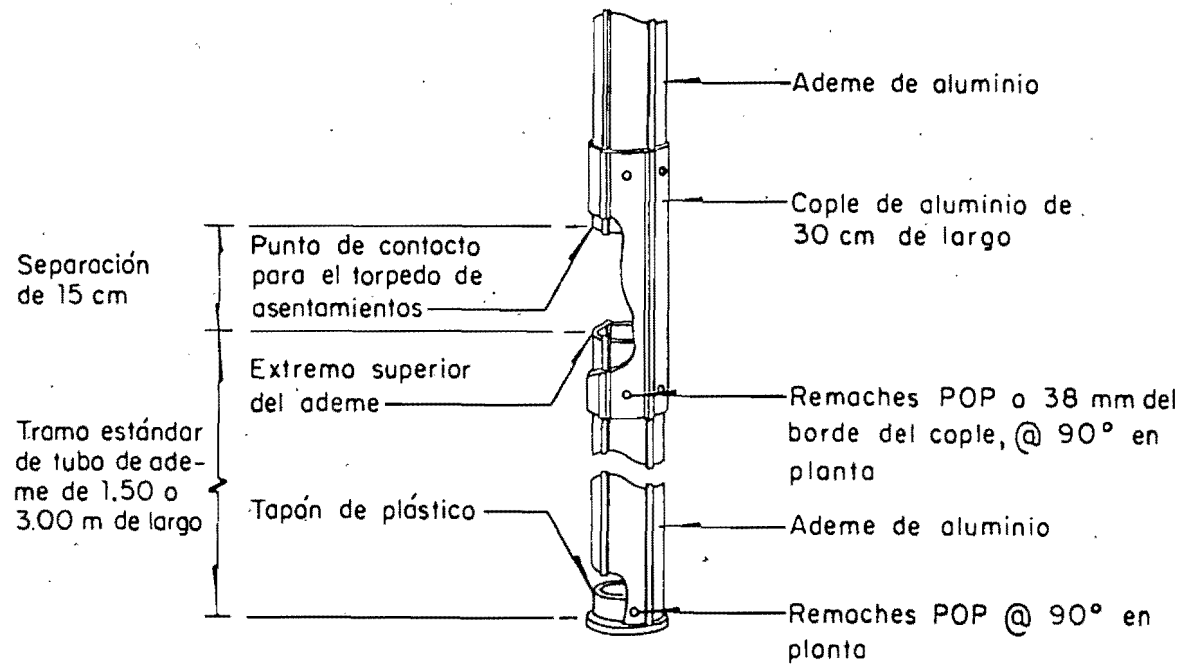
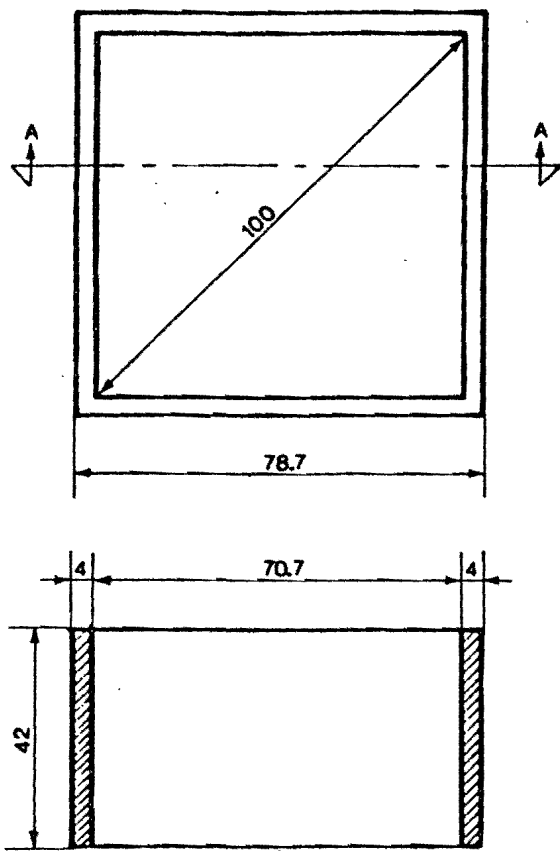
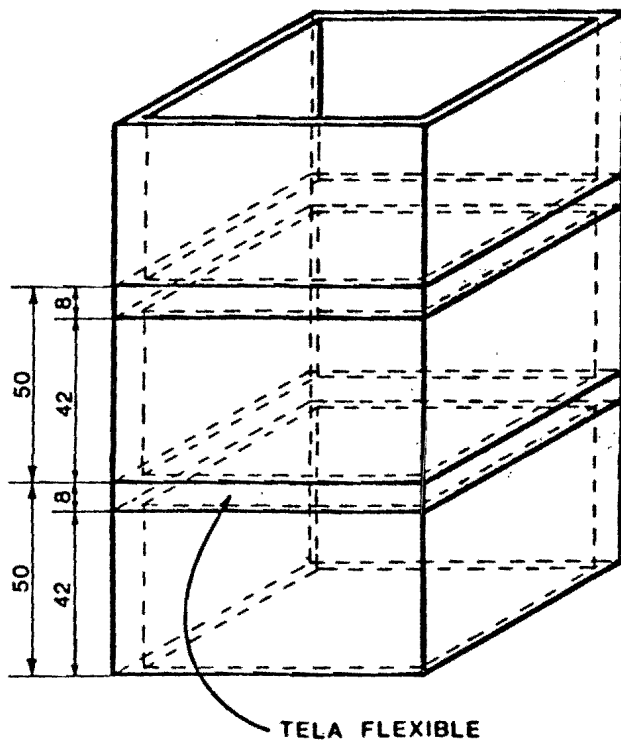


FIG 1. Tuberia de inclinómetro convencional

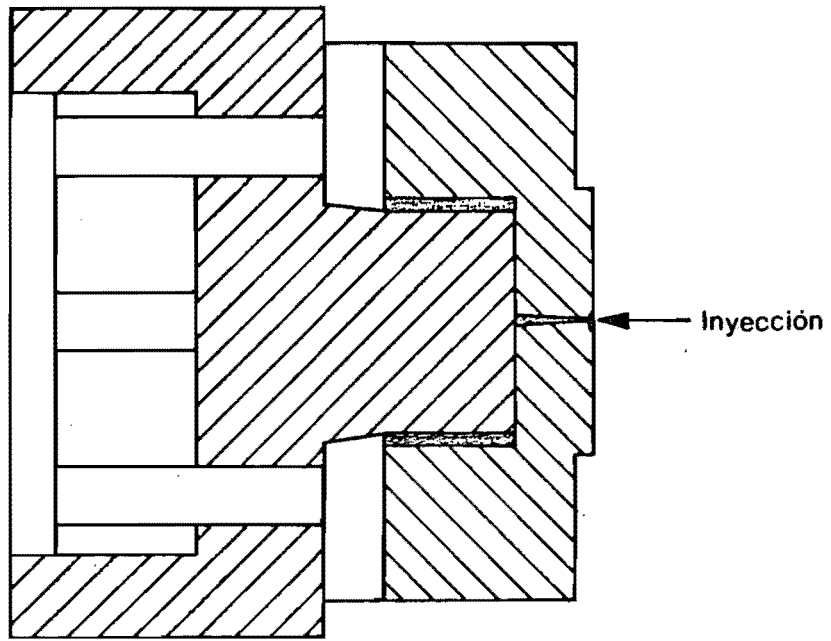


CORTE A - A

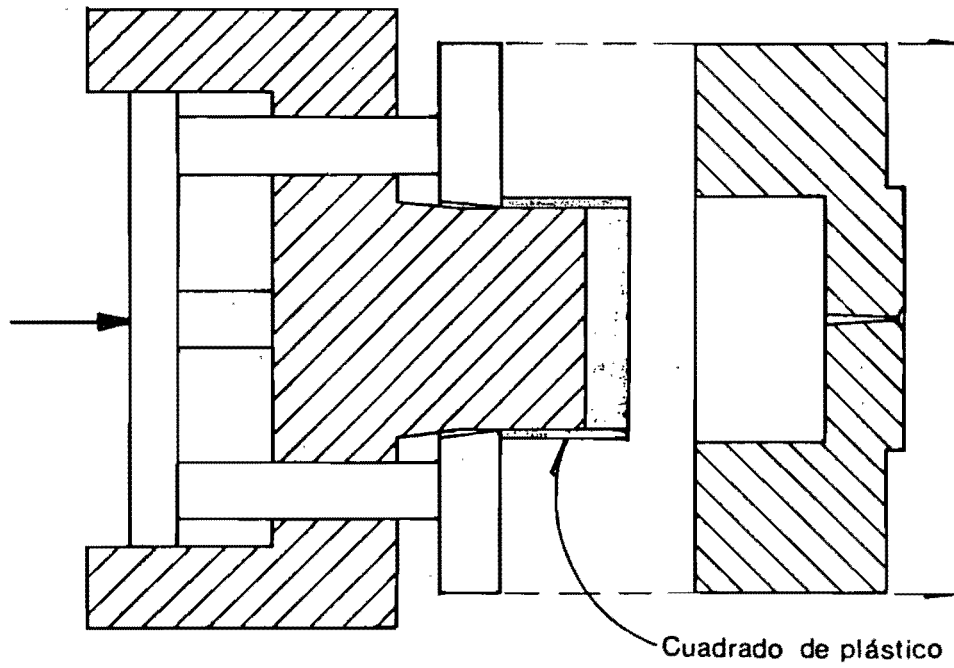


ACOT. mm

FIG 2. Elementos de la tubería



a) Inyección del poliestireno fundido



b) Enfriado y extrusión

FIG 3. Fabricación de los elementos de la tubería

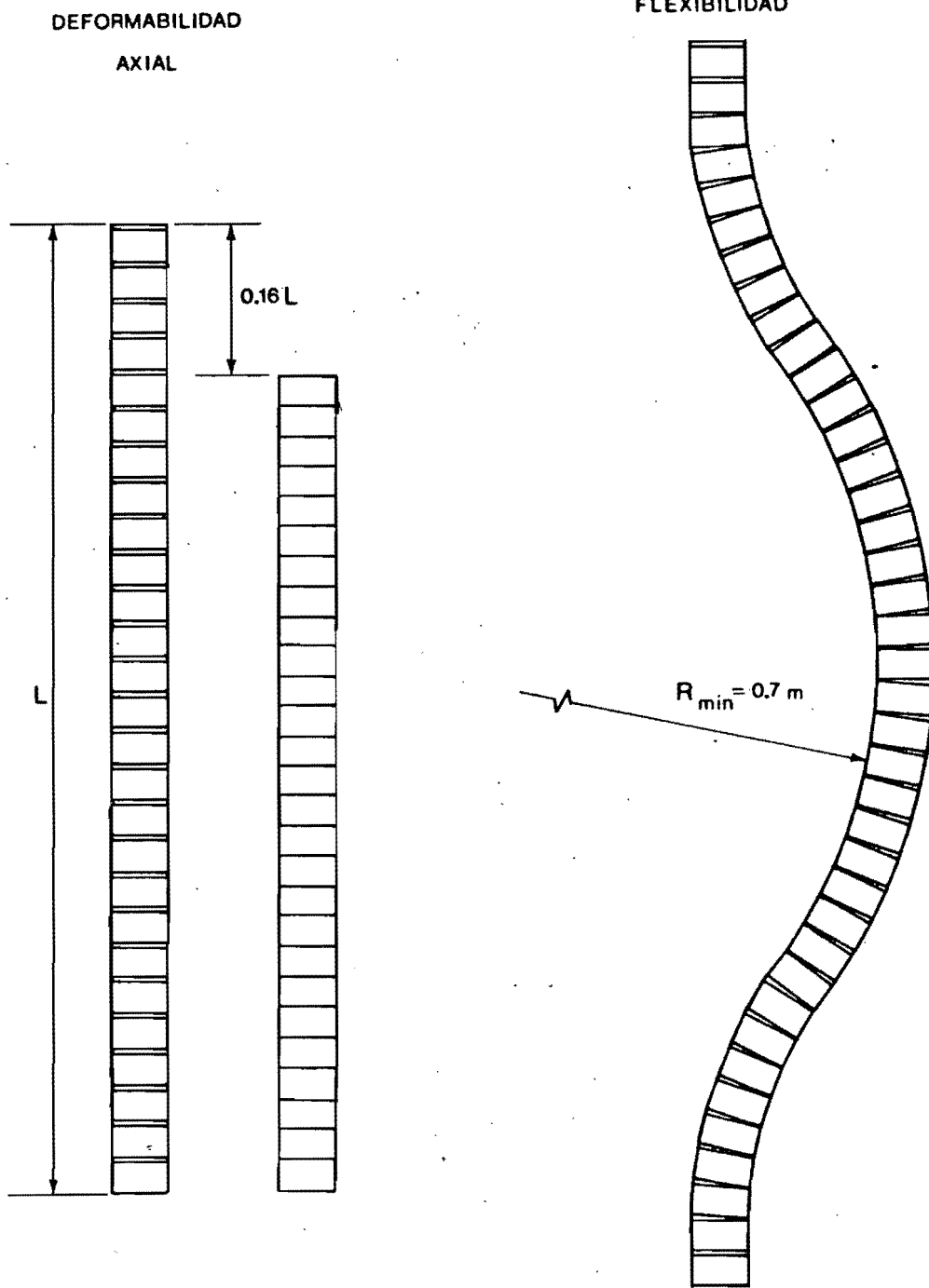
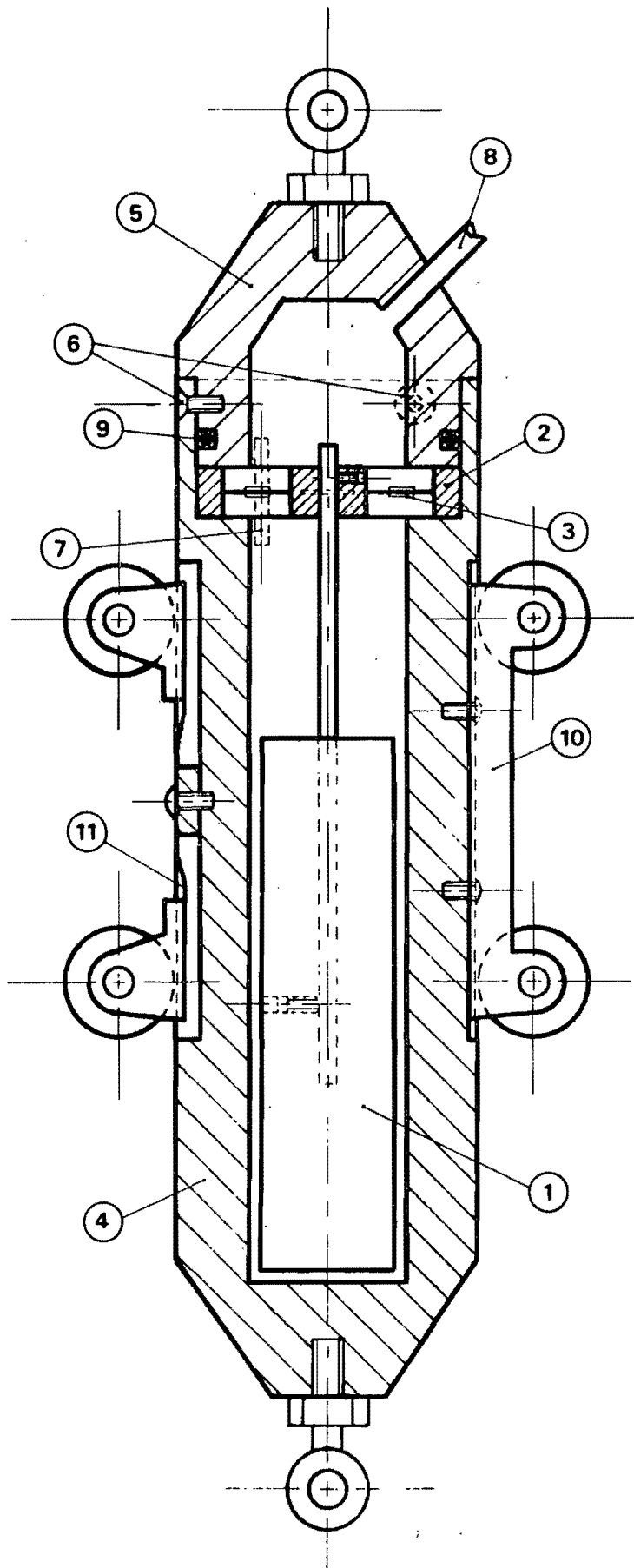
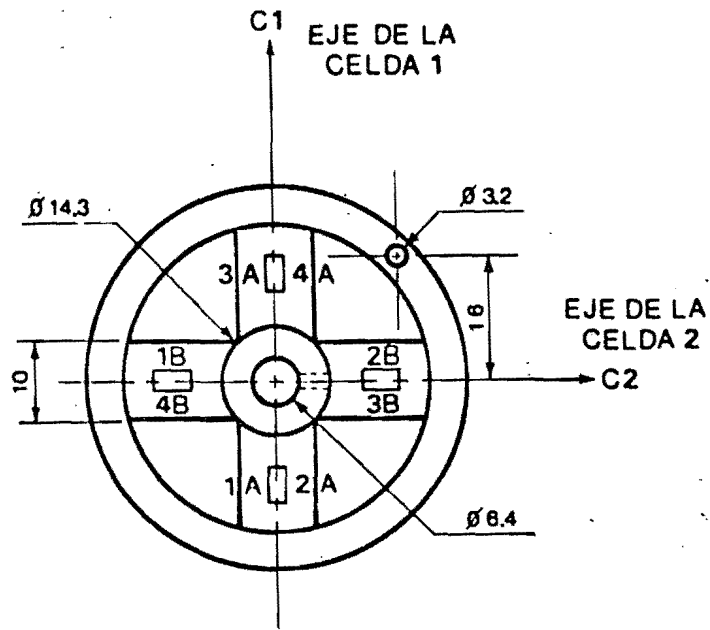


FIG 4. Deformabilidad de la tubería

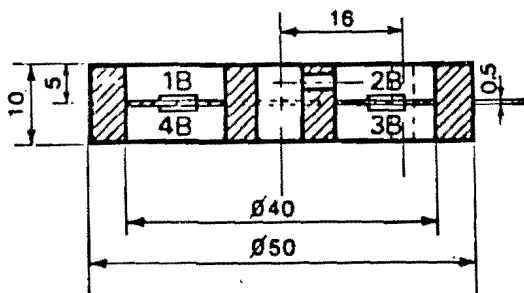


1. Masa guía
2. Soporte estructural sensible
3. Deformímetros eléctricos
4. Camisa de protección (Aluminio)
5. Tapa (Aluminio)
6. Tornillos de sujeción
7. Perno de orientación
8. Cable conductor blindado de 8 hilos
9. Arosello
10. Soporte de las ruedas fijas
11. Soporte de las ruedas movibles

FIG 5. Características de la sonda de inclinaciones

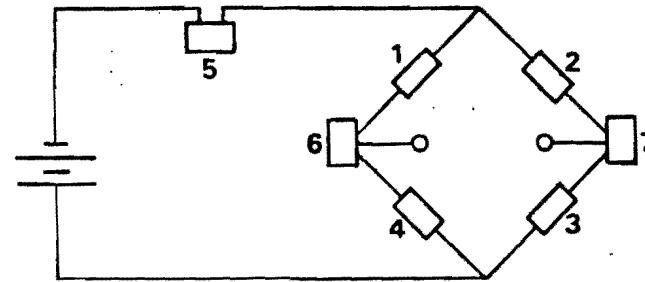


CORTE POR C2



ESC. 1:1  
ACOT. mm

a) Características geométricas



- 1 a 4. Deformímetros eléctricos de resistencia variable (*strain gages*) marca Micromeritics, cementados con adhesivo M-BOND-43B, impermeabilizados con M-COAT "D" y M-COAT "G".
5. Resistor de Balco\*, ajustado a  $60\Omega$  por cálculo.
6. Resistor de Cobre, ajustado por el método de ensaye y error, haciendo variaciones de temperatura.
7. Resistor de Constantán\*\*, ajustado por balance directo.

