

CALCULO DE LOS ESFUERZOS DEL ARCO DEL SIFON DE HUEXOTITLANAPA, PRESA DE VALSEQUILLO, PUE.

POR EL ING. JUAN R. BRELIVET

JEFE DE LA SECCION DE ELASTICIDAD, DE LA OFICINA DE INGENIERIA EXPERIMENTAL EN SAN JACINTO D. F.

TEMBLOR OBRANDO NORMALMENTE AL PLANO DEL ARCO

A) GENERALIDADES

Apartándose de los fenómenos de resonancia entre la frecuencia natural del arco y la frecuencia propia del fenómeno sísmico, se supondrán todas las partículas ligadas al arco con una aceleración uniforme, igual a $1/10$ g.

Se estudiarán aquí los esfuerzos producidos por las fuerzas de inercia que resultan suponiéndolas obrando perpendicularmente al plano del arco.

El arco estará sometido a las fuerzas originadas por su propia masa y a las que le transmite la tubería por medio de las columnas que la ligan al arco.

El último sistema de fuerzas es equivalente a una serie de fuerzas concentradas y de pares cuyos vectores momentos son paralelos.

B) CONVENCIONES DE SIGNOS

Los momentos de torsión que tienden a hacer girar el intradós hacia dentro del plano del arco, se consideran positivos.

Los momentos de flexión que tienden a hacer salir el arco de su plano hacia el lector son positivos.

Los vectores representativos de dichos momentos se colocarán de acuerdo con la convención sinistrorsum.

C) DETERMINACION DE LOS ESFUERZOS

1º Esfuerzos debidos a las fuerzas de inercia del arco

Las fuerzas exteriores están repartidas a lo largo del arco, proporcionales a un espesor y se consideran obrando normalmente al plano del arco y alejándose del lector.

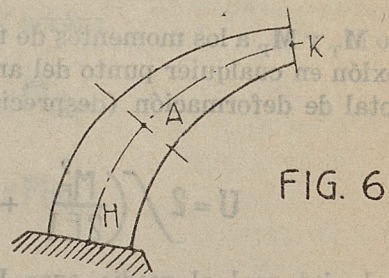
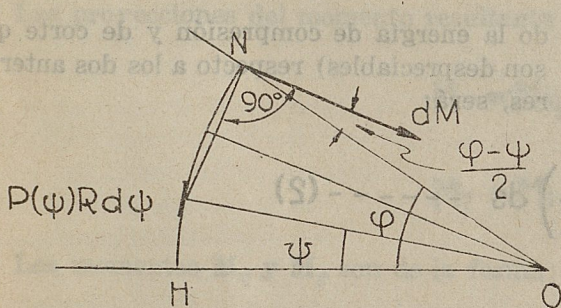
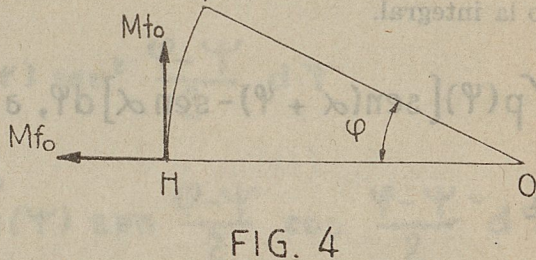
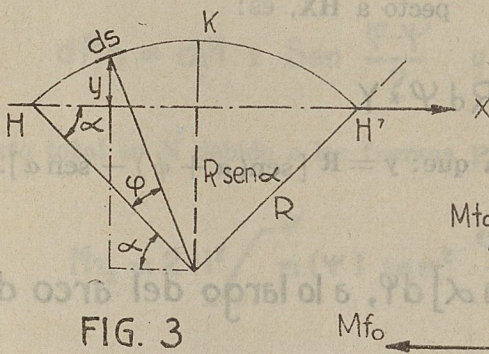
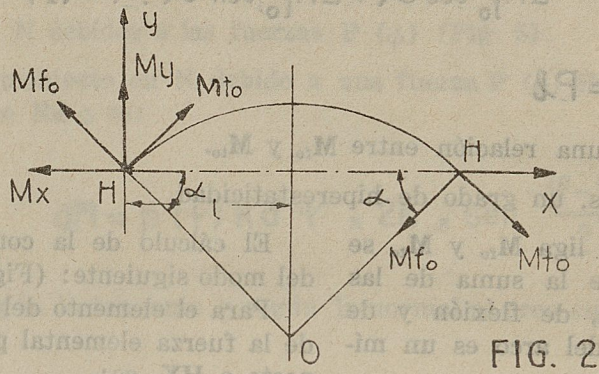
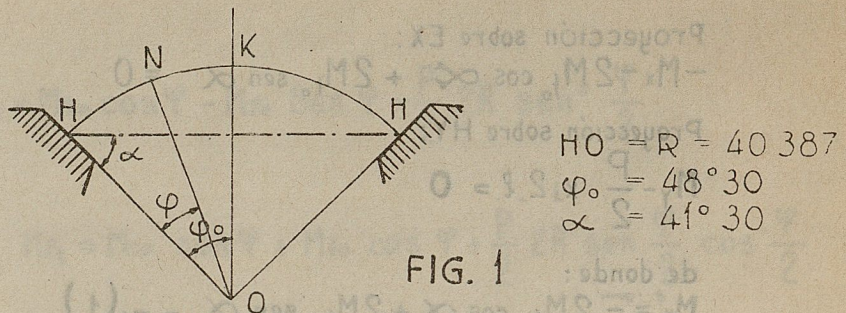
De acuerdo con los dibujos suministrados, la línea de los centros de gravedad de las secciones del arco, puede sustituirse, con muy poco error de cálculo, por un arco de circunferencia pasando por los puntos H, K, H'. (Véase Fig. Núm. 1.)

