

# ESTUDIO FOTOELASTICIMETRICO DE LAS CAVERNAS DE MAQUINAS Y DE VALVULAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DEL RIO NARE

GABRIEL GARCIA MORENO  
Ingeniero Jefe del Laboratorio  
NICOLAS DIB DAVID  
Ingeniero Asistente

## 1) Tensiones en el Prototipo

Las tensiones encontradas por experimentos directos "in situ", en las galerías de acceso, dieron aproximadamente lo siguiente:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{pv} = (\text{vertical}) = 200 \text{ kgs/cm}^2 \\ \sigma_{ph} = (\text{horizontal}) = 100 \text{ kgs/cm}^2 \end{array} \right\} \text{tensiones principales}$$

Hemos llamado a estas tensiones vertical y horizontal, a pesar de que la dirección que hemos denominado vertical se encontró en el terreno con una inclinación de 23° con respecto a la vertical verdadera, y porque en consecuencia hemos inclinado el eje vertical de las cavernas, en el modelo, 23° con respecto al eje de carga.

## 2) Constante de birrefringencia del material del Modelo

El material del modelo es Araldita, de 3/8" de espesor, resina epóxica fácil de cortar y pulir, muy sensible fotoelásticamente hablando, y que presenta una fluencia moderada.

La constante de birrefringencia se encontró del análisis de un disco de 10 cms. de diámetro, llevando el centro del disco hasta la franja 4 ( $N_c=4$ ) bajo una carga diametral concentrada (P).

Sabemos de la Elasticidad que

$$p - q = \frac{8 P}{\pi t d} \therefore \tau_{\text{máx}} = \frac{p - q}{2} = N_c F = \frac{4 P}{\pi t d}$$

donde:  $p$  y  $q$  = tensiones principales

$\tau_{\text{máx}}$  = tensión tangencial máxima

$P$  = carga diametral concentrada

$t$  = espesor del disco



$d$  = diámetro del disco  
 $N_c$  = orden de franja en el centro  
 $F$  = constante de birrefringencia.

Los valores encontrados fueron los siguientes:

$P = 193,10 \text{ kgs.}$   
 $t = \frac{3}{8} \times 2,54 = 0,95 \text{ cms.}$   
 $d = 10 \text{ cms.}$   
 $N_c = 4$   

$$F = \frac{193,10}{3,14 \times 0,95 \times 10} = \frac{193,10}{29,83} = 6,47 \text{ kgs/cms}^2 \text{ franja}$$

### 3) Fabricación y escala del modelo

Se tomó un cuadrado de  $14 \times 14 \text{ cms.}$  y se le perforaron, en su centro, las dos cavernas en escala  $1:750$ .

Se tuvo especial precaución de no introducirle tensiones residuales; sin embargo, fue imposible obtener bordes perfectamente lisos, como se puede apreciar en las fotografías.

### 4) Leyes de Similitud

El modelo corresponde a un prototipo de  $140 \times 750 = 105000 \text{ mms.}$   $= 105,00 \text{ mts.}$  de lado.

$9,5 \times 750 = 7125 \text{ mms.} = 7,12 \text{ mts.}$  de espesor.

Las tensiones se encuentran distribuidas sobre un área de:

$105,00 \times 7,12 = 747,60 \text{ mts}^2 = 7'476.000 \text{ cms}^2$ .

Luego las cargas concentradas equivalentes serán:

$F_{pv} = 200 \times 7'476.000 = 1'495.200 \text{ Tons.}$

$F_{ph} = 100 \times 7'476.000 = 747.600 \text{ Tons.}$

$1/L = 1/750$

$\sigma_m \quad F_m$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{F_m}{F_p} \left( \frac{1}{L} \right)^2$$

Ley de similitud

El  $\sigma_m$  lo vamos a deducir a partir de la  $F$  del material birrefringente y bajo la hipótesis de obtener 4 franjas:

$m = 6,47 \times 4 = 25,88 \text{ kgs/cm}^2$

$$F_{mv} = \frac{25,88 \times 1'495.200}{200,00 \times 562.500} = \frac{1934,79}{5625,00} = 0,344 \text{ Tons.}$$

O sea:  $F_{mv} = 344 \text{ kgs.}$

$F_{mh} = 172 \text{ kgs.}$

Así pues, verticalmente aplicamos con el gato hidráulico del equipo una carga vertical de  $344 \text{ kgs.}$ , la cual se distribuyó con un



sistema de distribución (Palonnier), que se puede apreciar claramente en la fotografía N° 1. Igualmente se distribuyó la carga horizontal, la cual se aplicó por medio de un sistema de palancas que puede verse en la fotografía N° 1.

## 5) Experiencias

**Etapas 1ª.** Primero se perforaron las cavernas hasta la cota 1060,15 y 1062,80 en válvulas y máquinas respectivamente. El objeto era hacer un estudio cualitativo de los efectos conjuntos de las perforaciones.

En la foto N° 2 vemos la distribución de las franjas (isocromáticas). En éstas se puede apreciar cómo la parte inferior de las cavernas, AC y HF, quedaron totalmente sometidas a la franja de orden aproximado de  $n = 1,8$ , que equivale a una tensión de tracción de

$$2 nF = 1,8 \times 12,94 = 23,30 \text{ kgs/cm}^2.$$

Esta tensión es de tracción, según se ve del plano N° 2 que corresponde a las isostáticas.