\* Balco-aleación de Níquel-Fierro.

\*\* Constantán-aleación de Cobre-Níquel.

b) Diagrama de instrumentación y características de las celdas

FIG 6. Soporte estructural instrumentado

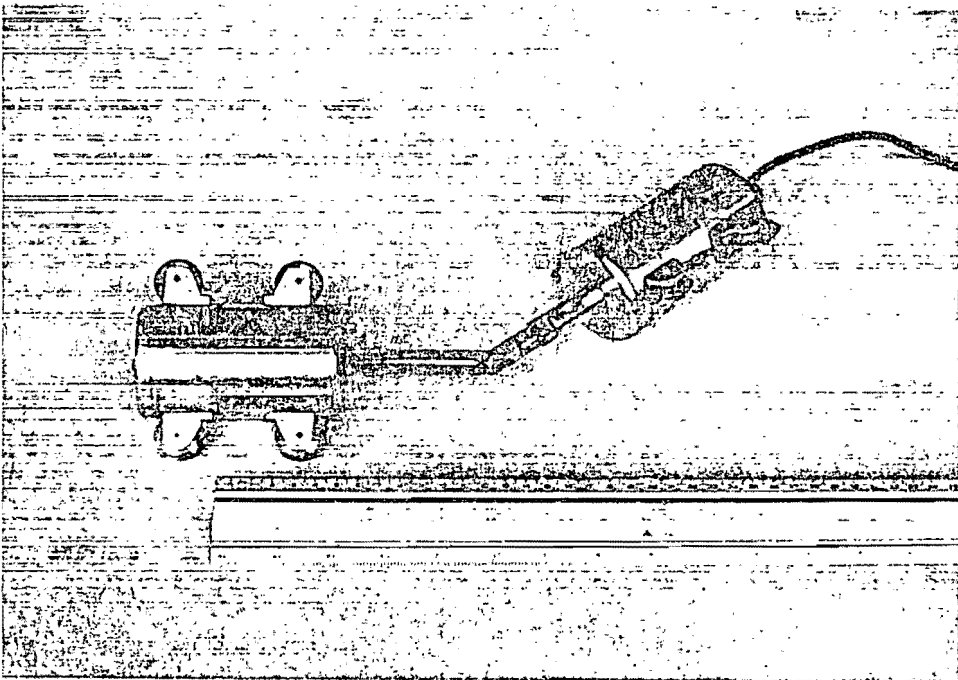
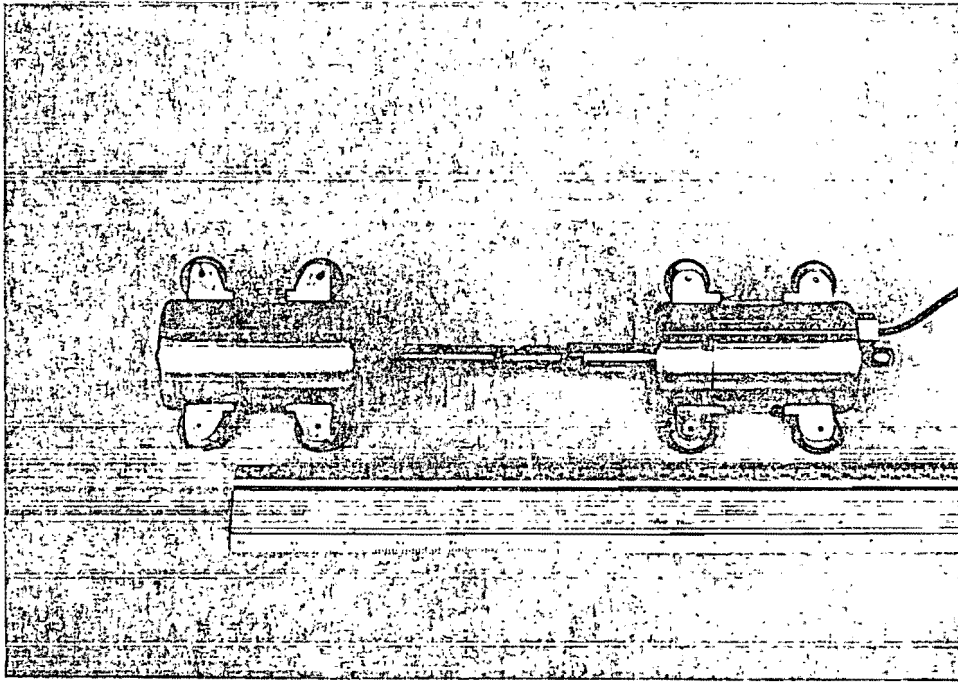
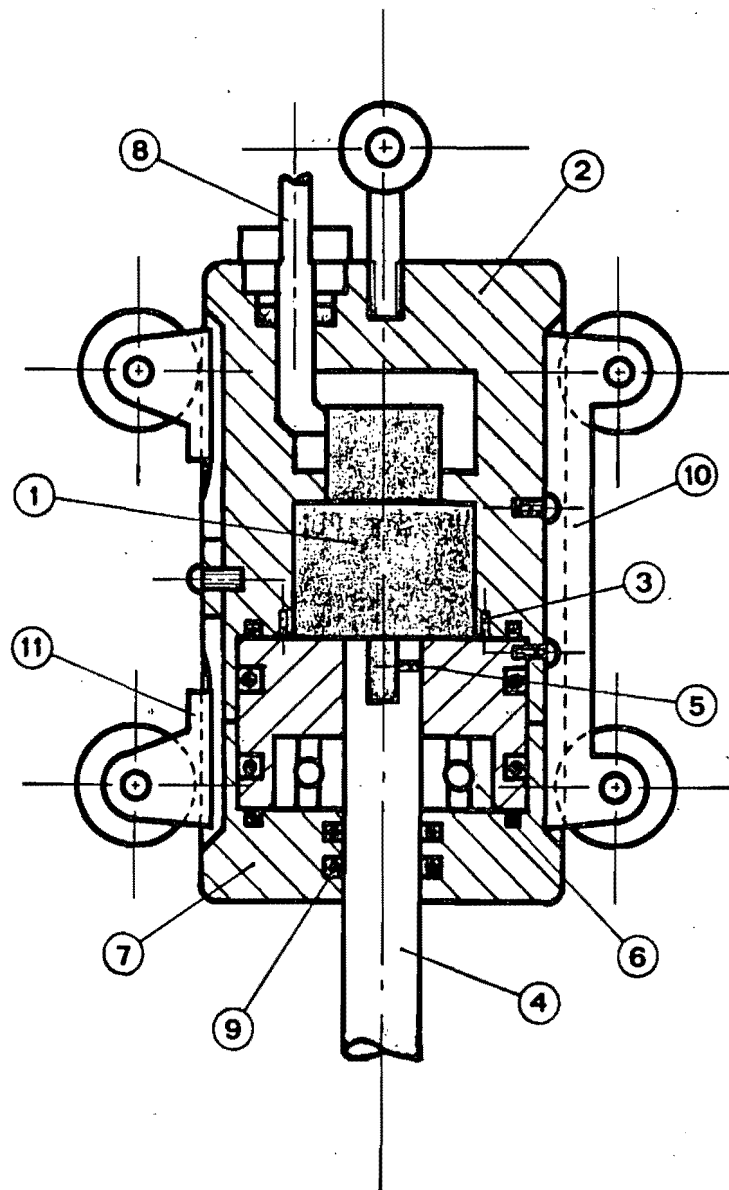


FIG 7 Torpedo para medir torsiones





1. Potenciómetro eléctrico radial
2. Camisa de protección (Aluminio)
3. Tornillos de sujeción
4. Barra transmisora de giros
5. Prisionero
6. Rodamiento
7. Tapa (Aluminio)
8. Cable blindado de cuatro hilos
9. Arosello
10. Soporte de las ruedas fijas
11. Soporte de las ruedas móviles

FIG 8. Características de la sonda superior para medir giros horizontales

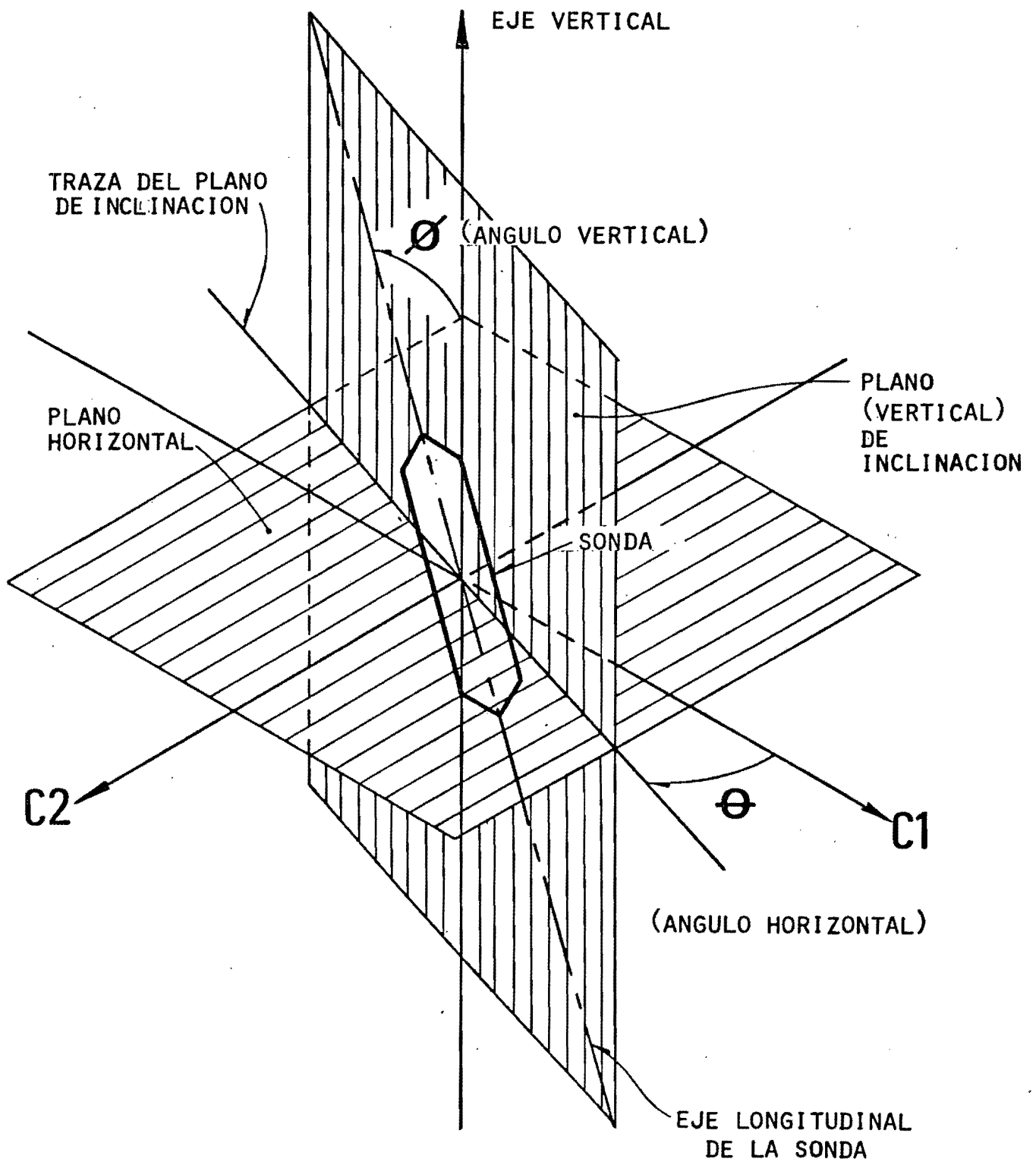


FIG 9. Magnitudes angulares necesarias para la calibración de la sonda

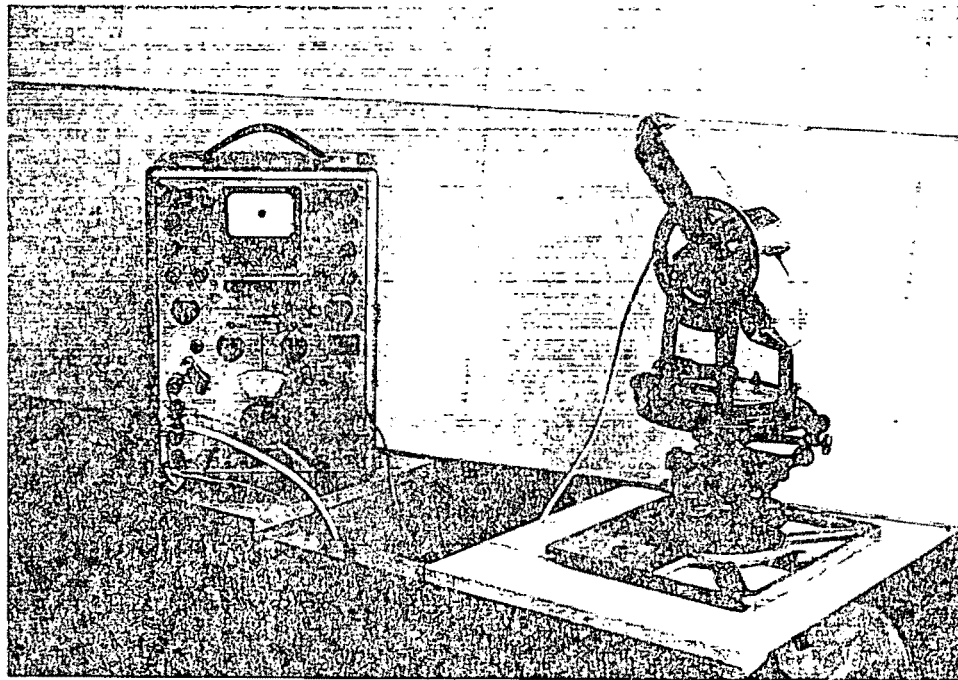
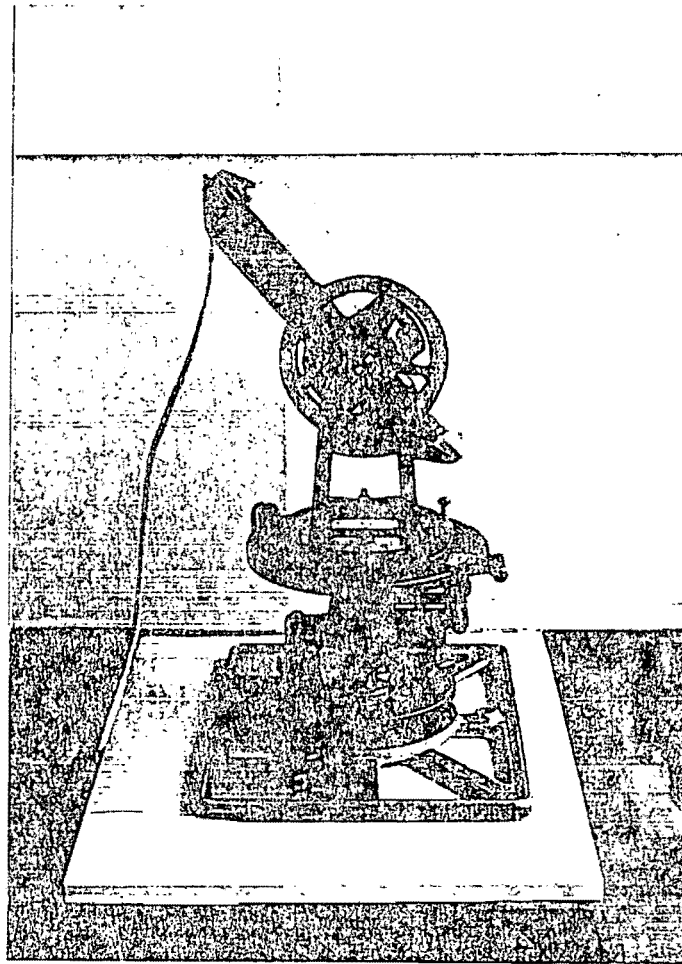