a) Ecuaciones de equilibrio estático

Llamando $P(\phi)$ a la carga por unidad de longitud, la carga sobre un elemento ds , es $p ds$, y la carga total será $P = \int p ds$, tomada a lo largo del arco. La simetría del arco nos da las reacciones $S_1 = S_2 = \frac{P}{2}$ perpendiculares al plano del arco y aplicadas respectivamente en H y H'.

Se tendrán, además, las ecuaciones relativas a los momentos. Aislado el arco en la figura 2, se tendrán en H y H' los momentos desconocidos M_{f_0} de flexión y M_{t_0} de torsión. Fijándose M_{f_0} y M_{t_0} para el apoyo H, los vectores correspondientes a H' se deducen por razón de simetría.

Tomando 2 ejes rectangulares HH' y HY, se proyectan los vectores momentos.



Llamando M_y y M_x los momentos de las fuerzas $p(\phi)$ con respecto a HY y HX .

Se tendrán las 2 ecuaciones siguientes:

Proyección sobre EX :

$$-M_x - 2M_{f_0} \cos \alpha + 2M_{t_0} \sin \alpha = 0$$

Proyección sobre HY :

$$M_y - \frac{P}{2} x_i 2l = 0$$

de donde:

$$M_x = -2M_{f_0} \cos \alpha + 2M_{t_0} \sin \alpha \quad (1)$$

$$M_y = Pl$$

La ecuación (1) da una relación entre M_{f_0} y M_{t_0} .

El sistema tiene, pues, un grado de hiperestaticidad.

La otra ecuación que liga M_{f_0} y M_{t_0} se obtendrá expresando que la suma de las energías de deformación, de flexión y de torsión a todo lo largo del arco es un mínimo.

El cálculo de la constante M_x se hace del modo siguiente: (Fig. 3.)

Para el elemento del círculo, el momento de la fuerza elemental $p(\phi) R d\phi$, con respecto a HX , es:

$$P(\phi) R d\phi \times Y$$

Pero el examen de la figura 3 muestra que: $y = R [\sin(\alpha + \phi) - \sin \alpha]$. M_x se obtendrá haciendo la integral.

$$M_x = 2 \int_0^{\alpha} p(\phi) R [\sin(\alpha + \phi) - \sin \alpha] d\phi, \text{ a lo largo del arco desde}$$

H hasta K

B) DETERMINACION DE LA SEGUNDA RELACION ENTRE M_{f_0} Y M_{t_0}

Llamando M_T y M_F a los momentos de torsión y de flexión en cualquier punto del arco, la energía total de deformación (desprecian-

do la energía de compresión y de corte que son despreciables) respecto a los dos anteriores, será:

$$U = 2 \int \left(\frac{M_F^2}{2EI} + \frac{M_T^2}{2C} \right) ds \quad (2)$$

extendiendo la integral al medio arco HK .