En la clave de ambas cavernas, puntos J y E de la foto N° 2, se obtiene igualmente un valor de tracción similar:  $= 23,30 \text{ kgs/cm}^2$ .

La mayor concentración de tensiones de compresión se obtiene en las esquinas A, B, F y Q de la foto N° 2.

Aquí, el orden de franja sobrepasa el valor de 4,5, o sea, una tensión de compresión de:

$$2 nF = 4,5 \times 12,44 = 58,24 \text{ kgs/cm}^2.$$

En las planchas 1 y 2 presentamos los diagramas de isoclinas y de isostáticas respectivamente, para esta primera etapa.

En la plancha 1 los puntos M, N, O y P, en la caverna principal, e I, D, K y L, en la caverna de válvulas, marcan la posición de los puntos singulares (Puntos de cero tensión; en ellos cambia el signo de la tensión). Así, los trayectos MN y OP son de tracción y el resto de compresión, según se aprecia en el plano N° 2.

Los puntos A, B, C, D, E, F, G, H, Q y R son isotrópicos (Puntos en donde las tensiones principales son iguales, es decir, la tensión tangencial máxima o cizalladura es nula).

Los puntos Q y R son seguramente debidos a un defecto que tenía el sistema de carga. En efecto, en esta primera etapa la placa de reposo inferior tenía un pequeño agujero de unos 9 mms. de diámetro. Para la segunda etapa corregimos esta anomalía y obtuvimos un solo punto isotrópico en lugar de dos. Foto N° 3.



**Conclusiones de la primera etapa:** Las tensiones de compresión apenas sobrepasan las obtenidas a partir de ensayos de rotura del material, a presión atmosférica, utilizando un coeficiente de seguridad de 2,0.

Utilizando 10 núcleos del túnel de acceso, obtuvimos en nuestros laboratorios un promedio para la compresión de  $\sigma_{rotura_c} = 843$  kgs/cm<sup>2</sup> (Rango = 399 kg/cm<sup>2</sup>). (Ensayos posteriores efectuados sobre muestras tomadas directamente en las cavernas, subieron este promedio aproximadamente a 1.200 kg/cm<sup>2</sup>). La dispersión fue un poco alta, pero de todas formas creemos que se puede aceptar tensiones de trabajo del orden de  $\sigma_{\text{útil}_c} = 400$  kgs/cm<sup>2</sup>.

Para la tracción (Ensayo brasileiro o de tracción por compresión) se utilizaron 4 muestras, con un promedio de:

$$\sigma_{rotura_t} = 114 \text{ kgs/cm}^2 \quad (\text{Rango} = 29)$$

Aquí la dispersión es menor y por consiguiente se puede aceptar una tensión de trabajo de tracción de:

$$\sigma_{\text{útil}_t} = 50 \text{ kgs/cm}^2$$

Ahora buscaremos las tensiones en el prototipo a partir de las tensiones en el modelo

$$\sigma_{pc} = \frac{58,24 \times 1'495.200}{0,344 \times 562.500} = 452 \text{ kgs/cm}^2 \text{ de compresión}$$

(a regla de cálculo)

En cuanto a la tracción:

$$\sigma_{pt} = 180 \text{ kgs/cm}^2 \text{ de tracción}$$

Entonces, en esta etapa la tensión de tracción sobrepasa a la tensión de rotura del material en la clave y en el piso.

**Etapa 2ª. Final.** Aquí se llevaron las perforaciones hasta las cotas 1044,85 en la caverna de máquinas y hasta la 1049,35 en la de válvulas.

A continuación se tomó una serie de fotografías de los isocromáticas con campo oscuro, lo cual nos da franjas enteras. Se invirtió el modelo de derecha a izquierda con el fin de observar el efecto del "palonnier" horizontal sobre la distribución de las isocromáticas.

Se advirtió que había una influencia muy marcada, no del "palonnier" sino de la placa de apoyo. Se substituyó ésta, y se tomaron de nuevo las fotografías con campo oscuro (foto N° 3); luego, con campo claro, lo cual nos proporcionó franjas medias (foto N° 4). El diagrama correspondiente de las isoclínicas lo presentamos en la plancha



Nº 3, y en la plancha Nº 4 presentamos las isostáticas. En esta plancha están marcadas claramente las zonas de compresión y de tracción en los bordes de las cavernas.

Presentamos un diagrama que numera los puntos donde se calcularon las tensiones en el interior del macizo. Las tensiones obtenidas se muestran en la tabla Nº 1. Estas son tensiones principales, cuyas direcciones pueden encontrarse utilizando la plancha Nº 3. El cálculo de las tensiones principales lo hicimos investigando el orden de franjas con el auxilio del método de Tardy, es decir, utilizando el analizador del polariscopio como compensador. El orden de las franjas es representativo, o mejor dicho, proporcional a la diferencia de las tensiones principales en cada punto en consideración. Para conocer la suma de las mismas, integramos la ecuación de Laplace en el campo del modelo. Esta integración la ejecutamos por diferencias finitas (método de Liebman), lo cual redujo el problema a resolver un sistema simultáneo de 46 ecuaciones con 46 incógnitas.