FIG 10 Calibrador del torpedo de inclinaciones

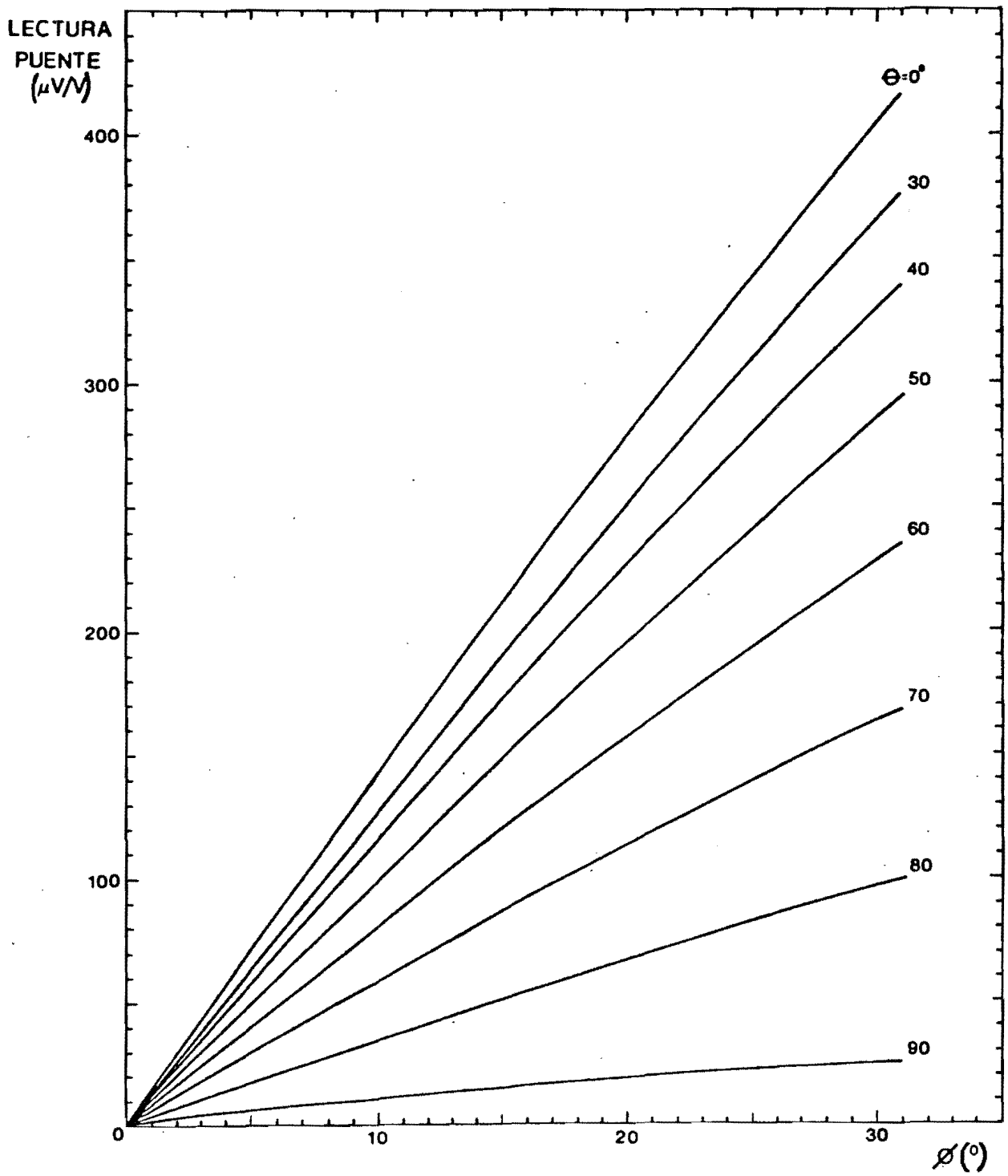


FIG 11. Calibración de la celda 1 en el primer cuadrante

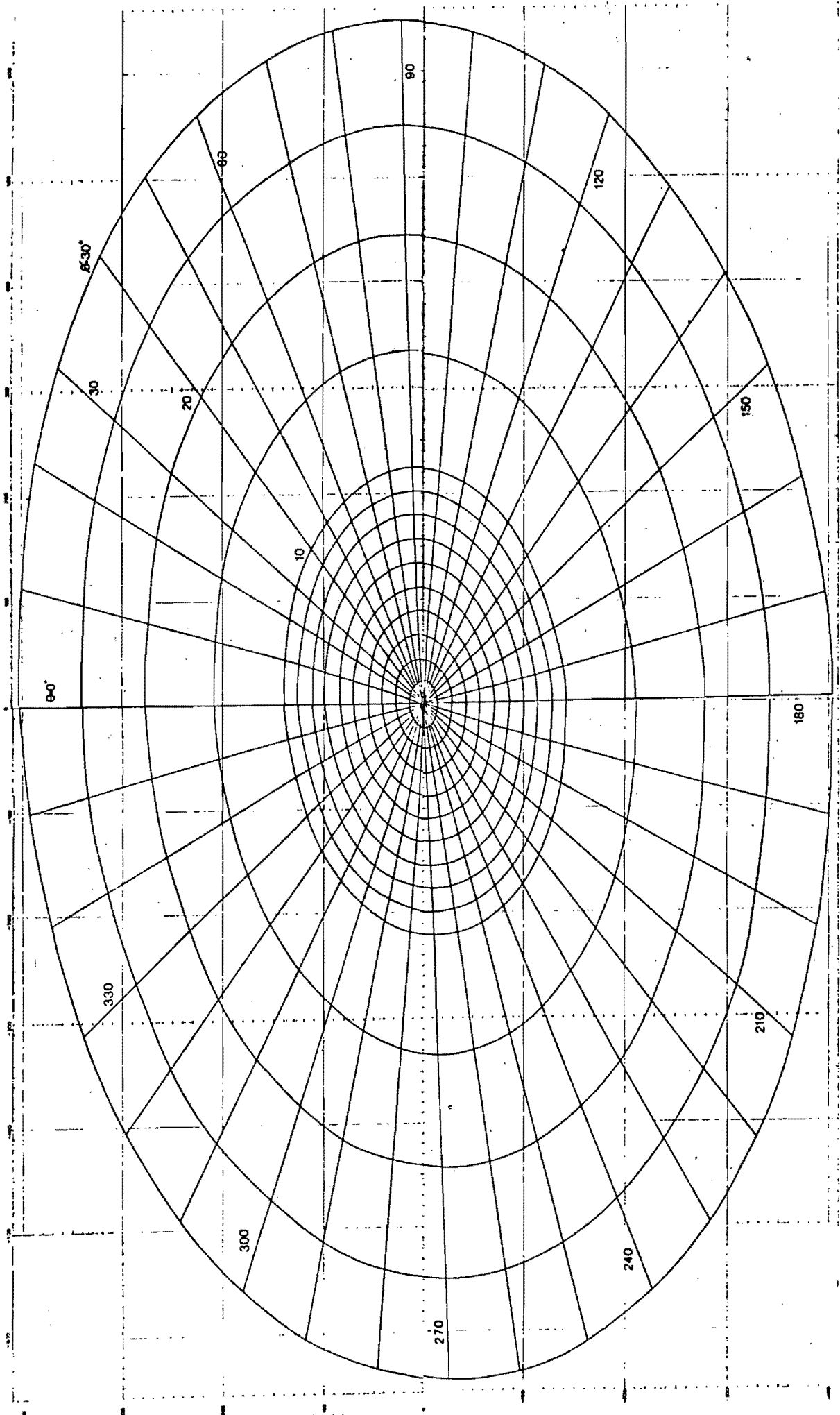
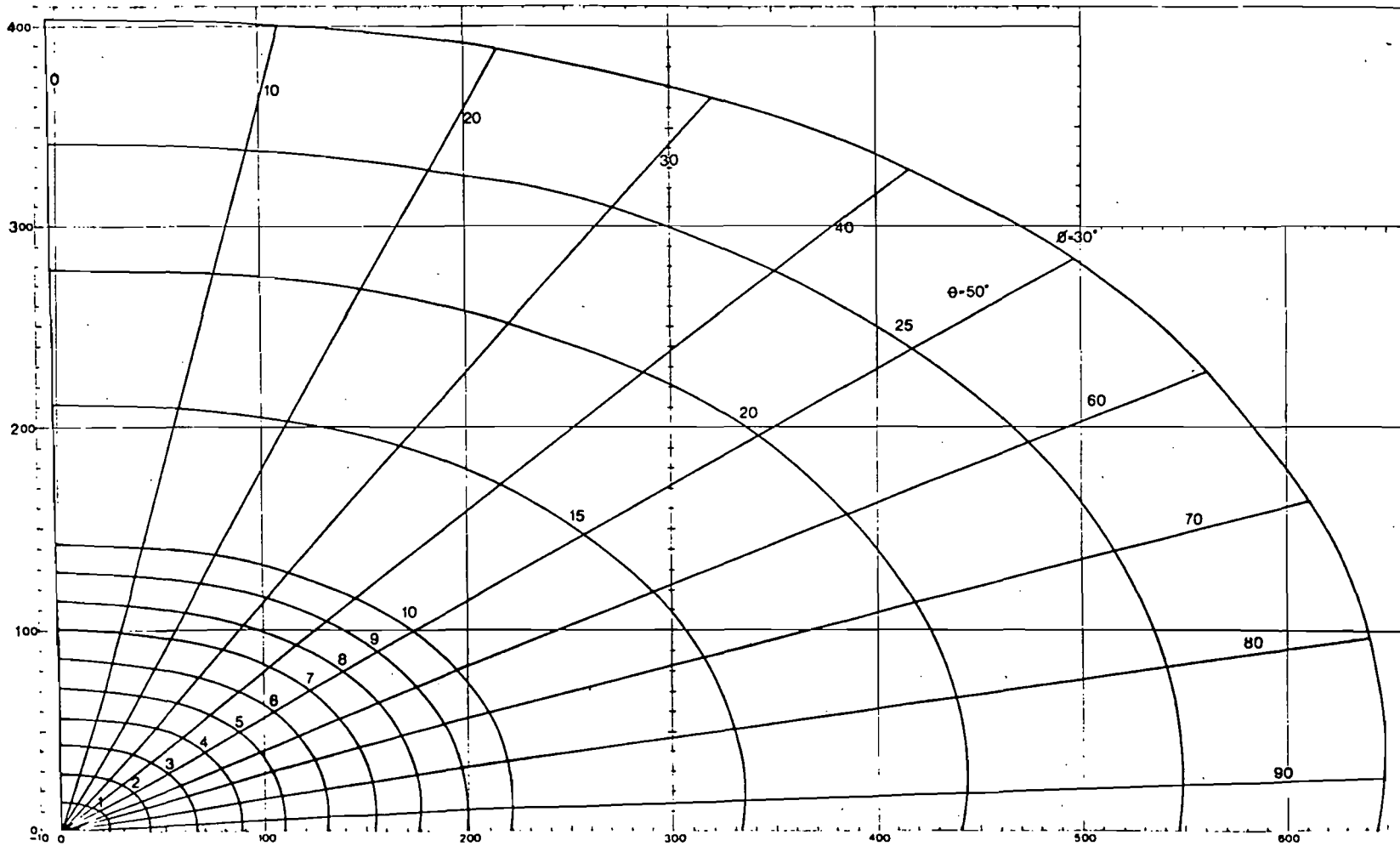


FIG 12.a Gráficas de calibración de la sonda

Celda 1  
( $\mu\text{V}/\text{V}$ )



Celda 2  
( $\mu\text{V}/\text{V}$ )

FIG 12.b Gráfica de calibración de la sonda ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ )

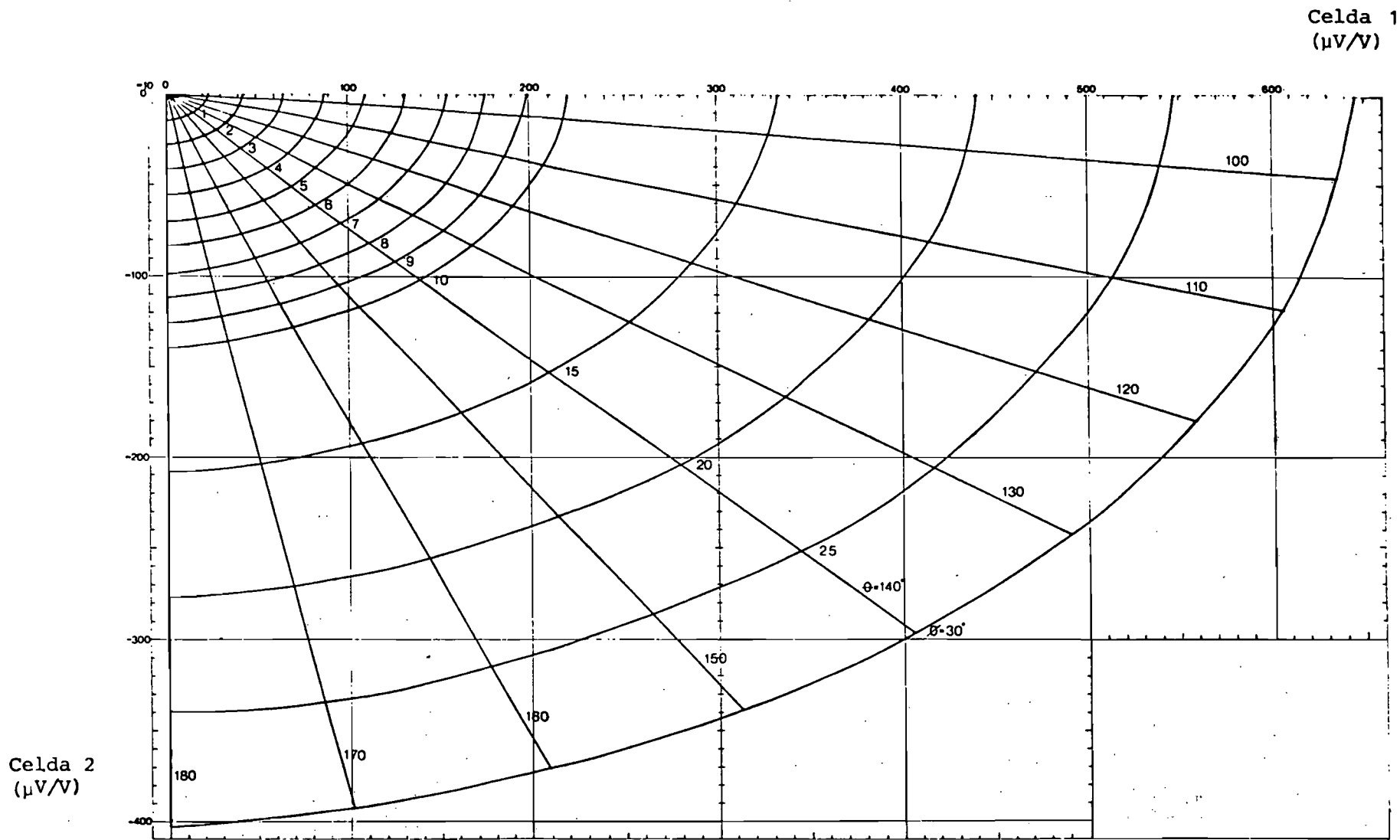
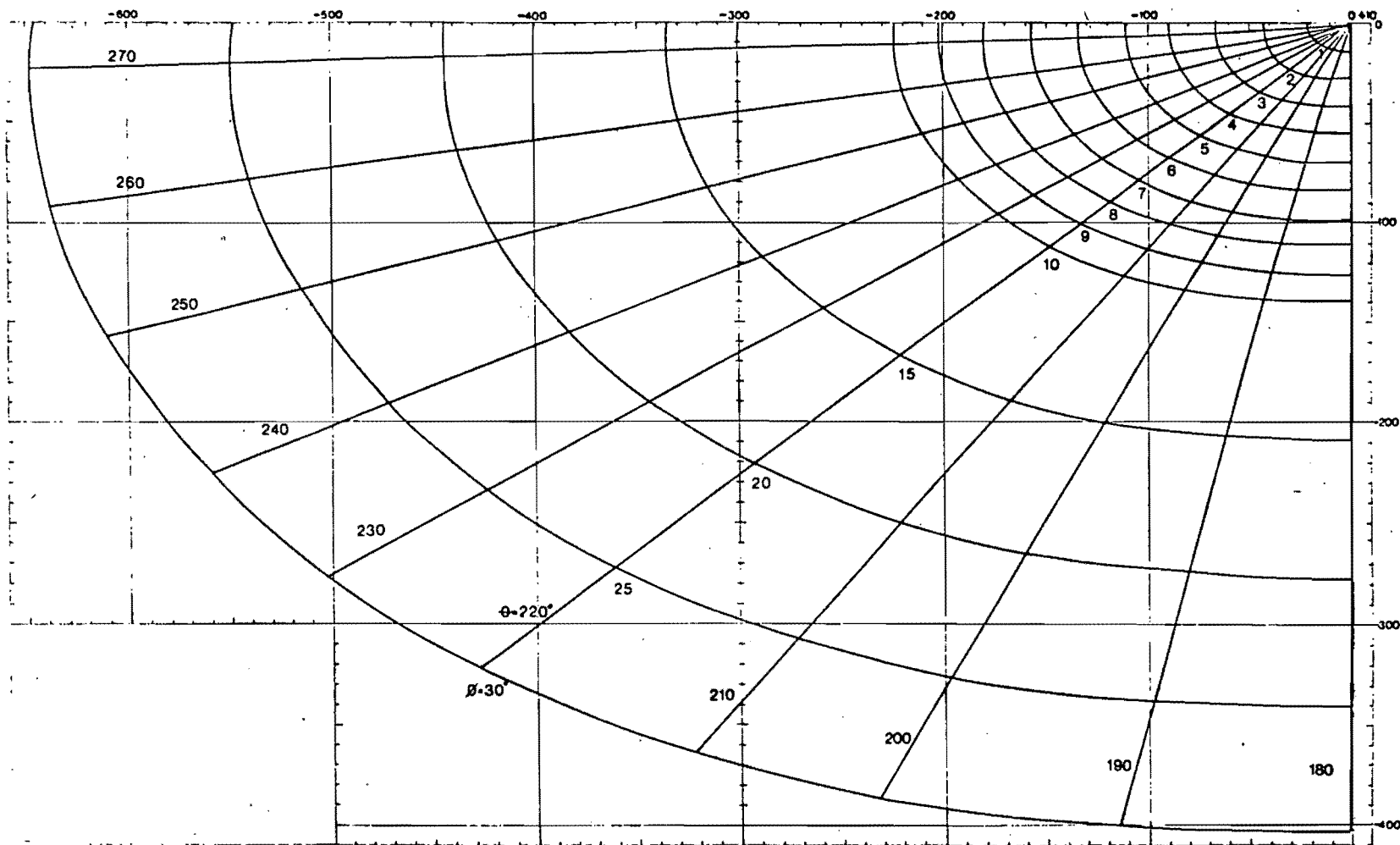


FIG 12.c Gráfica de calibración de la sonda ( $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ )

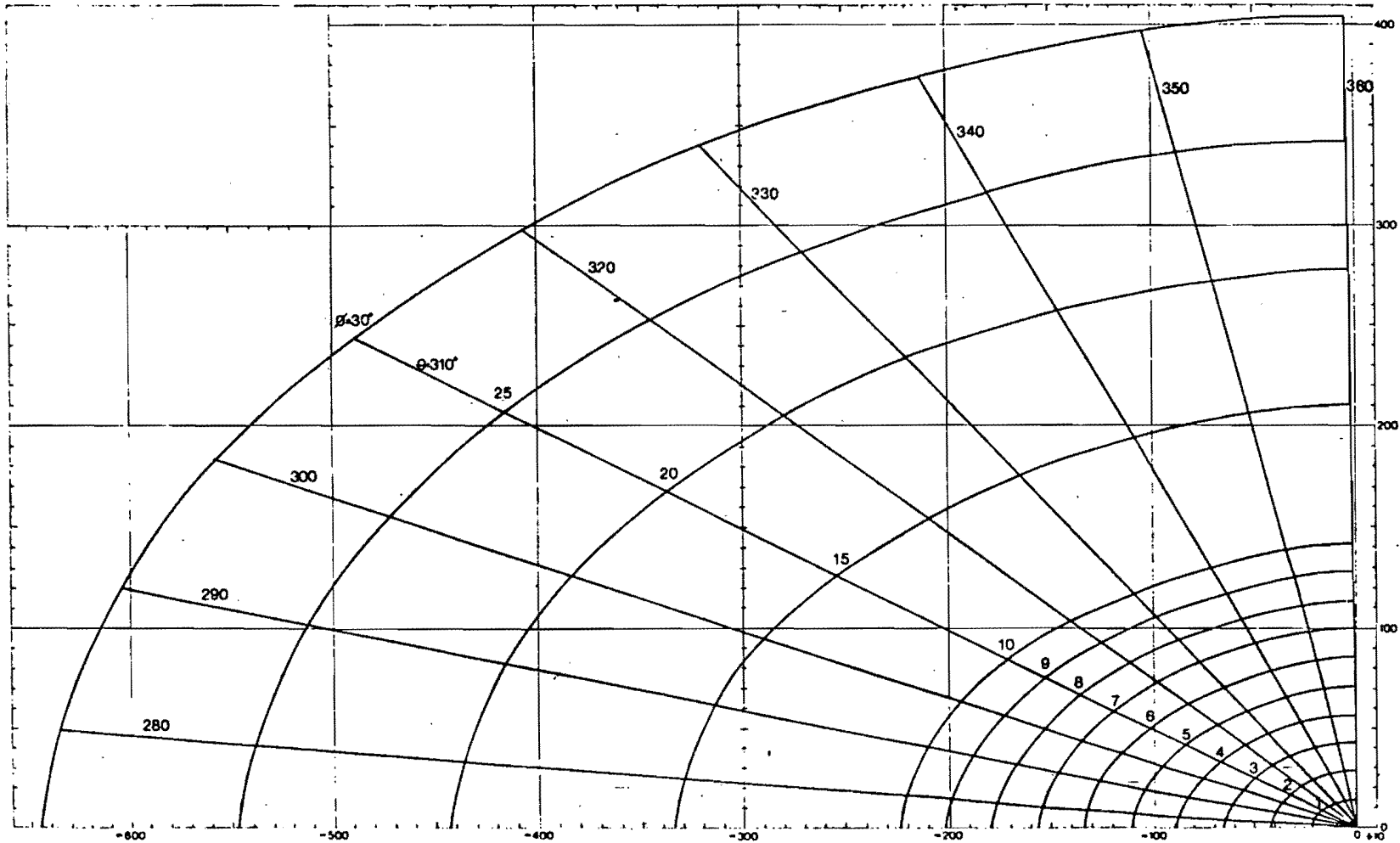
Celda 2  
( $\mu\text{V}/\text{V}$ )



Celda 1  
( $\mu\text{V}/\text{V}$ )

FIG 12.d Gráfica de calibración de la sonda ( $180^\circ < \theta < 270^\circ$ )





Celda 1  
( $\mu\text{V/V}$ )

Celda 2  
( $\mu\text{V/V}$ )

FIG 12.e Gráfica de calibración de la sonda ( $270^\circ < \theta < 360^\circ$ )

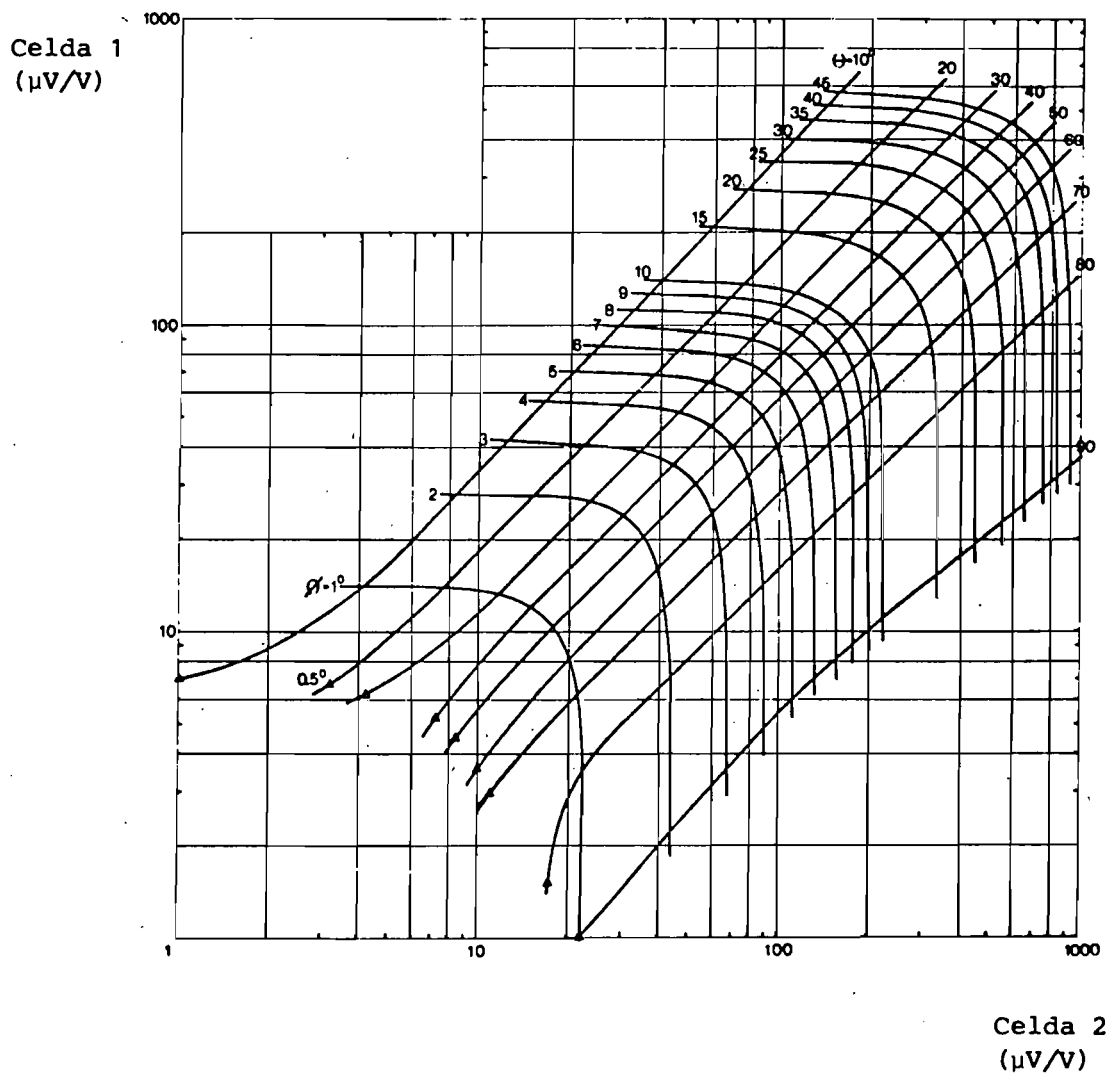


FIG 13. Gráfica de calibración en escala log-log ( $10^\circ < \theta < 90^\circ$ )

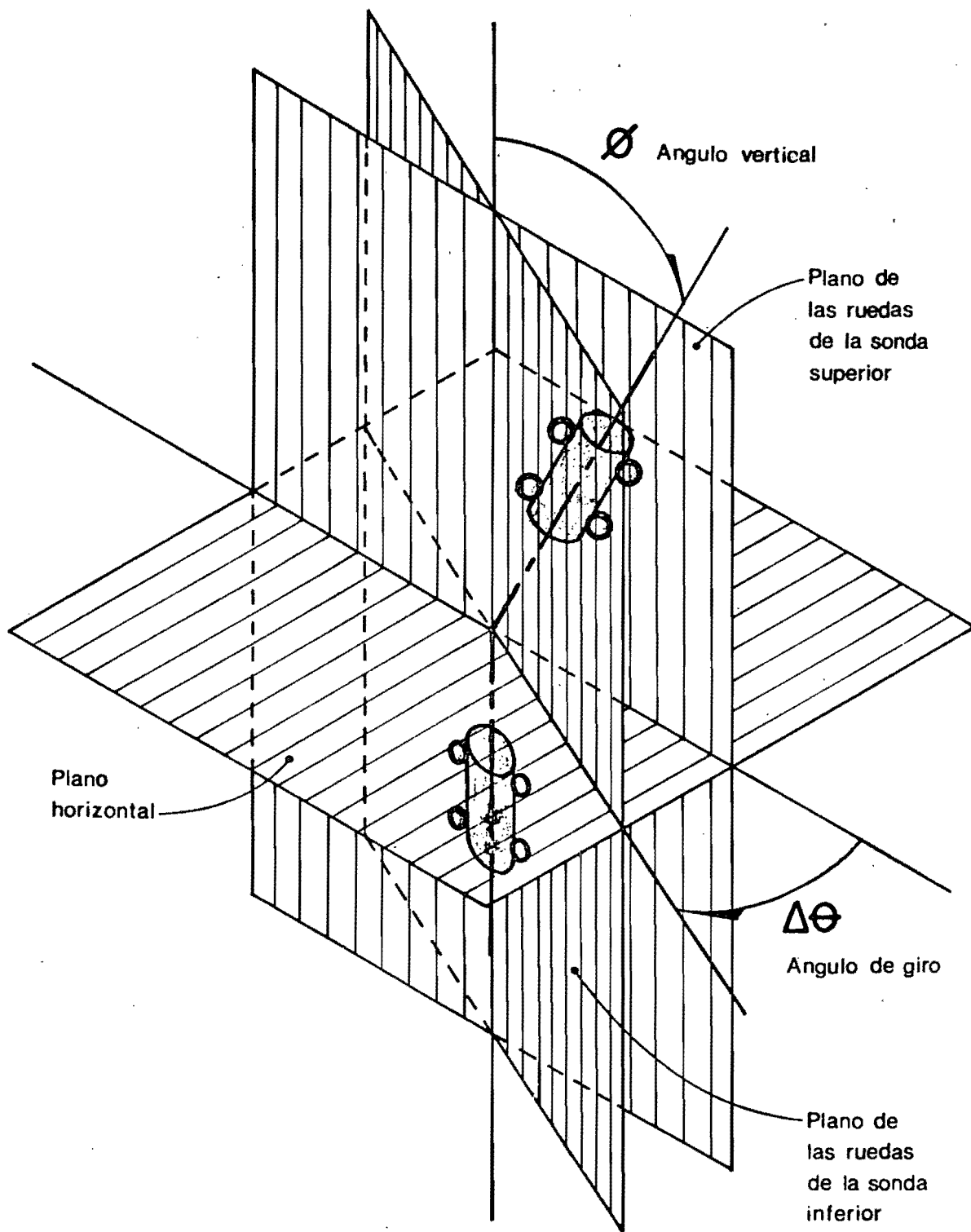


FIG 14. Magnitudes angulares necesarias para calibrar el torpedo de torsiones

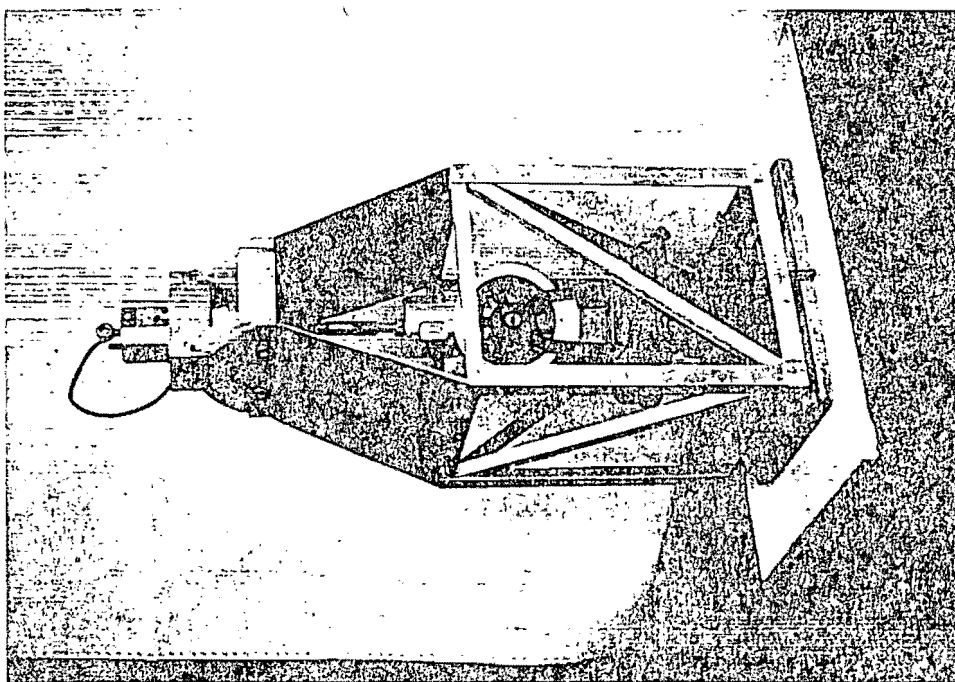
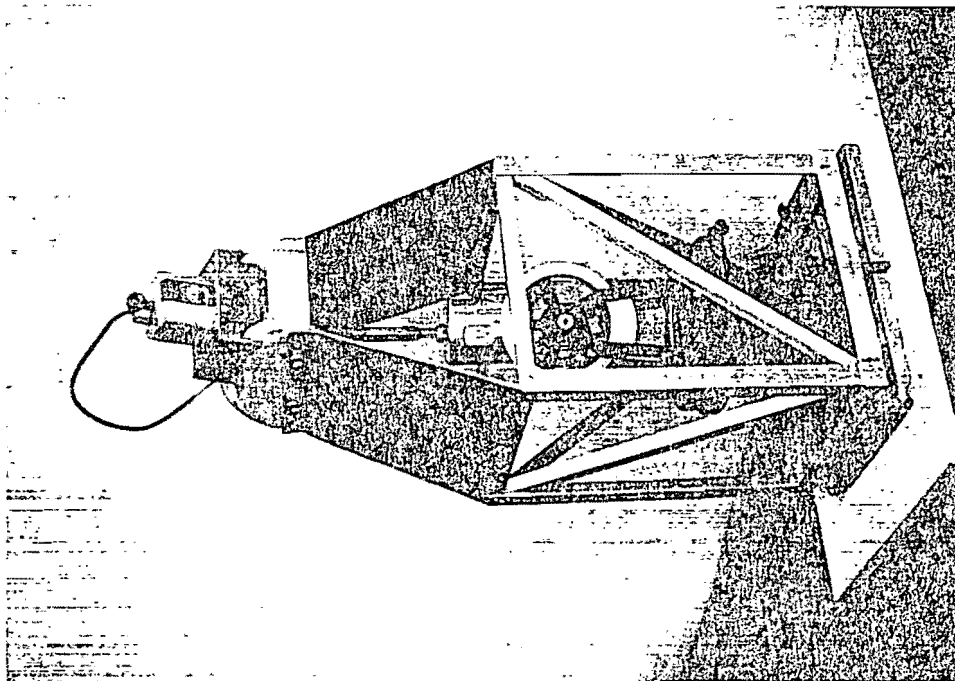