Este nuevo problema lo resolvimos por relajación, para lo cual hicimos un programa que nos permite resolver aproximadamente hasta 150 ecuaciones con 150 incógnitas, en un computador digital. Presentamos, en consecuencia, las hojas del computador con los residuos finales todos menores de 0,01 y la solución del sistema de ecuaciones.

Conociendo, pues, en cada uno de los 46 puntos la diferencia de tensiones principales y la suma, se deducen inmediatamente los valores particulares de cada tensión. Como ya lo habíamos visto, estos valores los representamos en la tabla Nº 1.

En la plancha Nº 5 presentamos los diagramas de los valores de las tensiones en el borde de las cavernas. Aquí advertimos tensiones de compresión en las esquinas A y E de la caverna grande y en las I y Q de la pequeña, que presentan valores del orden de 750 kgs/cm<sup>2</sup>. Es decir, cercanos a la tensión de rotura del material. En las zonas de tracción BC, GF, NO y SR la mayor tensión de tracción es del orden de 110 kgs/cm<sup>2</sup> en las claves de los arcos GF y SR. Este valor también se encuentra cercano al de rotura por tracción, en este material. También, nos permite la plancha Nº 5 hacer una pequeña corrección en la plancha Nº 3. En efecto, el punto O de la Nº 5 debería coincidir con el R de la Nº 3. Es preciso, pues, desplazar ligeramente el punto R de la Nº 3 hacia el punto Q, reduciendo así la zona de tracción, la cual debe quedar como se representa en la plancha Nº 5.

### CONCLUSIONES

En lo que sigue nos referimos a la plancha Nº 5. Los resultados obtenidos pueden ser tomados como una buena aproximación a la rea-



lidad en la medida en que sean reales las hipótesis iniciales de carga. Ya hemos mencionado la sensibilidad del método fotoelástico, cuando relatamos que tuvimos que invertir el modelo varias veces y reformar el "palonnier" y la placa de apoyo hasta obtener casi 8 franjas en donde antes se habían obtenido solamente 4.

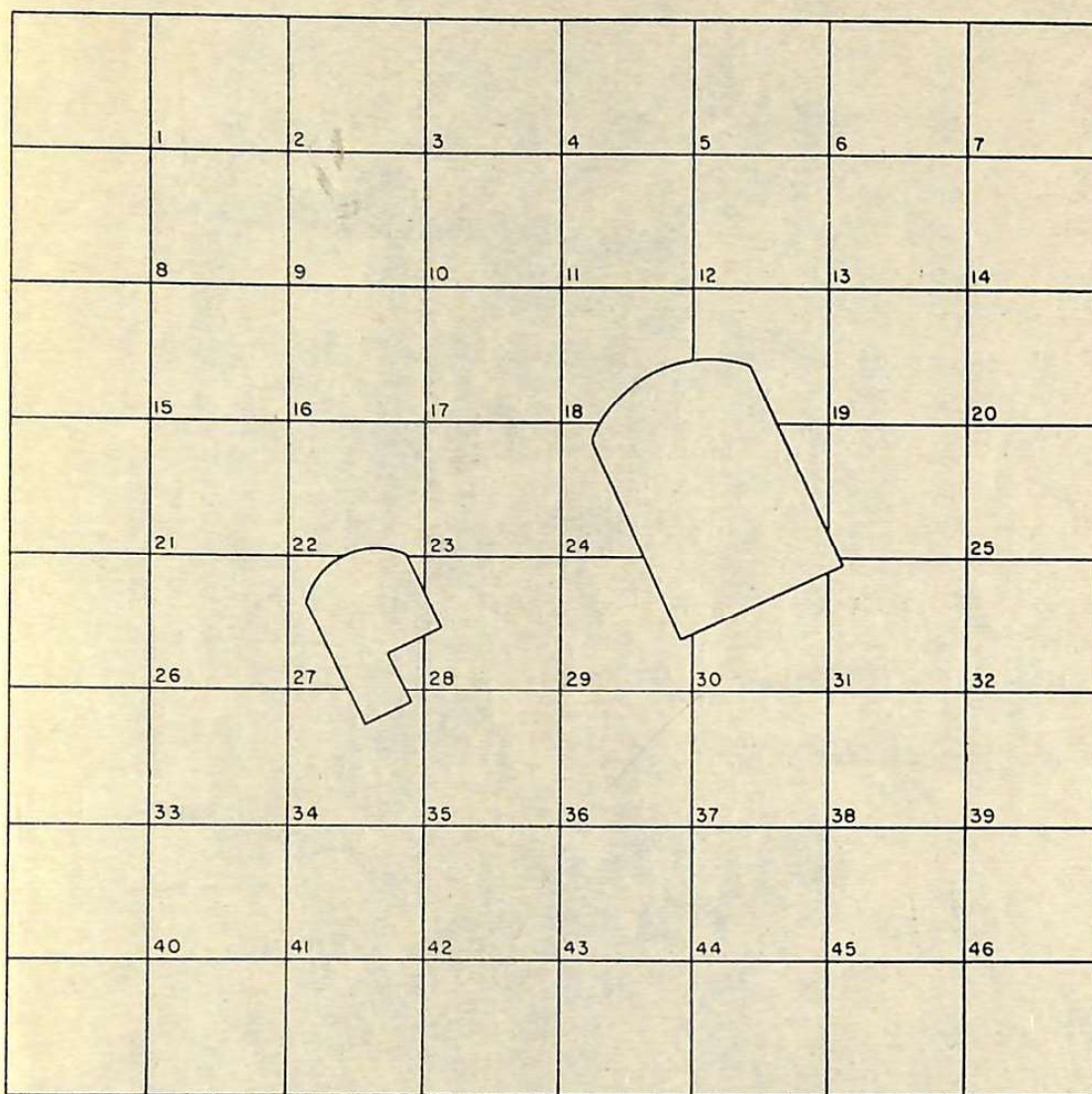
Convendría sacar resistencias de la roca en los puntos A, E, I, Q y en las zonas de tracción. En caso de que estas resistencias confirmaran que las tensiones elásticas están próximas a las de rotura, habría que hacer algo para aliviar estas grandes concentraciones. Una buena medida sería la de redondear las esquinas mencionadas. En cuanto a las zonas de tracción, especialmente las GF y SR, podrían ser reforzadas convenientemente con pernos, pero evidentemente lo ideal sería cambiar la directriz circular por una directriz parabólica que se aproxime más a las isostáticas mostradas en la plancha N° 4.