FIG 15 Calibrador del torpedo de giros

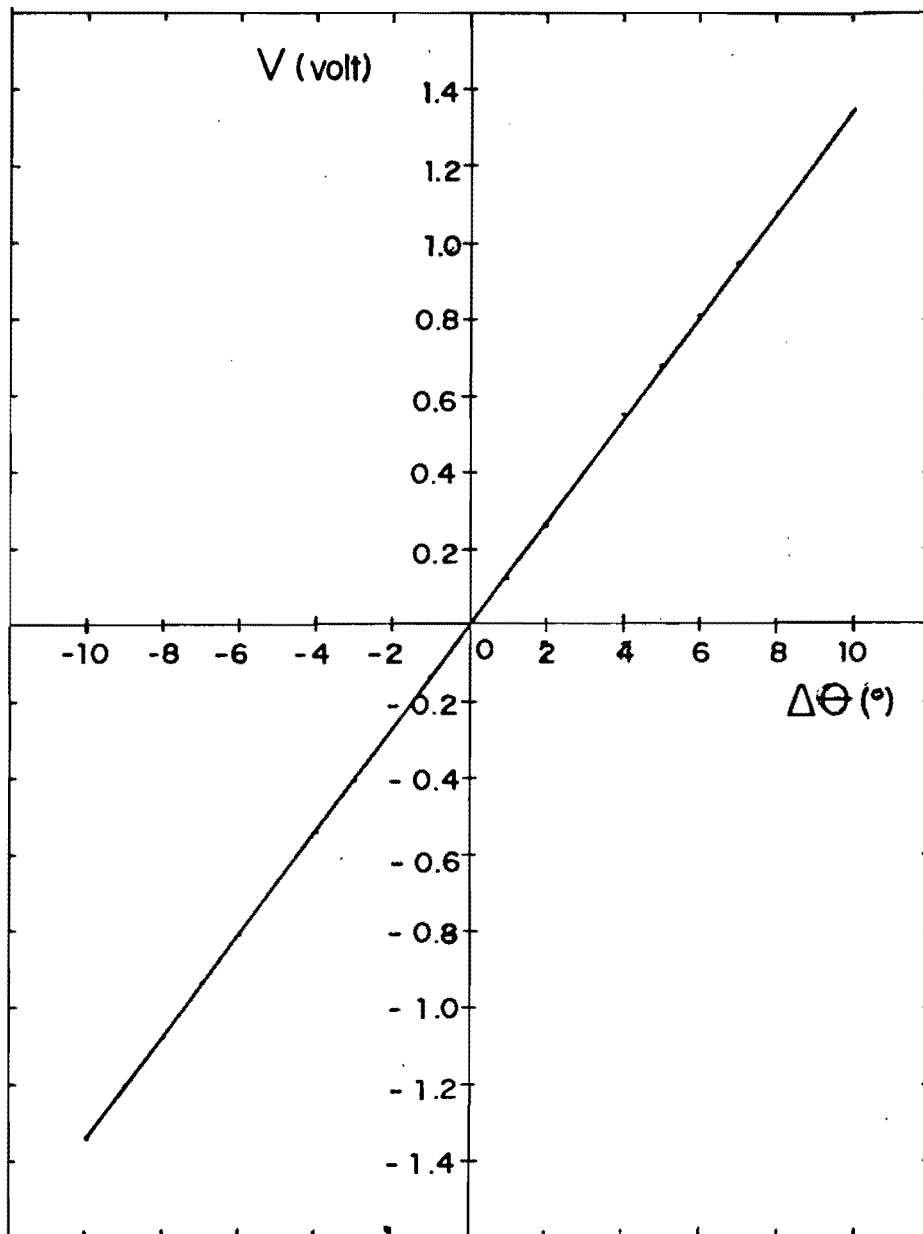


FIG 16. Calibración del torpedo para medir giros horizontales

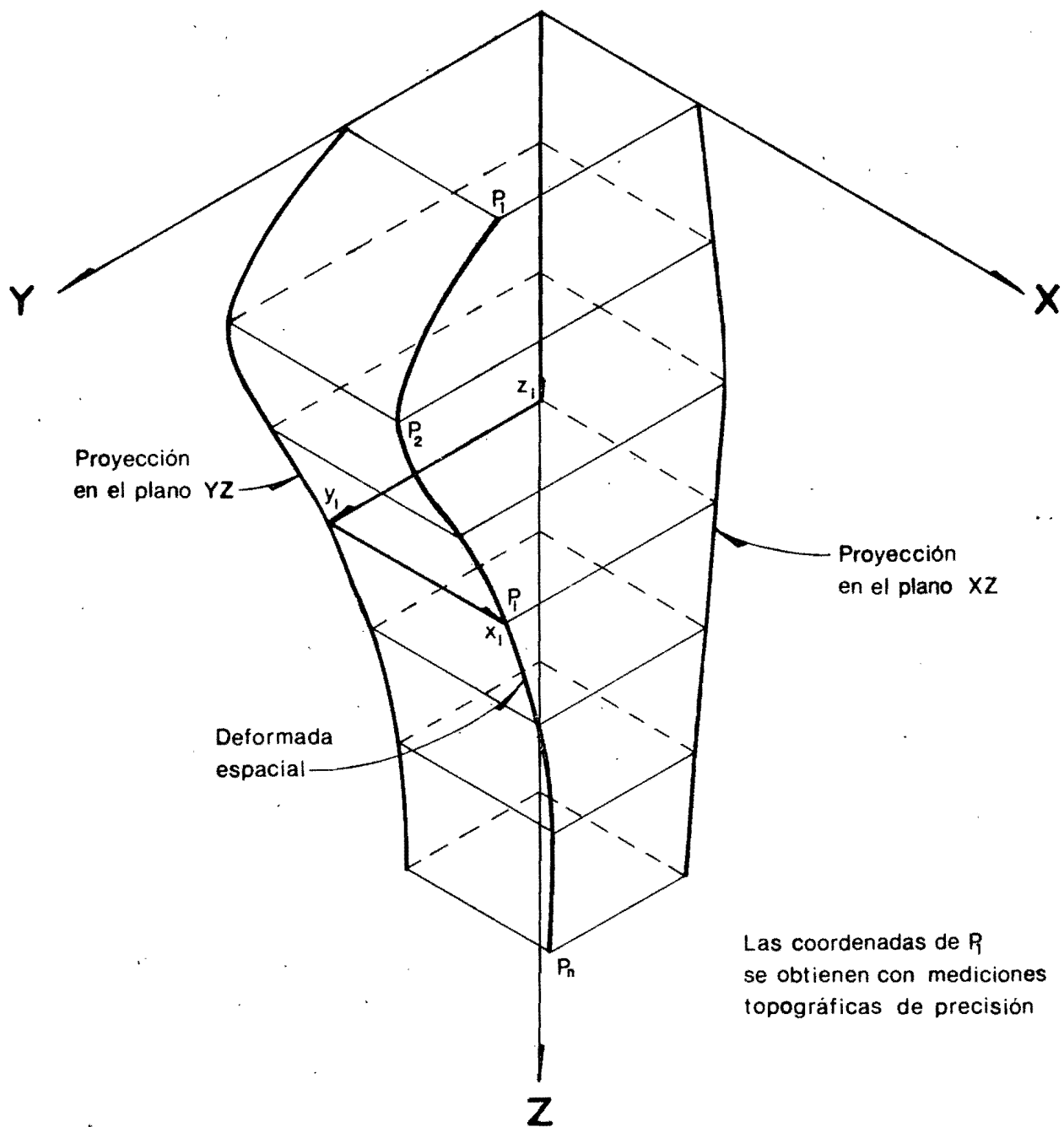


FIG 17. Deformada espacial y sus proyecciones en planos ortogonales

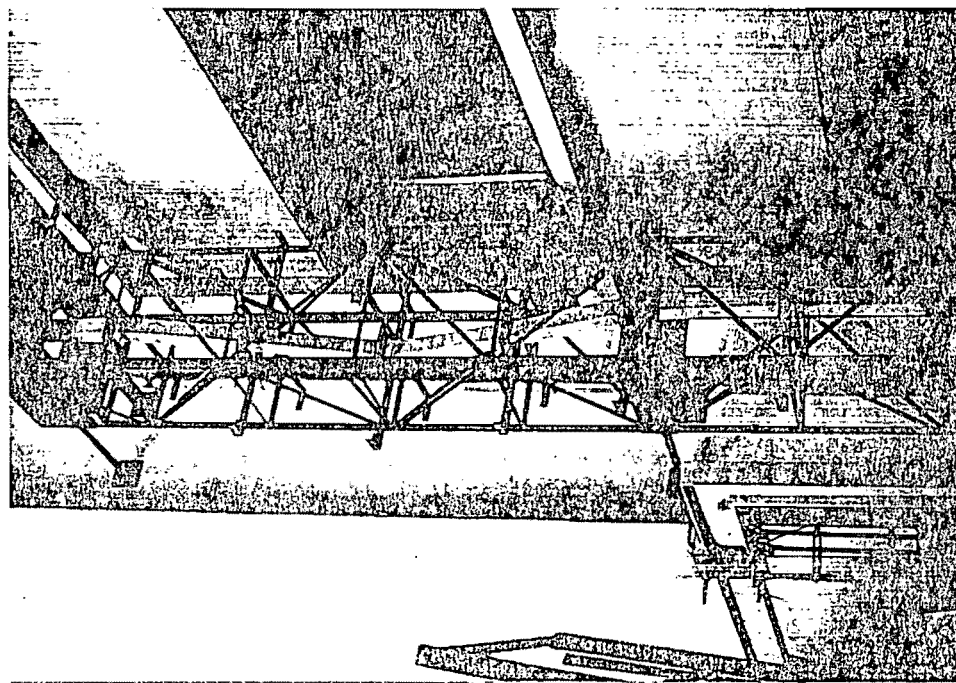
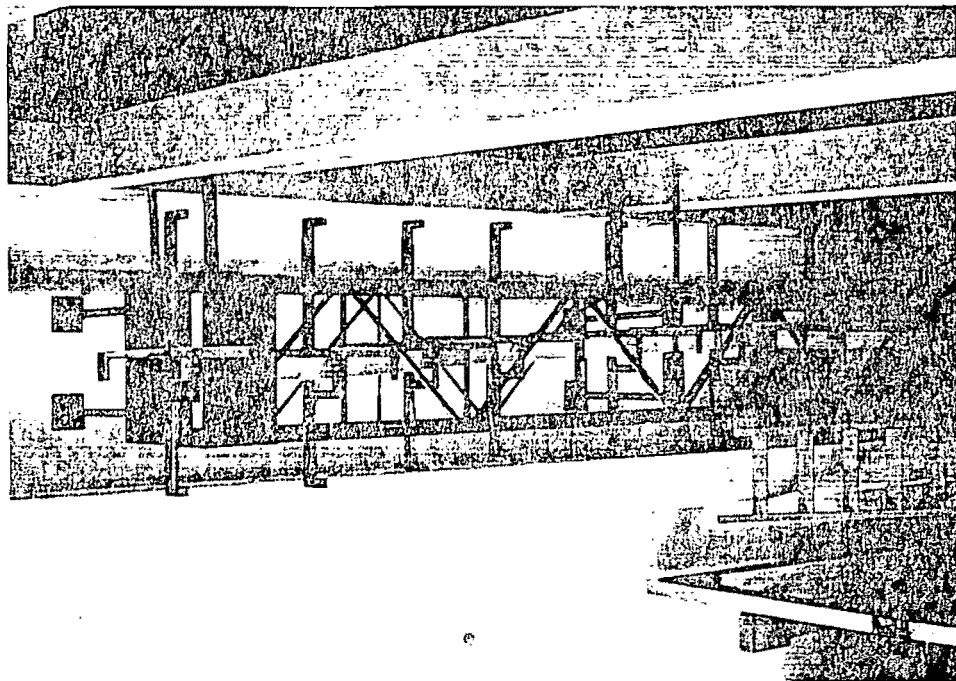


FIG 18 Estructura de soporte y marco de referencia

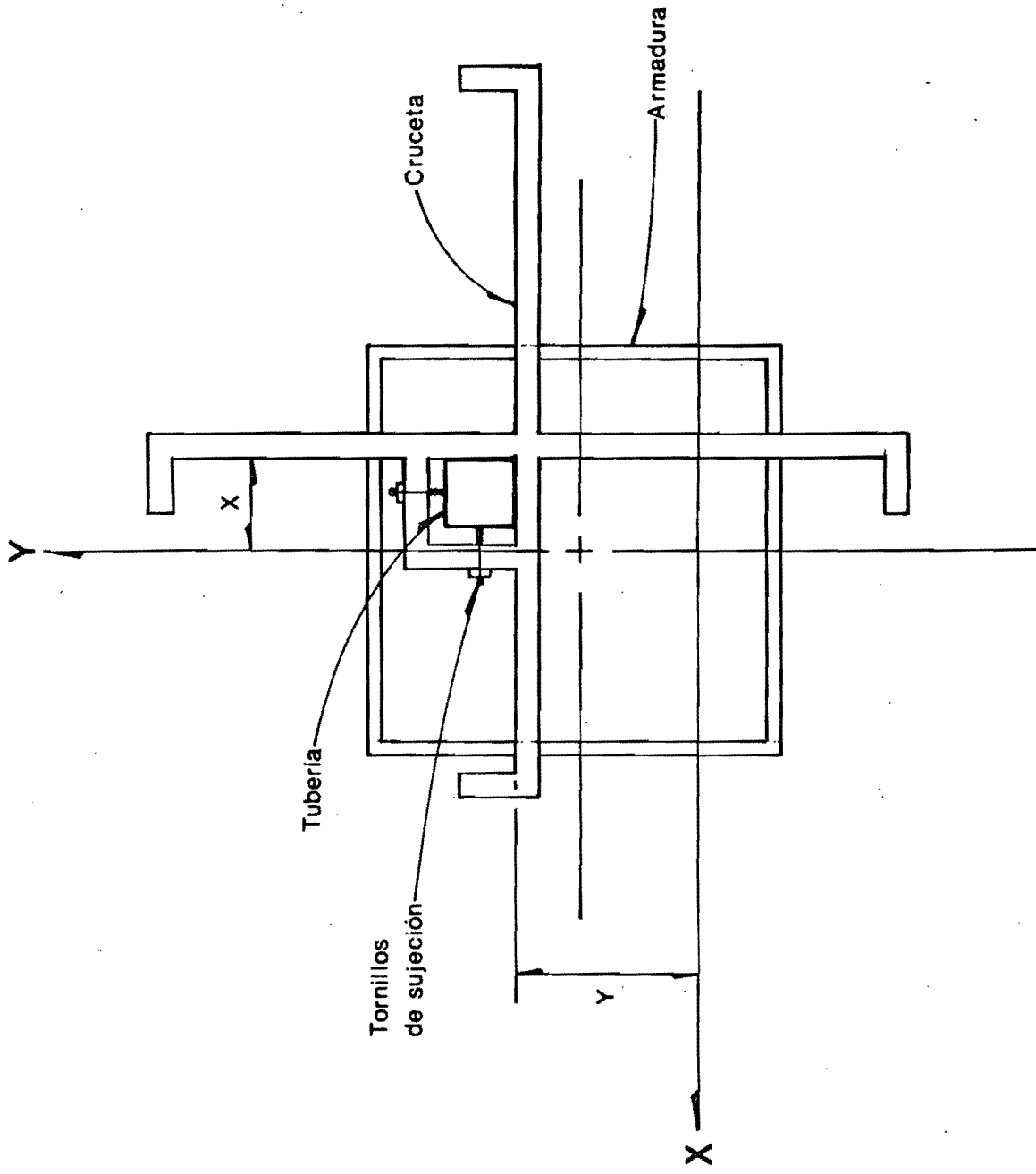


FIG 19. Soportes de la tubería



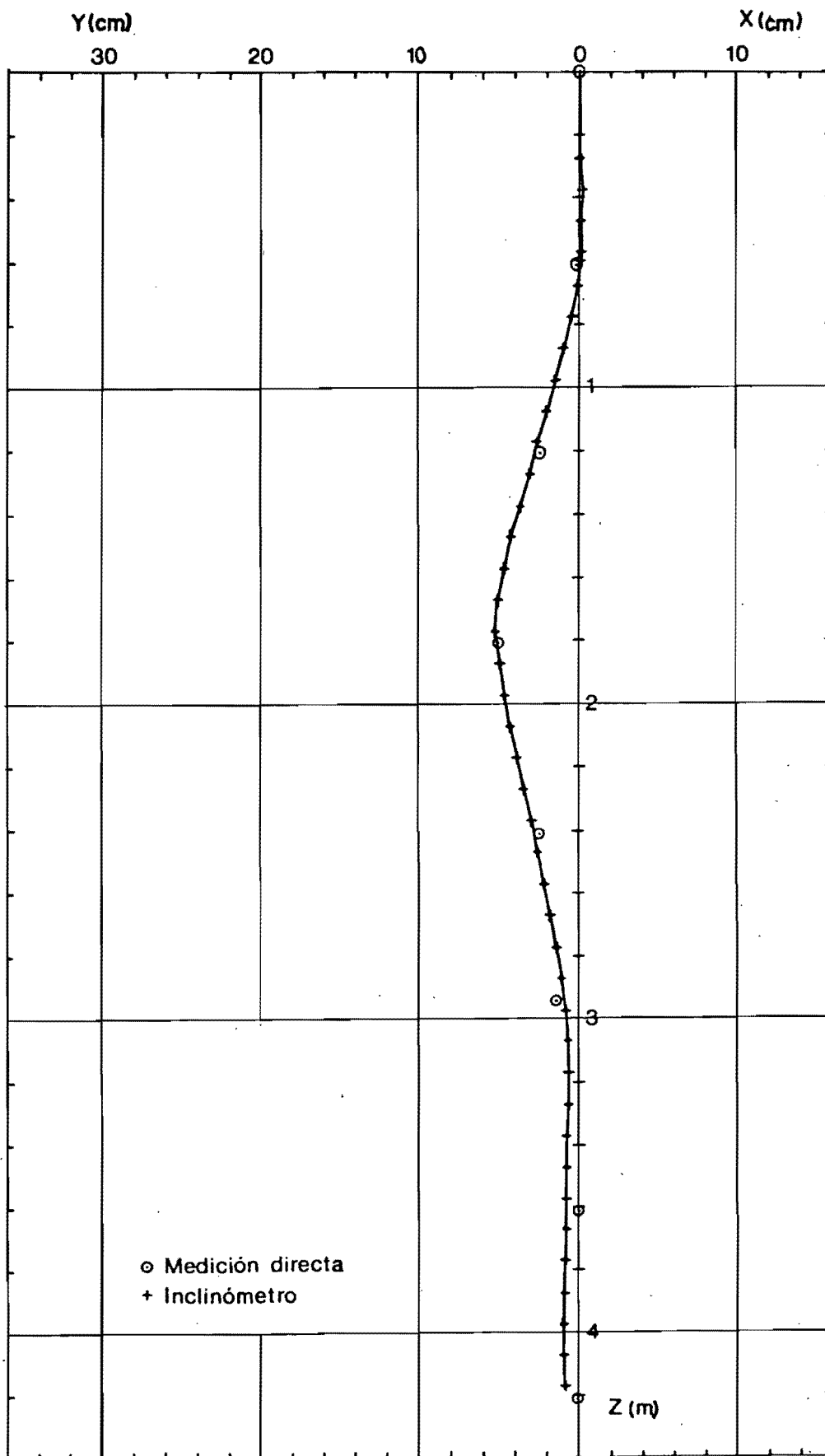


FIG 20. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 1 - Prueba 1

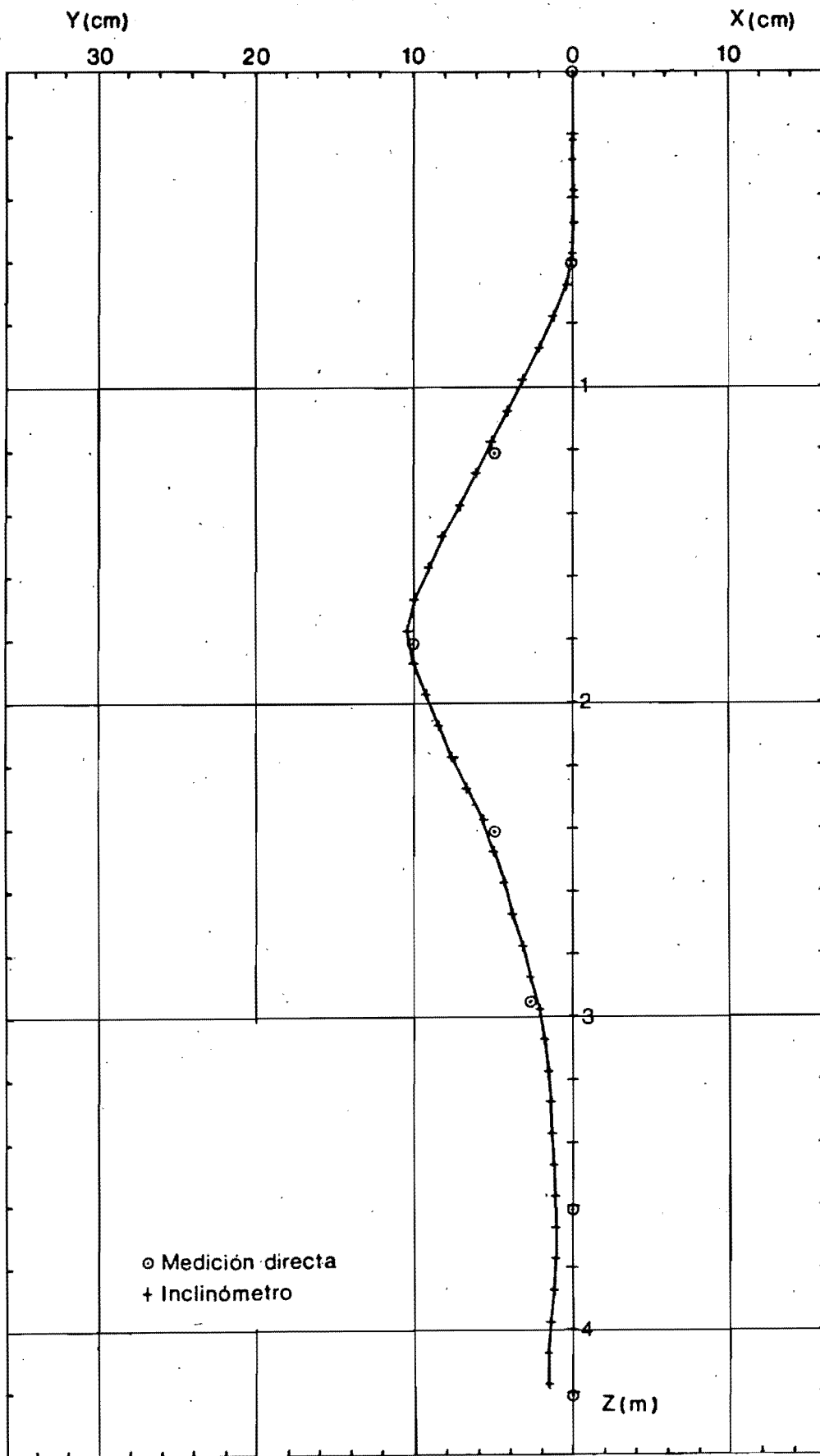


FIG 21. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 1 - Prueba 2

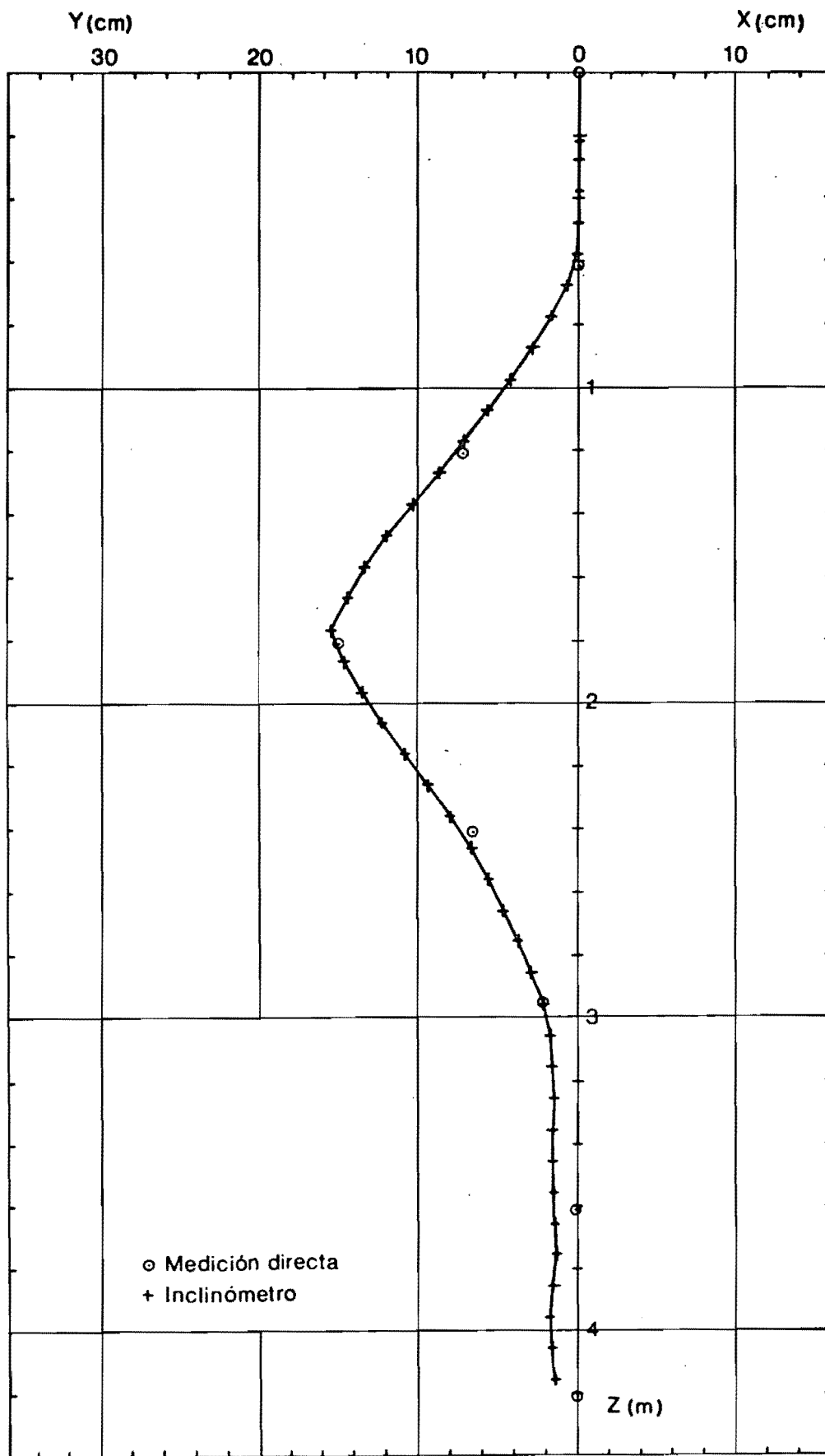


FIG 22. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 1 - Prueba 3

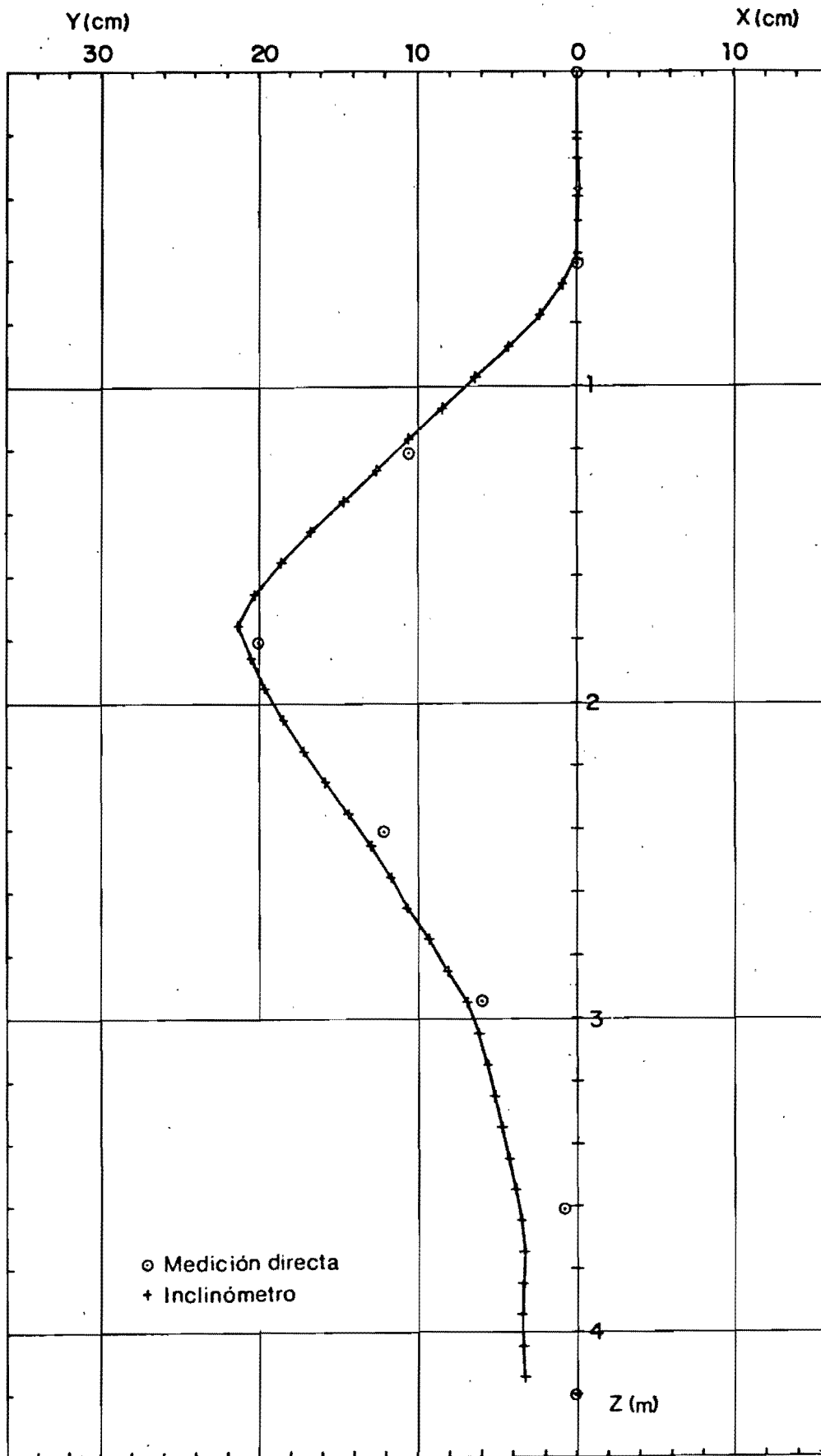


FIG 23. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 1 - Prueba 4

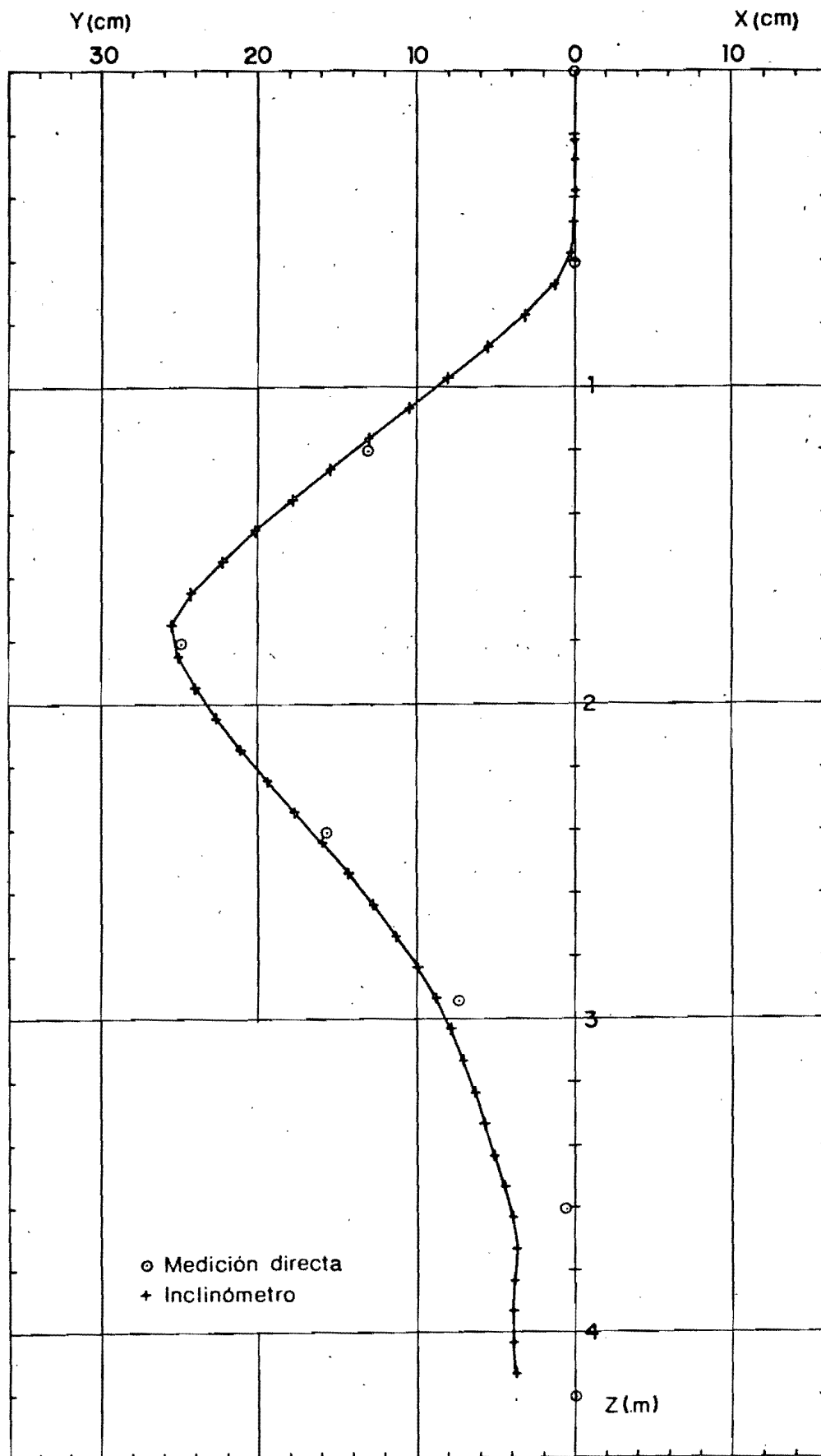


FIG 24. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 1 - Prueba 5

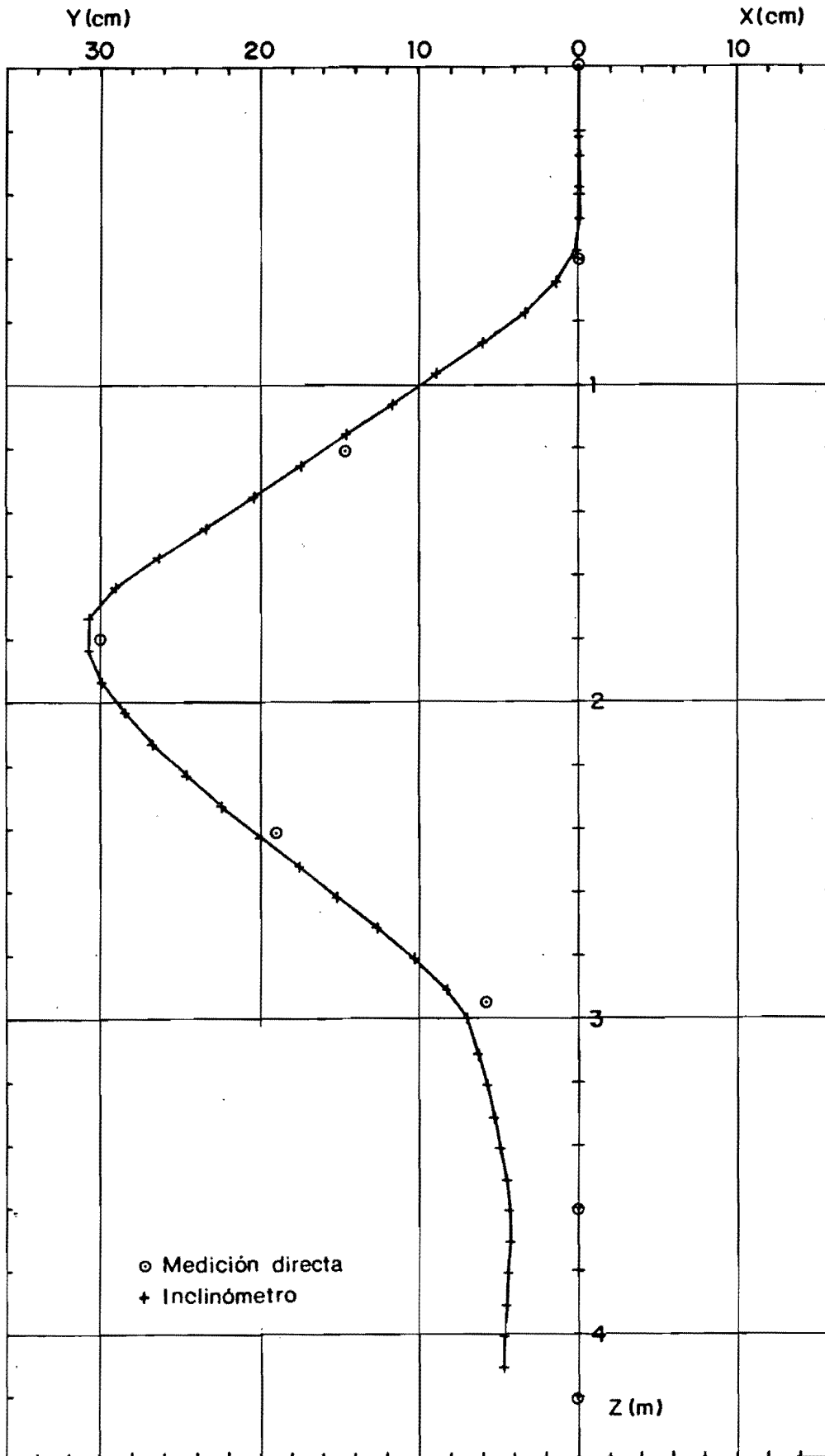