Otro aspecto importante del asunto consiste en que la carga inclinada a 23° es muy desfavorable. Si la carga hubiese sido vertical, no se habrían presentado tan grandes concentraciones. Por lo tanto valdría la pena tratar de confirmar, por medio de experiencias "in situ", las direcciones de las tensiones principales dadas en la plancha N° 4.

**TABLA N° 1**

Punto	$\sigma_1$ kgs/cm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ kgs/cm <sup>2</sup>	Punto	$\sigma_1$ kgs/cm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ kgs/cm <sup>2</sup>
1	136,0	20,0	24	245,5	-7,5
2	126,0	56,0	25	223,0	57,0
3	99,0	99,0	26	143,5	-40,5
4	168,5	27,5	27	151,0	-52,0
5	137,5	20,5	28	206,0	-65,0
6	162,5	10,5	29	173,0	5,0
7	168,5	-8,5	30	91,0	66,0
8	139,5	-5,5	31	226,0	28,0
9	128,5	35,5	32	191,5	8,5
10	142,0	61,0	33	103,0	20,0
11	205,0	12,0	34	108,0	30,0
12	83,5	-28,5	35	158,5	1,5
13	173,0	-11,0	36	147,5	30,5
14	166,5	-10,5	37	126,5	56,5
15	137,0	-21,0	38	158,5	40,5
16	127,0	13,0	39	162,0	5,0
17	158,0	76,0	40	119,5	30,5
18	301,0	115,0	41	107,5	62,5
19	258,0	8,0	42	121,0	62,0
20	199,0	2,0	43	132,0	60,0
21	125,5	-34,5	44	136,5	58,5
22	153,0	-107,0	45	144,5	48,5
23	187,5	-12,5	46	164,0	4,0