FIG 25. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 1 - Prueba 6

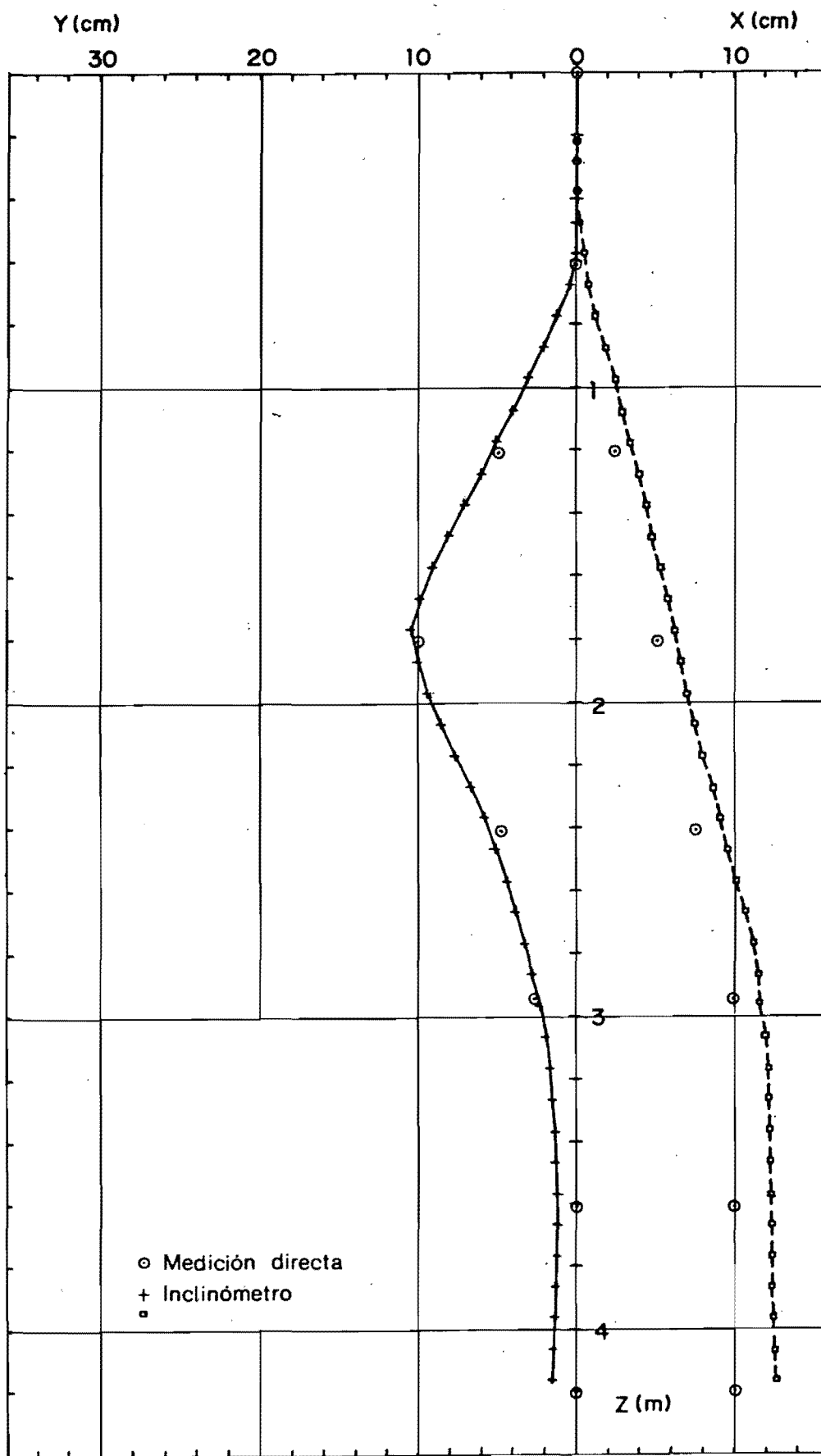


FIG 26. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 2 - Prueba 1

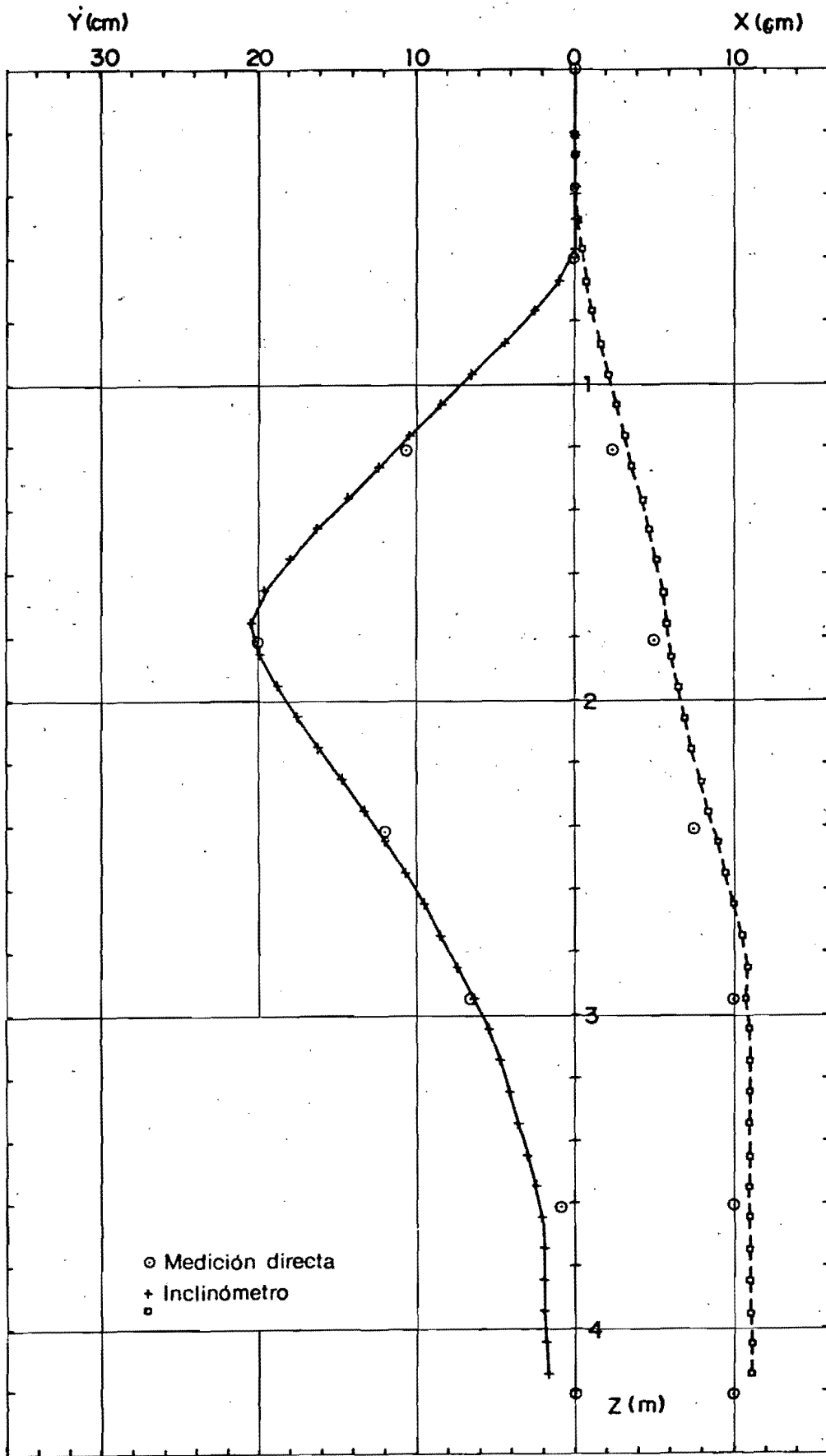


FIG 27. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 2 - Prueba 2



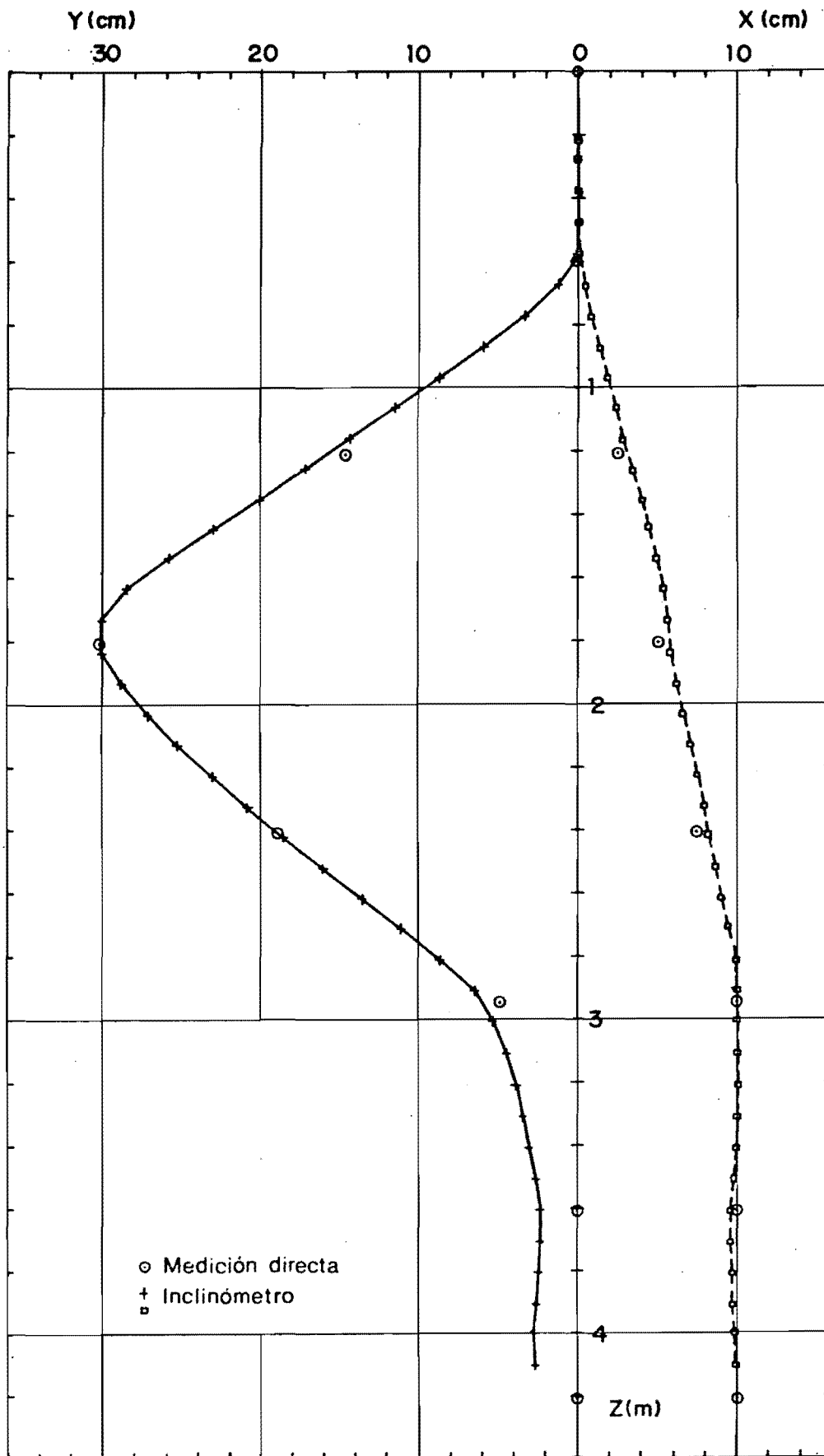


FIG 28. Resultados de la simulación de laboratorio  
Serie 2 - Prueba 3

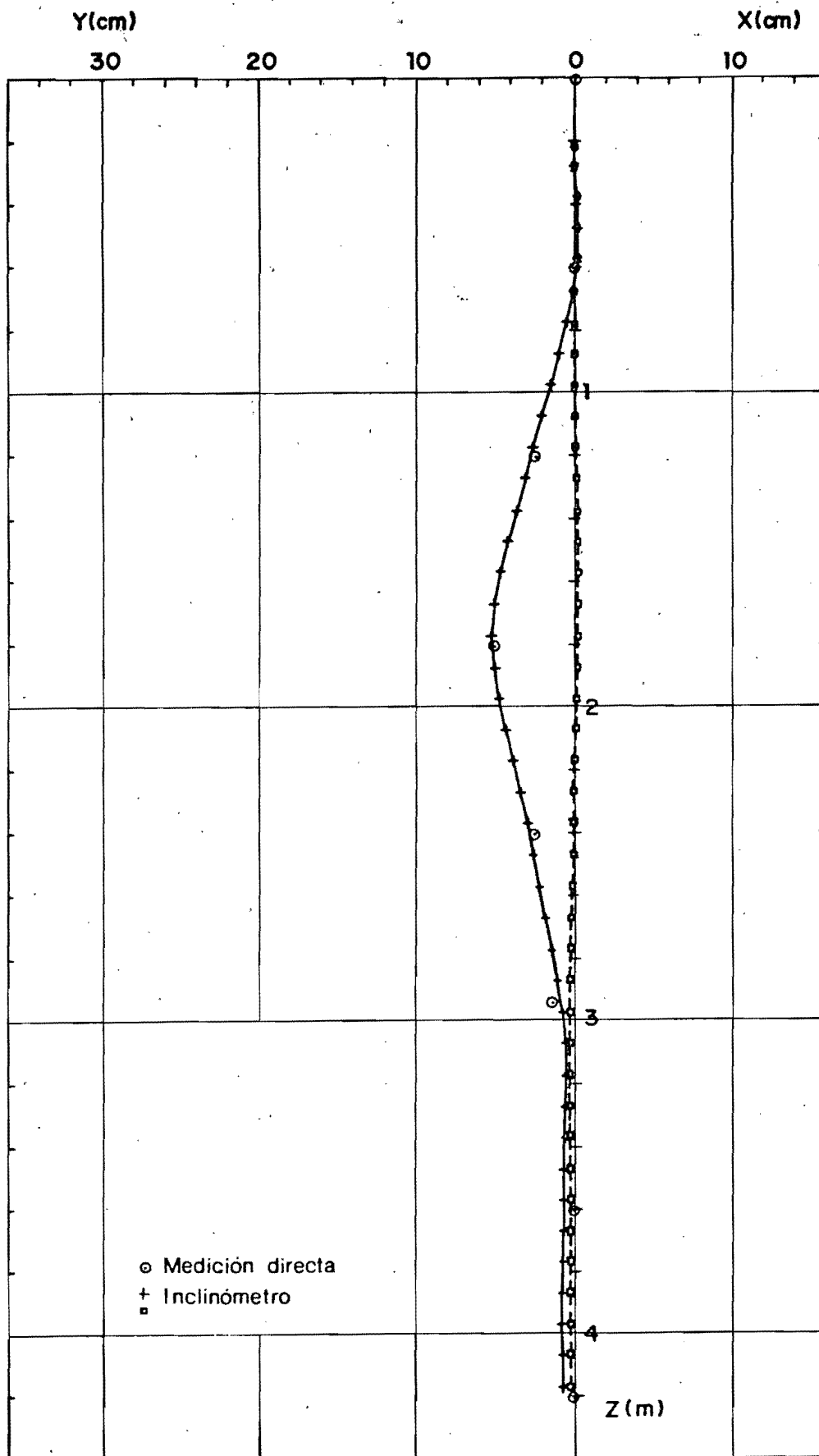


FIG 29. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 3 - Prueba 1

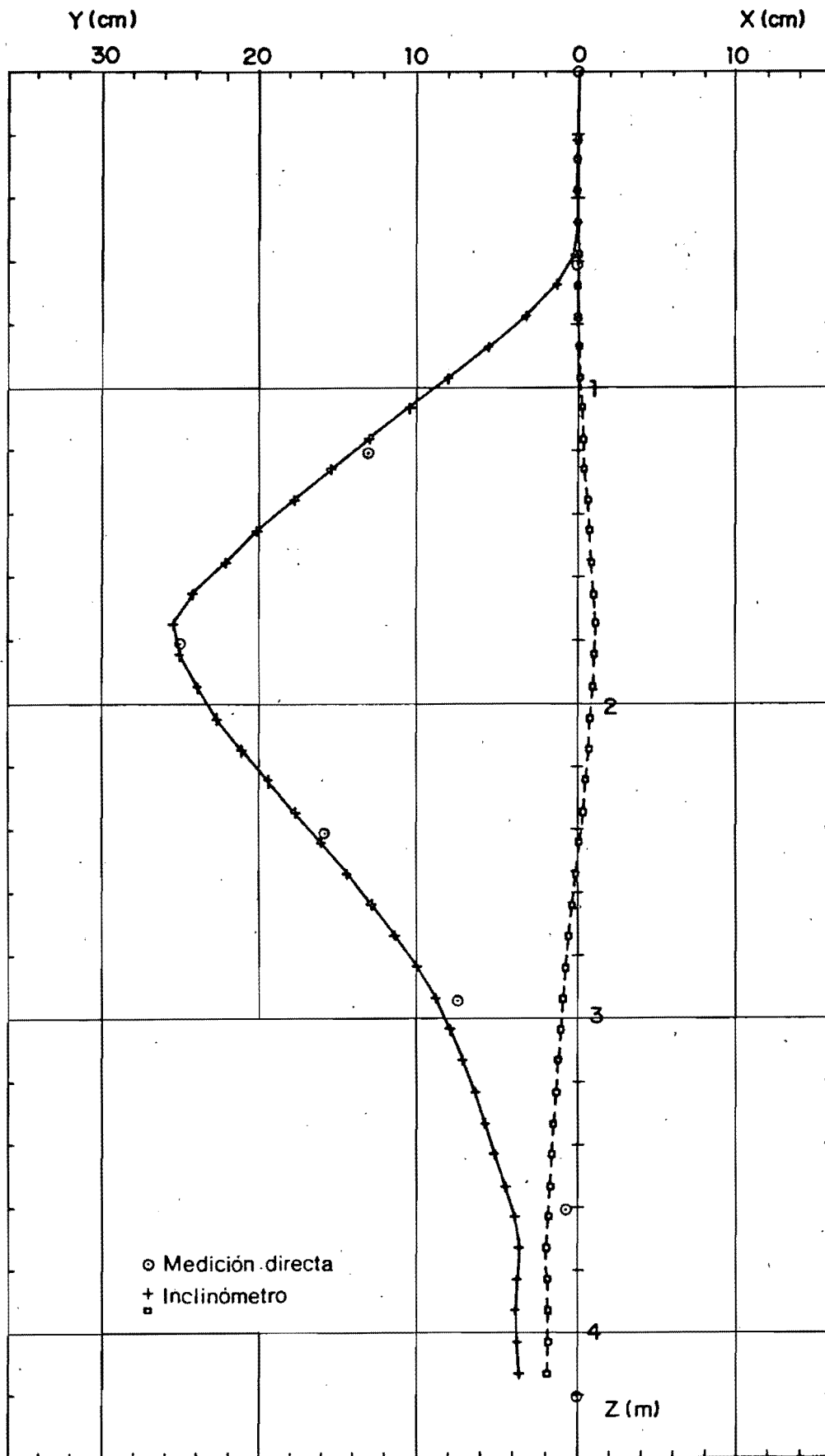
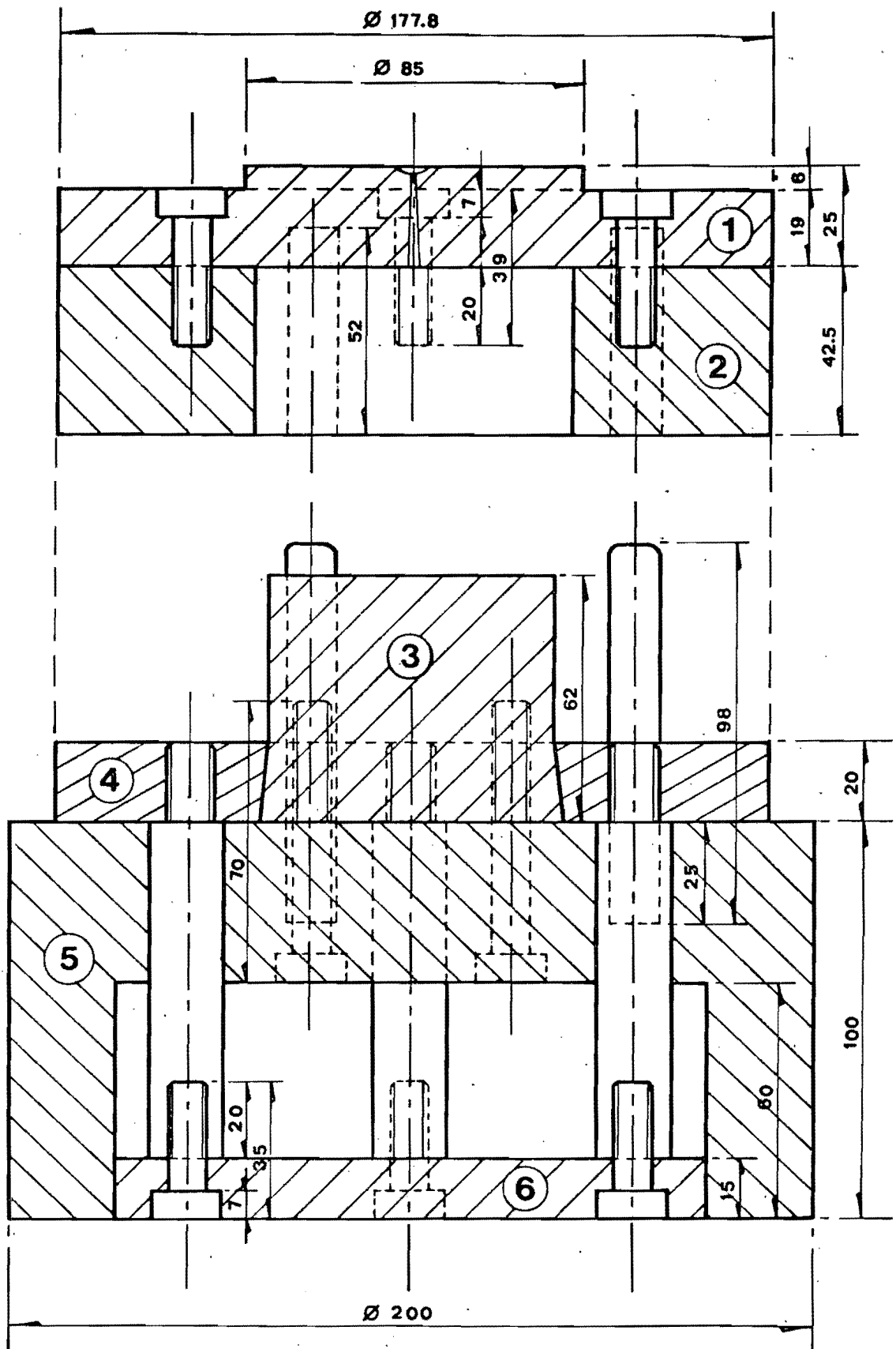


FIG 30. Resultados de la simulación de laboratorio Serie 3 - Prueba 2

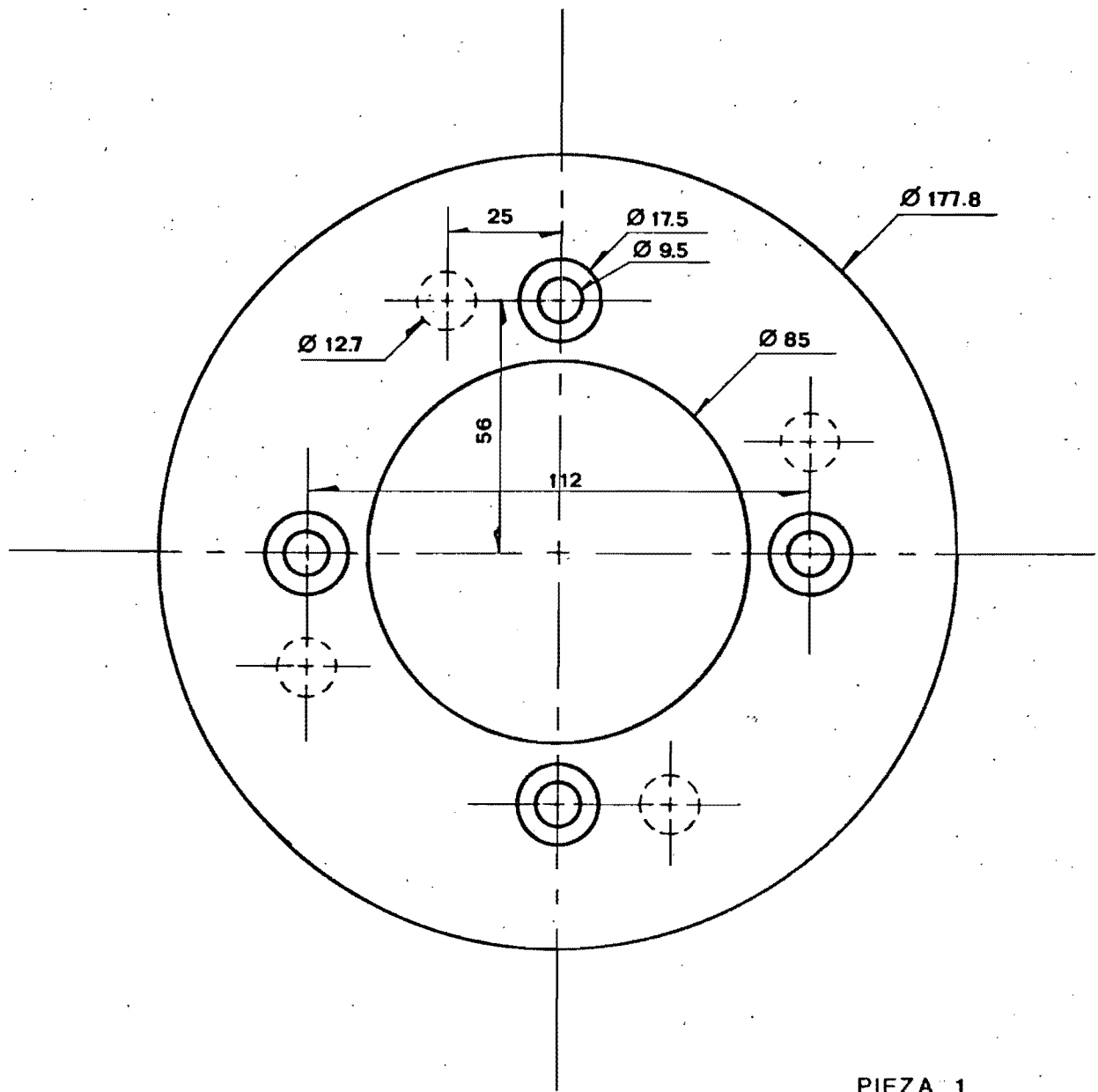
ANEXO Matriz de extrusión de los elementos de la tubería



VISTA DE CONJUNTO

ESC. 1:2

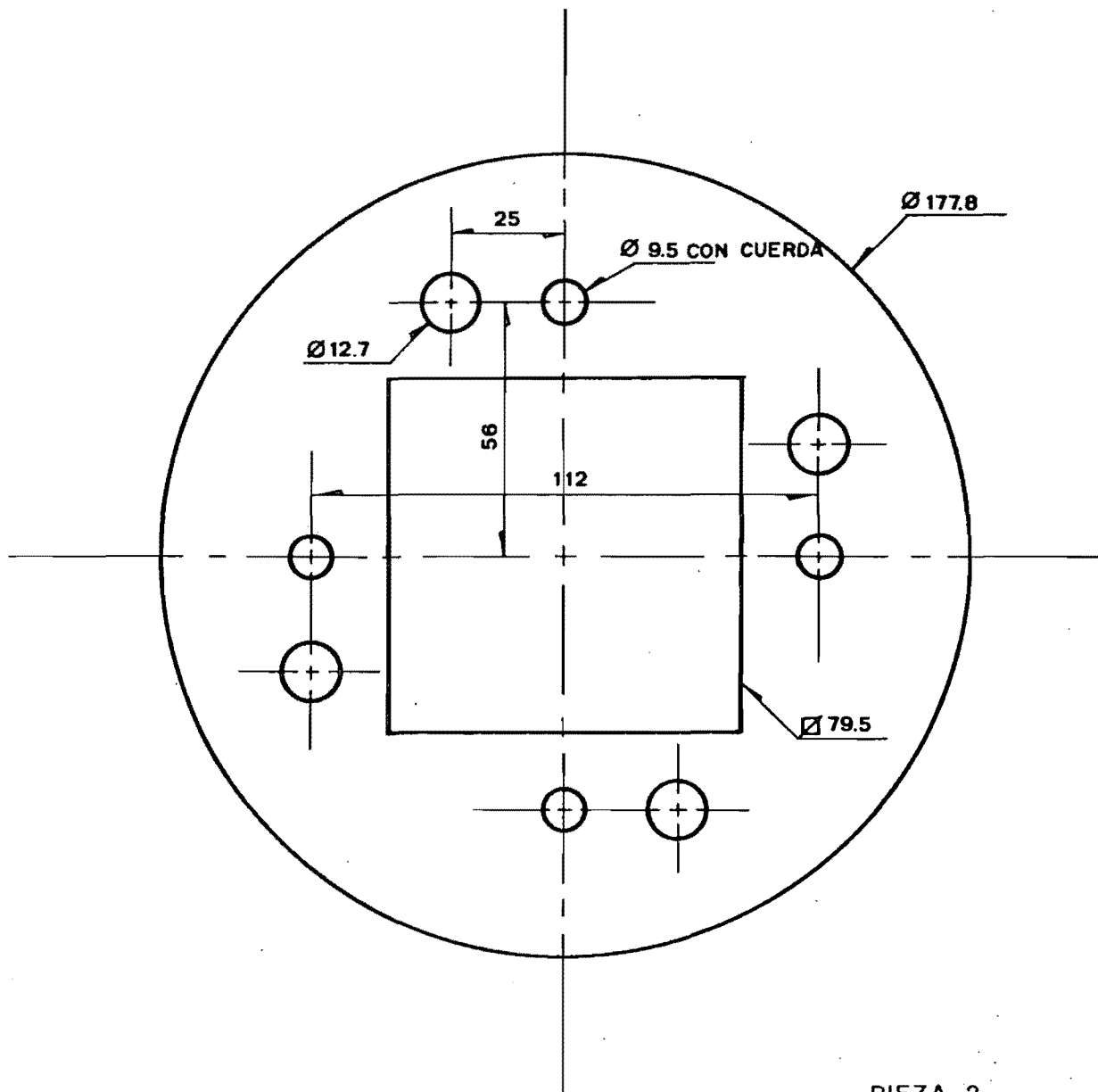
ACOT. mm



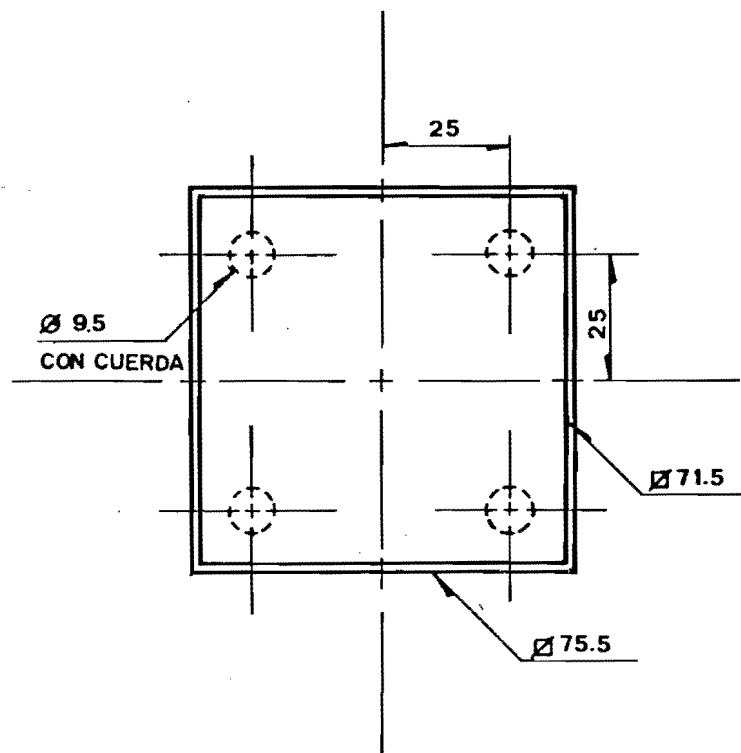
PIEZA 1

ESC. 1:2

ACOT. mm

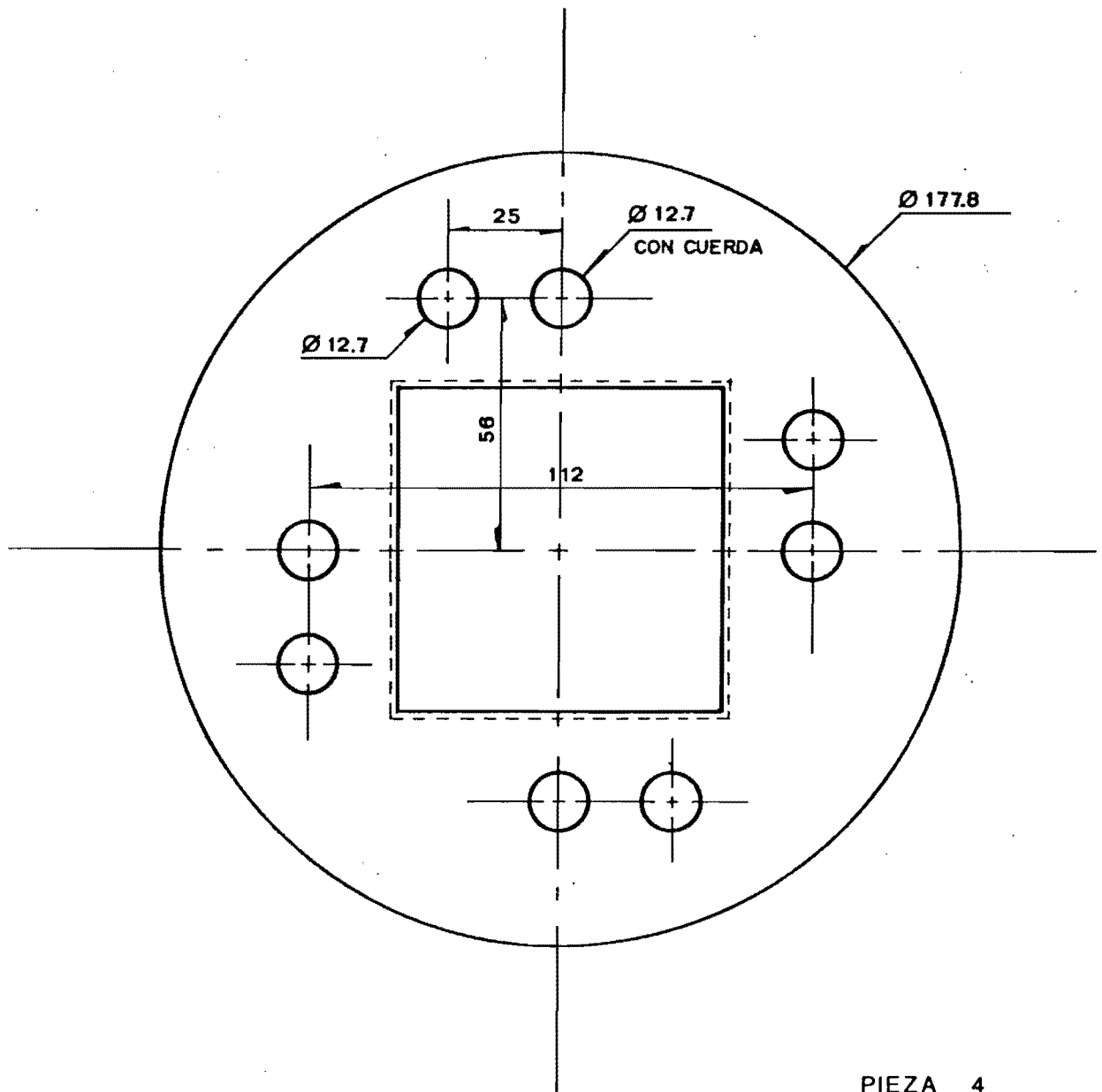


PIEZA 2  
ESC. 1:2  
ACOT. mm

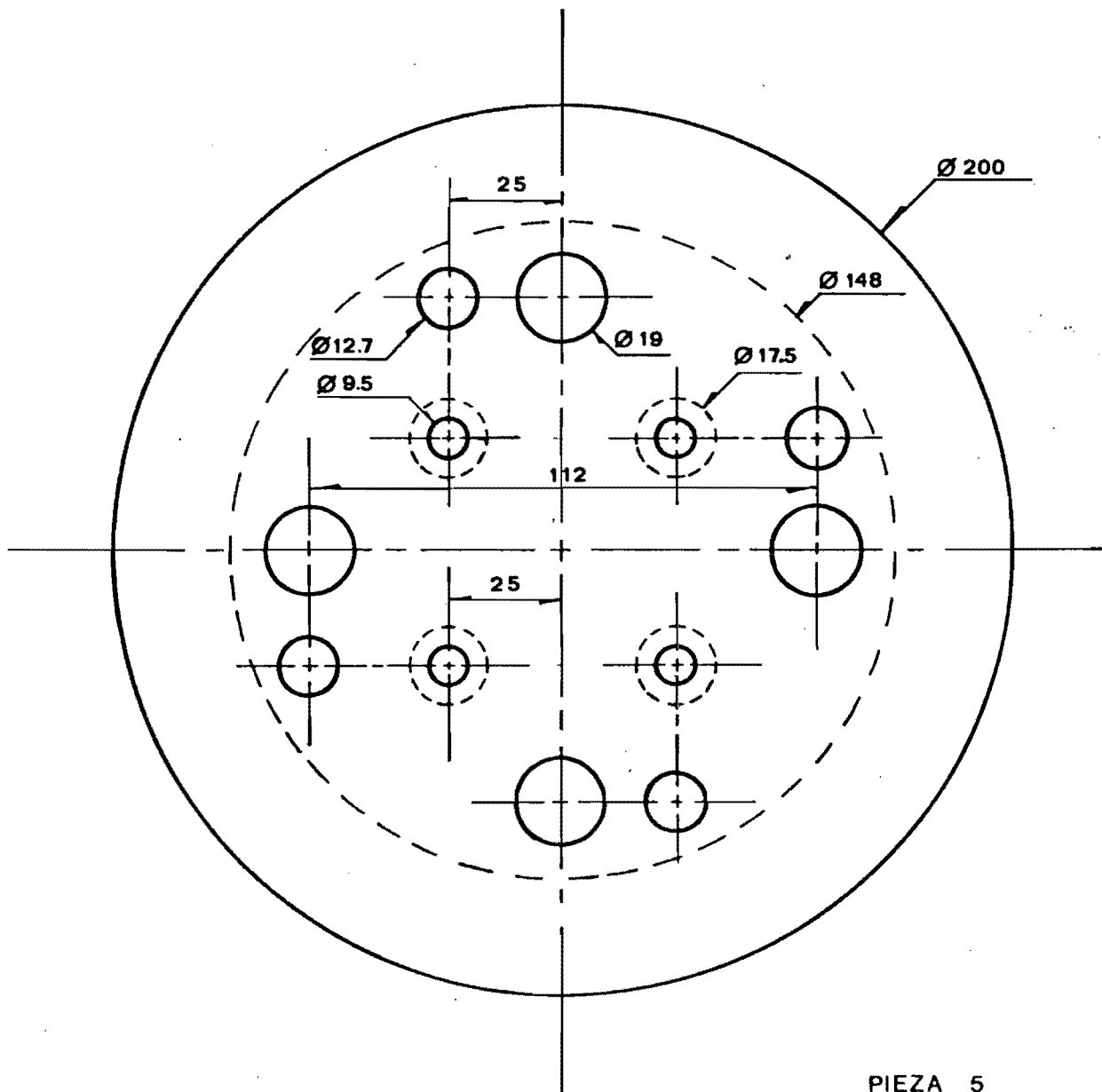


PIEZA 3  
ESC. 1:2  
ACOT. mm

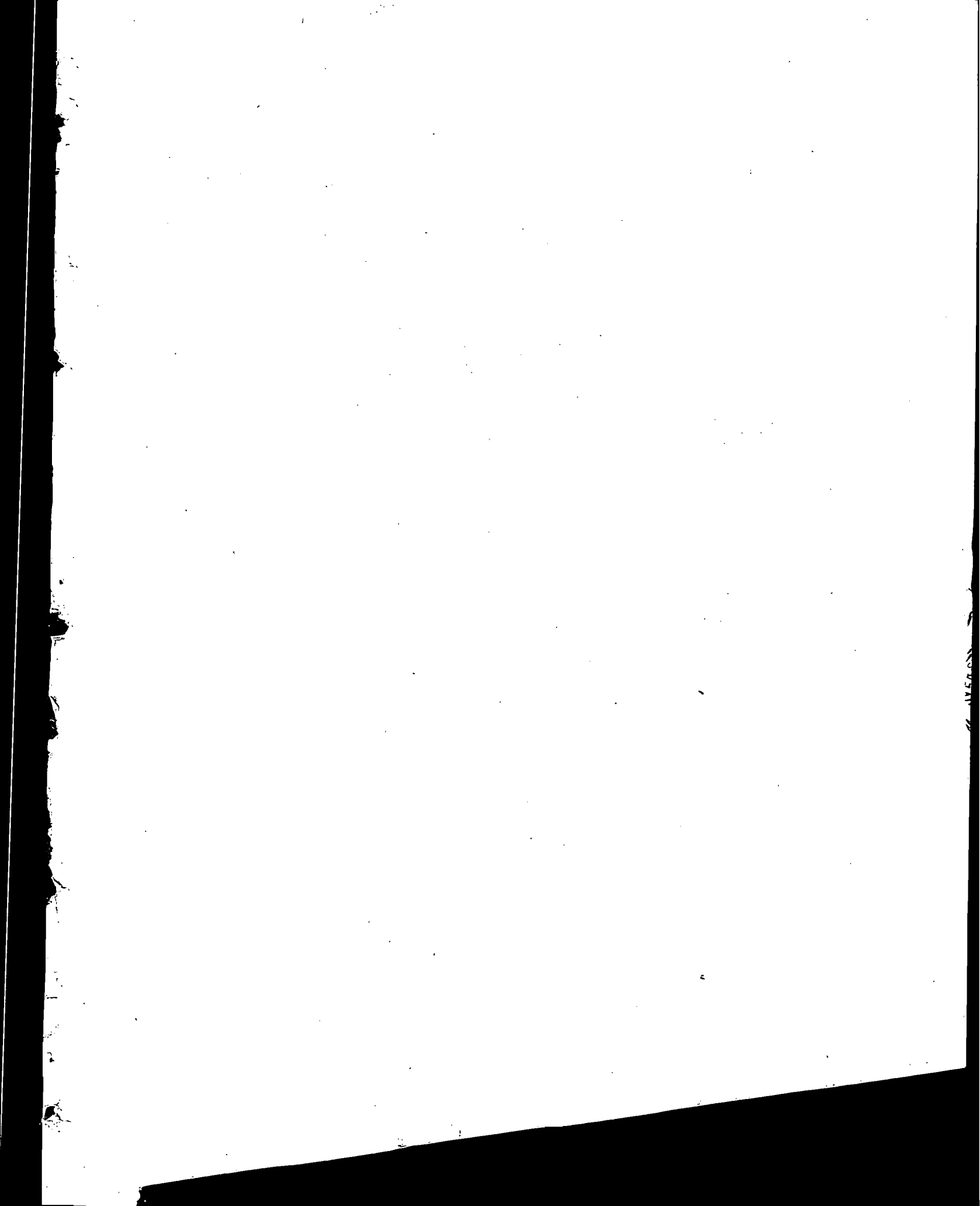


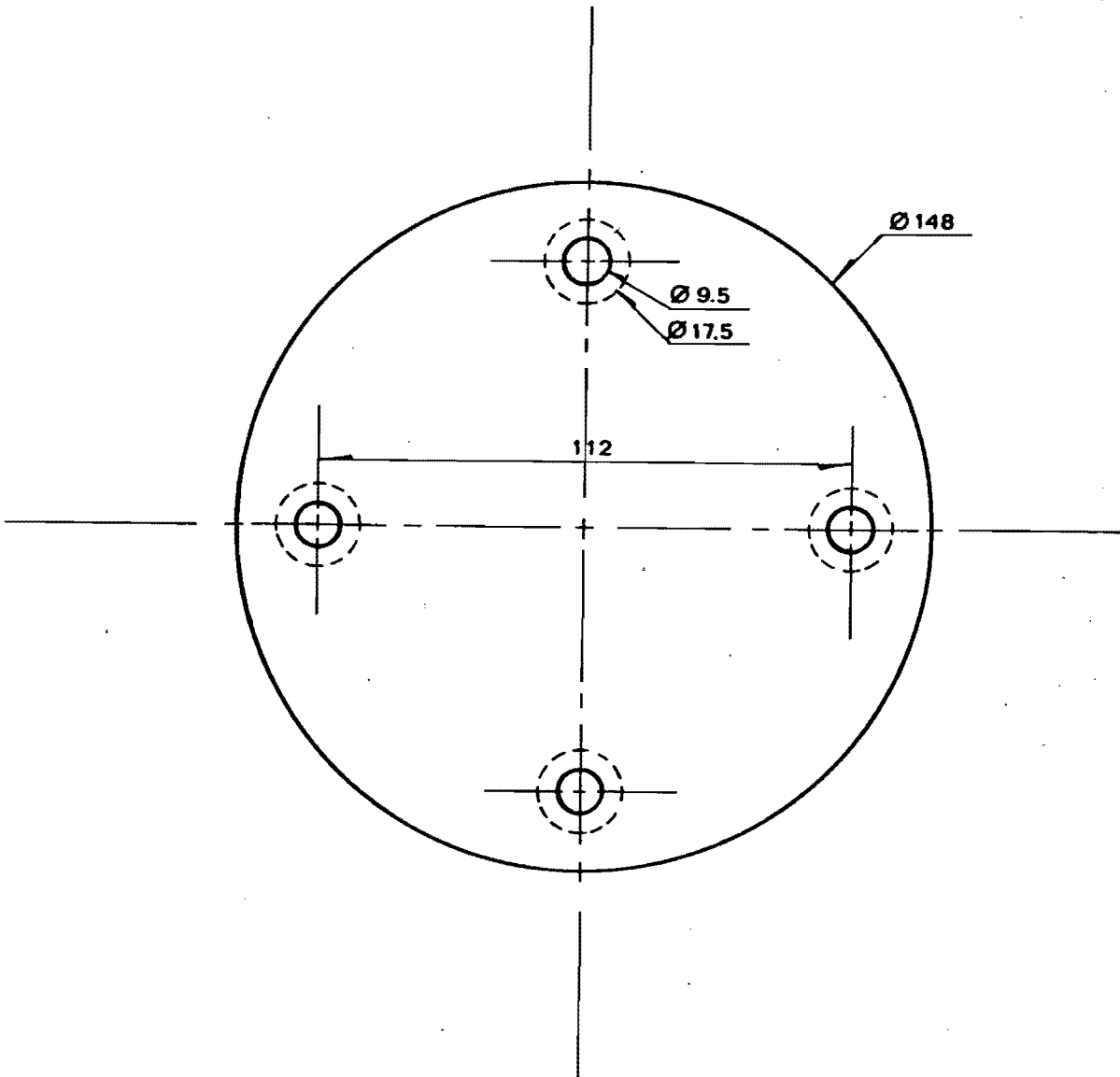


PIEZA 4  
ESC. 1:2  
ACOT. mm



PIEZA 5  
 ESC. 1:2  
 ACOT. mm





PIEZA 6  
ESC. 1:2  
ACOT. mm