**Diagrama de puntos de cálculo de tensiones principales presentadas en la tabla No. 1**

**Nota: Cada división representa 13,125 mts.**



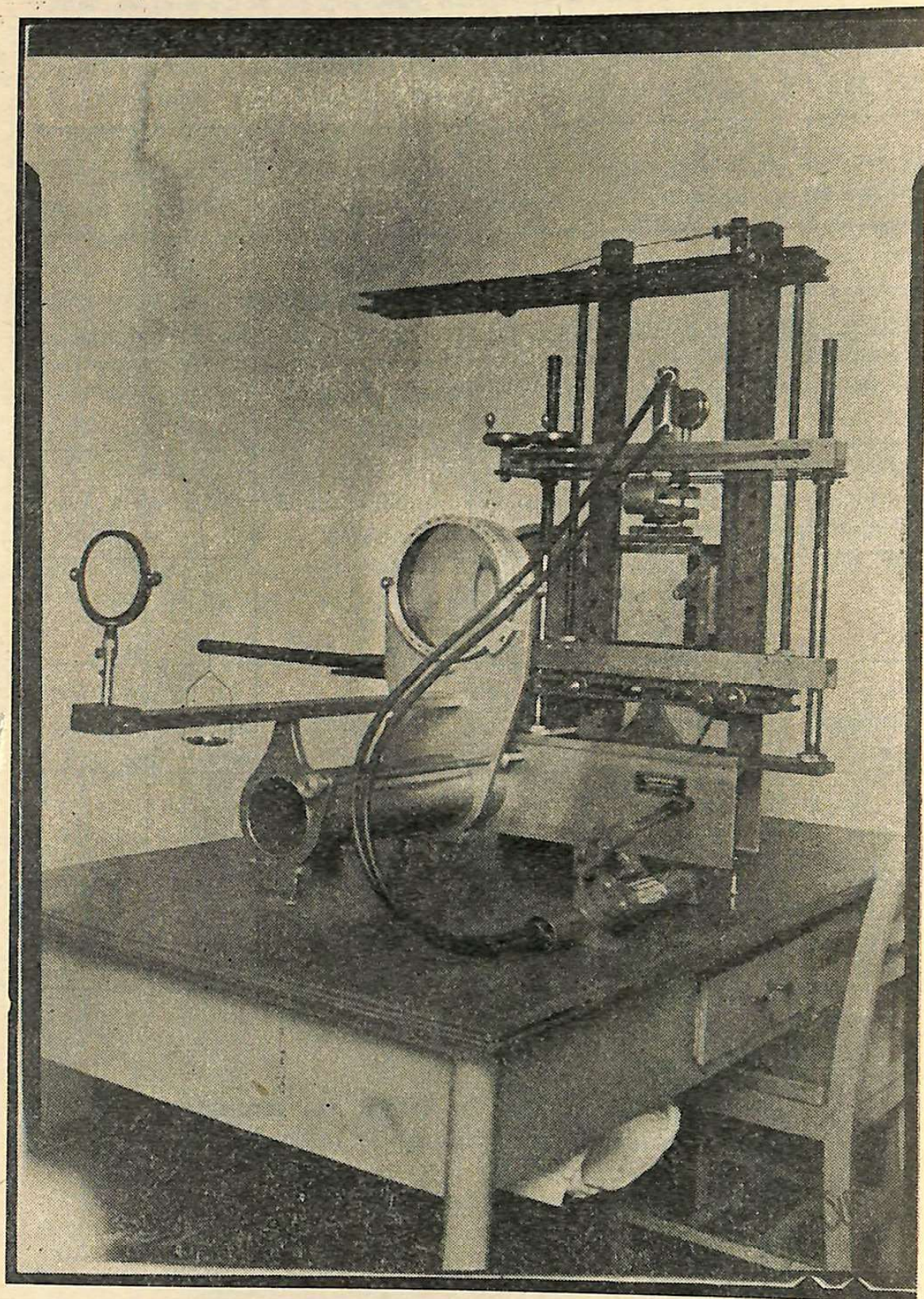


Foto No. 1





Foto No. 2





Foto No. 3



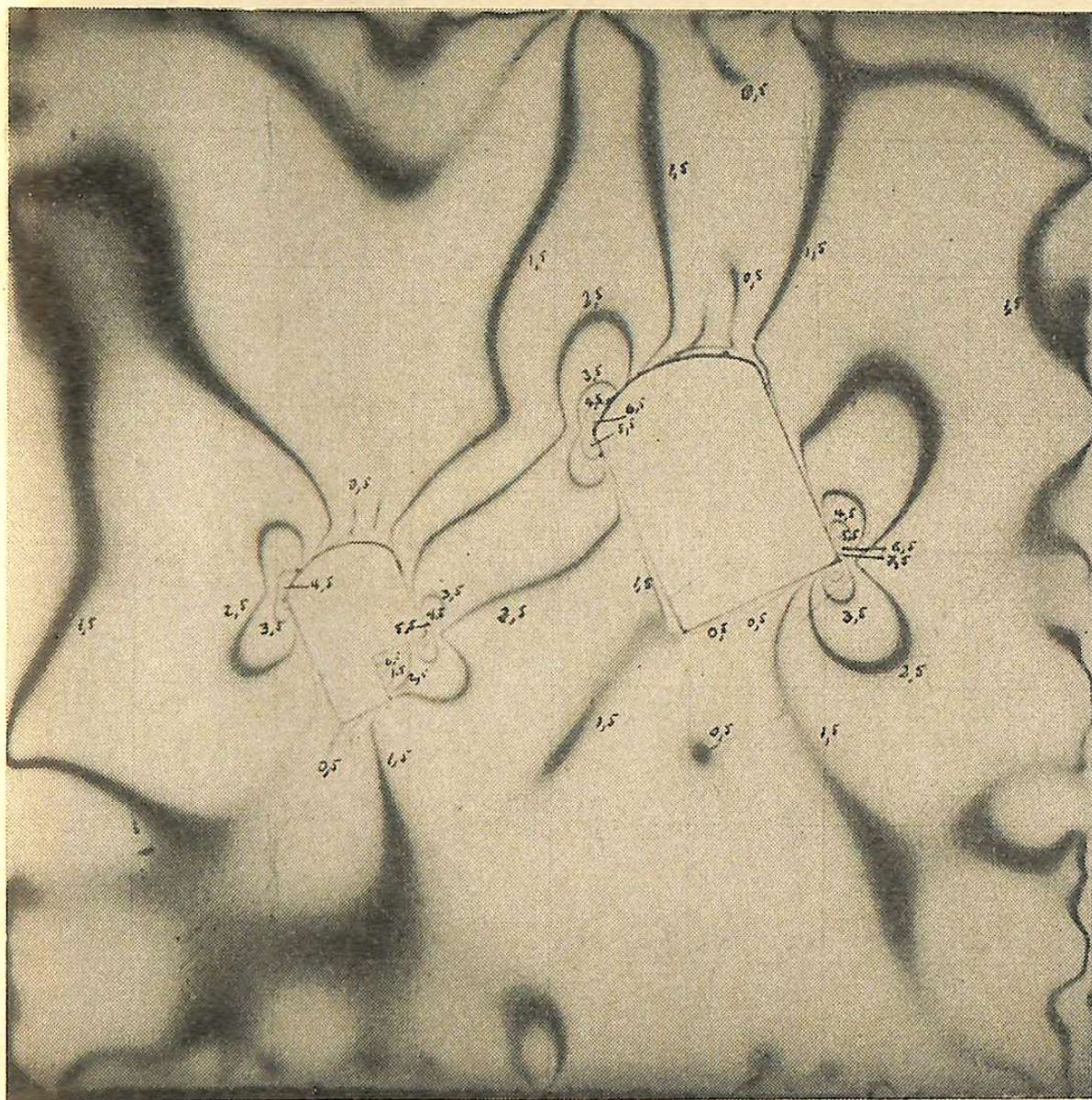
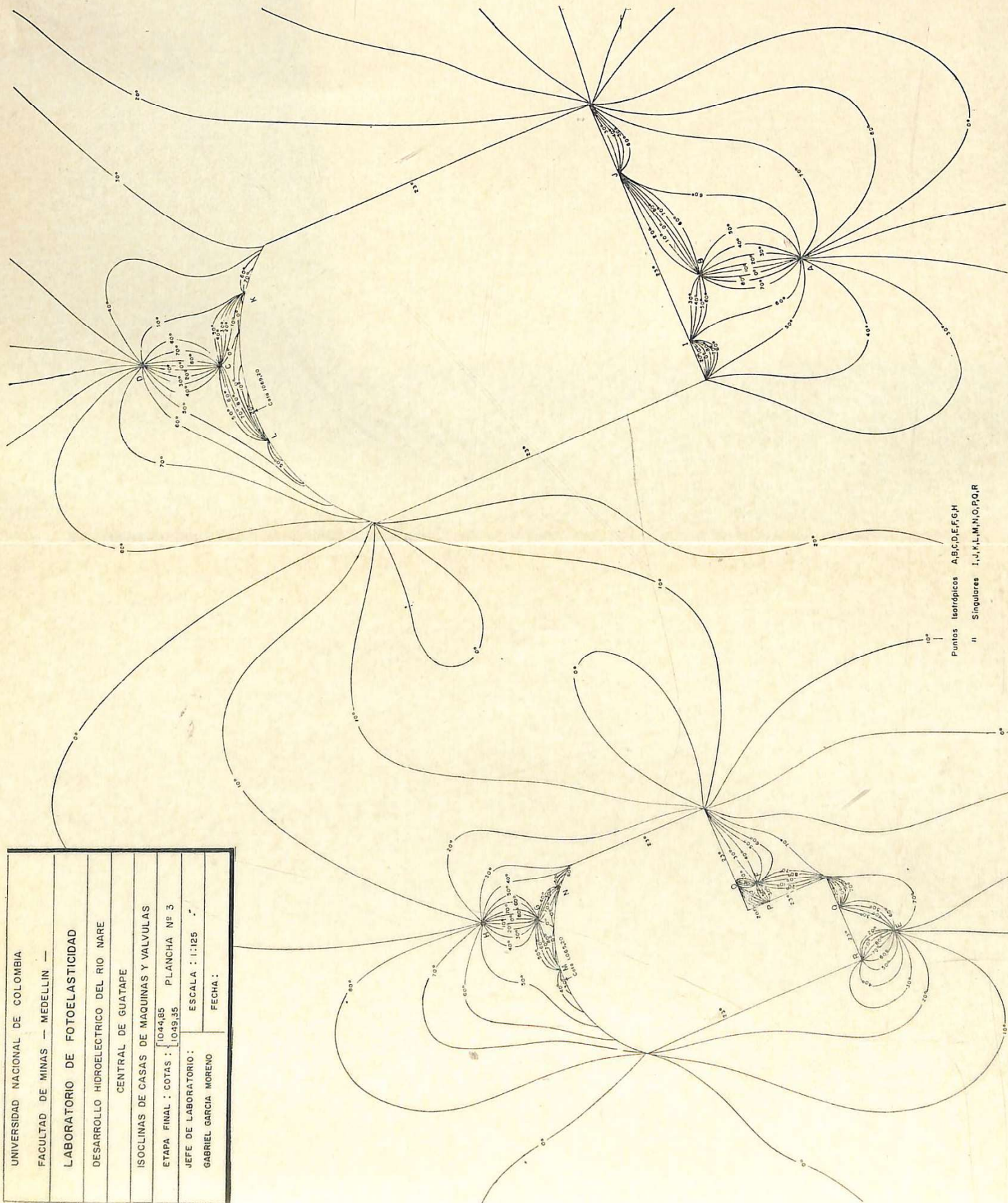


Foto No. 4



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS — MEDELLIN —
LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD
DESARROLLO HIDROELECTRICO DEL RIO NARE
CENTRAL DE GUATAPE
ISOCLINAS DE CASAS DE MAQUINAS Y VALVULAS
ETAPA FINAL : COTAS : $\begin{cases} 1044,85 \\ 1049,35 \end{cases}$ PLANCHA N° 3
JEFE DE LABORATORIO : GABRIEL GARCIA MORENO
ESCALA : 1:125
FECHA :



Puntos Isotrópicos A,B,C,D,E,F,G,H  
Puntos Singulares I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS — MEDELLIN —

LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD

DESARROLLO HIDROELECTRICO DEL RIO NARE

CENTRAL DE GUATAPE

ISOSTATICAS DE CASAS DE MAQUINAS Y VALVULAS

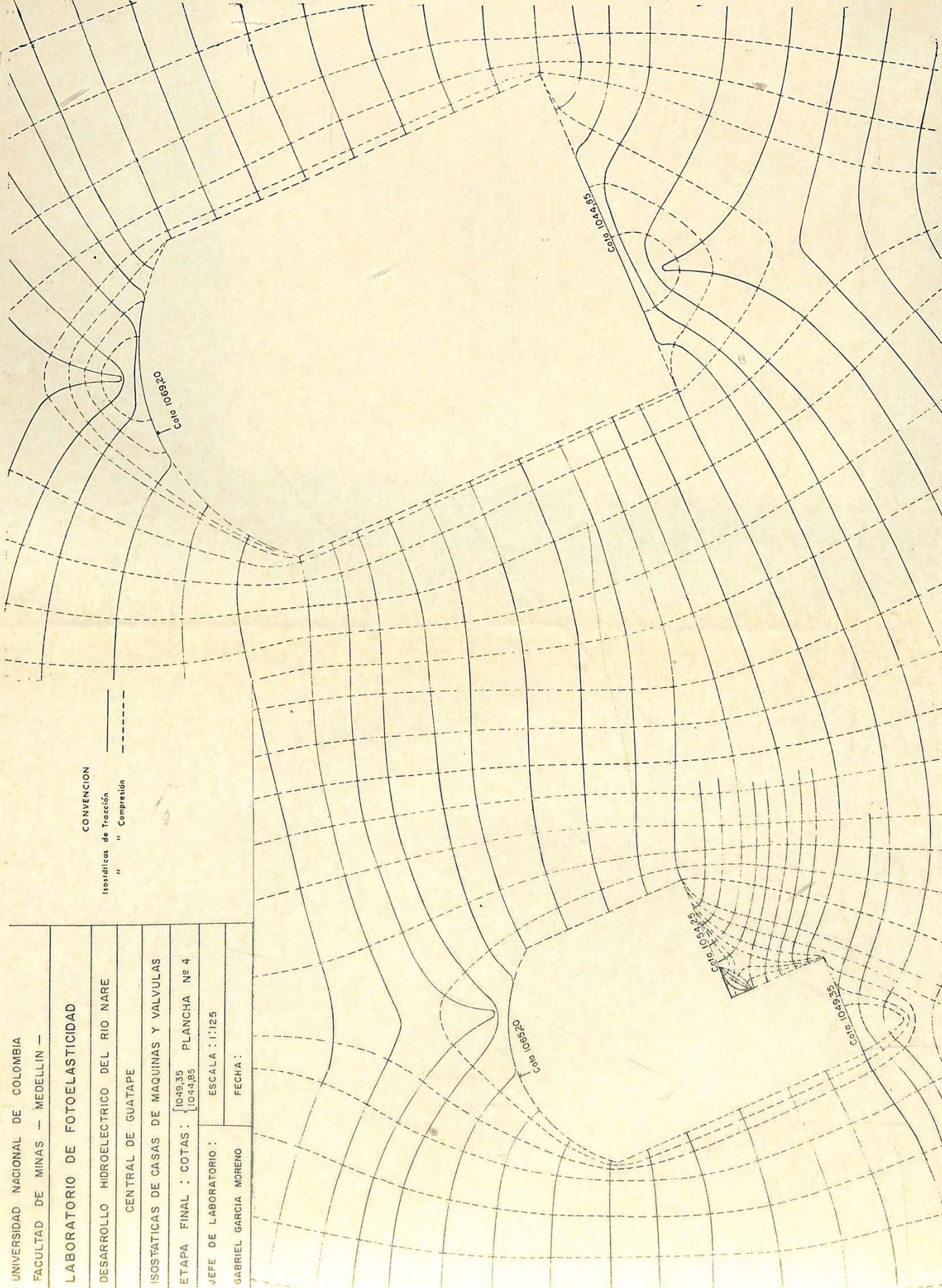
ETAPA FINAL : COTAS :  $\begin{cases} 1049,35 \\ 1044,95 \end{cases}$  PLANCHA N° 4

JEFE DE LABORATORIO : ESCALA : 1:125

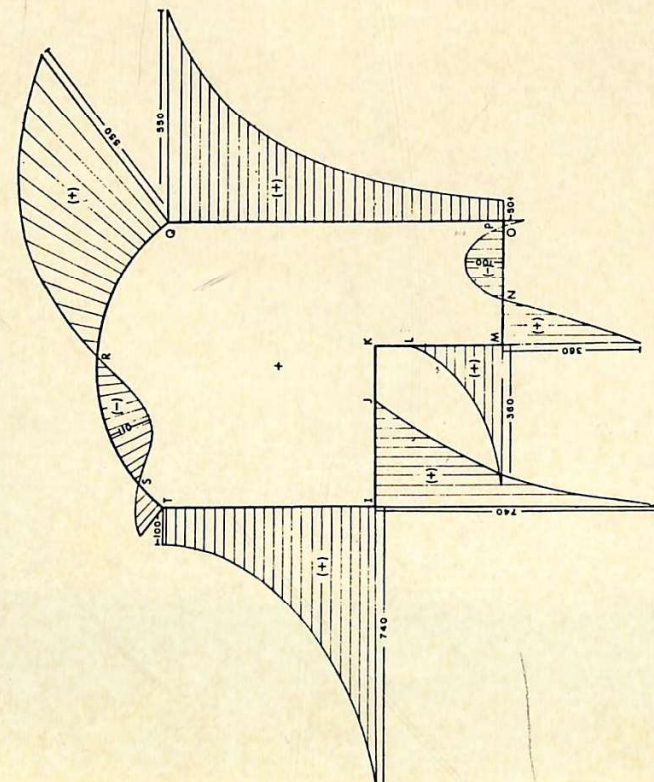
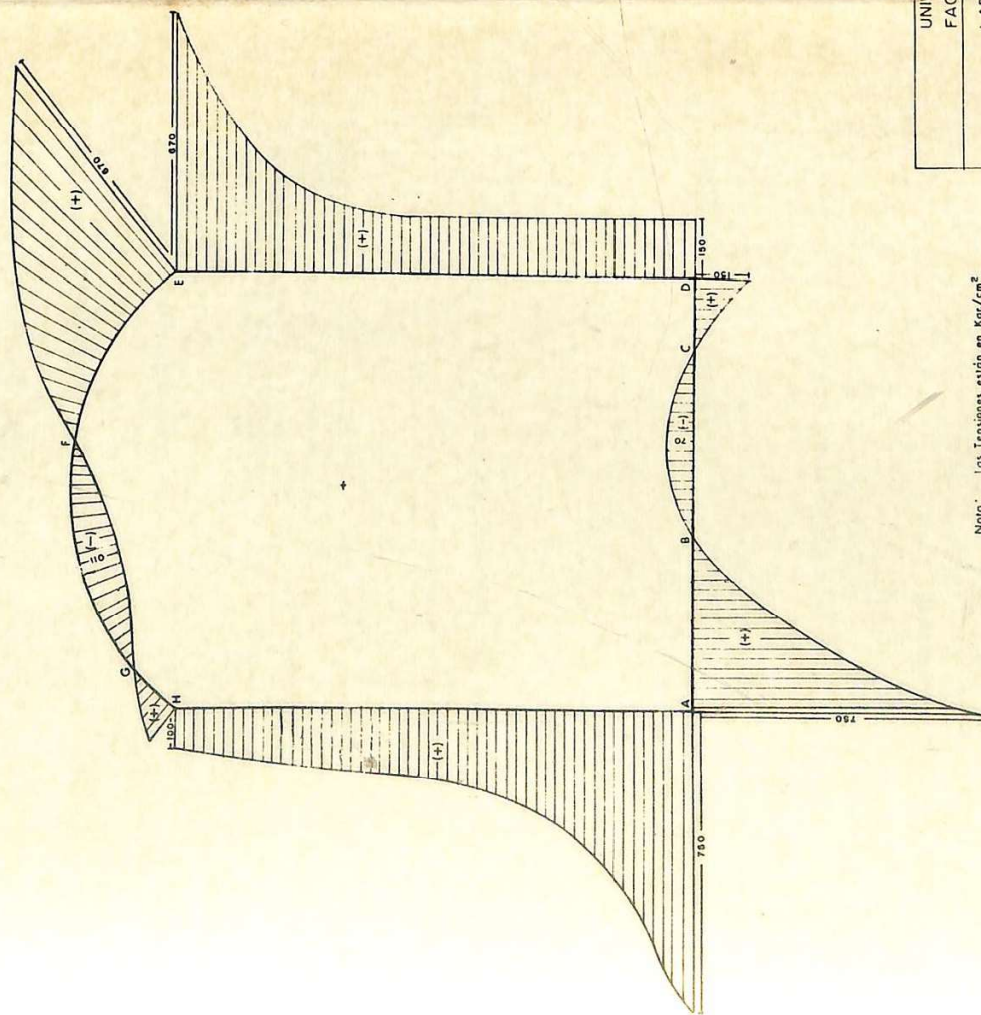
GABRIEL GARCIA MORENO FECHA :

CONVENCION

Isostaticas de Tension  
" " Compresion







Nota: Las Tensiones están en Kgr/cm<sup>2</sup>  
 (+) : Compresión  
 (-) : Tracción

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE MINAS-MEDELLIN -		DIAGRAMA DE TENSIONES EN LAS CAVERNAS	
LABORATORIO DE FOTOELASTICIDAD		PLANCHA N° 5	Escala de Longitudes: 1:150.
DESARROLLO HIDROELECTRICO DEL RIO NARE		JEFE DE LABORATORIO: Gabriel Garcia Moreno	Escala de Tensiones: 1:100
CENTRAL DE GUATAPE		Fecha :	