Se escribirá después que dicha energía es un mínimo, tomando $\frac{\delta U}{\delta M_{f_0}}$ e igualando dicha expresión a 0.

El primer paso es encontrar M y M_T en cualquier punto N :

a) Momentos en N debidos a las reacciones y momentos en el empotramiento (figura 4).

Se tendrá:

$$M_{T_1} = M_{t_0} \cos \varphi - M_{f_0} \operatorname{Sen} \varphi - \frac{P}{2} 2R \operatorname{sen}^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$y \quad M_{F_1} = M_{t_0} \operatorname{sen} \varphi + M_{f_0} \cos \varphi + \frac{P}{2} 2R \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2}$$

b) Momentos en N debidos a las fuerzas P (ψ) (Fig. 5).

El elemento de momento en N debido a una fuerza P (ψ) Rd (ψ) correspondiente a un elemento de arco Rd ψ es:

$$dM = p(\psi) R d\psi \times 2R \times \operatorname{sen} \frac{\varphi - \psi}{2}$$

Sus proyecciones según la tangente y según la normal al arco en N son respectivamente:

$$dM_{T_2} = dM \times \operatorname{Sen} \frac{\varphi - \psi}{2} \quad y \quad dM_{F_2} = -dM \cos \frac{\varphi - \psi}{2}$$

El momento total en N debido a las fuerzas P (ψ) tendrá por proyecciones:

$$M_{T_2} = 2H^2 \int_0^\varphi p(\psi) \operatorname{sen}^2 \frac{\varphi - \psi}{2} d\psi$$

$$M_{F_2} = -2H^2 \int_0^\varphi p(\psi) \operatorname{sen} \frac{\varphi - \psi}{2} \cos \frac{\varphi - \psi}{2} d\psi$$

Las proyecciones del momento resultante en N serán:

$$M_T = M_{T_1} + M_{T_2}$$

$$M_F = M_{F_1} + M_{F_2}$$

Los momentos M_T y M_F son de la forma:

$$M_T = a M_{t_0} + b M_{f_0} + c$$

donde a, b y c son funciones de ϕ .

El cuadrado de dichos momentos será:

$$M_T^2 = (a M_{t_0} + b M_{f_0} + c)^2$$

Como varían relativamente poco I y C a los valores de I y C , correspondientes a una sección promedio (sección que pasa por el punto A) (Fig. 6).

Para expresar que el trabajo de deformación es un mínimo, se escribirá:

$$\frac{\delta U}{\delta M_{t_0}} = 0$$

Eso lleva a calcular $\frac{\delta M_T^2}{\delta M_{t_0}}$

$$\frac{\delta M_T^2}{\delta M_{t_0}} = 2(a M_{t_0} + b M_{f_0} + c) \left(a + b \frac{\delta M_{f_0}}{\delta M_{t_0}} \right)$$

Se calculará entonces:

$$\frac{\delta U}{\delta M_{t_0}} = 4 \int \left(\frac{M_T}{C} \frac{\delta M_T}{\delta M_{t_0}} + \frac{M_F}{EI} \frac{\delta M_F}{\delta M_{t_0}} \right) ds = 0 \quad (3)$$

extendiendo la integral al medio arco HK.

Finalmente, se obtiene una ecuación de la forma:

$$\mu M_{f_0} + \nu M_{t_0} + e = 0 \quad (4)$$

Resolviendo el sistema (1) (4), se obtienen los valores de M_{f_0} y M_{t_0} y, por consiguiente, los valores de M_F y M_T en cualquier punto del arco.

2º Esfuerzos debidos a las fuerzas de inercia de la tubería

Las fuerzas de inercia de la tubería se transportan al arco en los puntos de intersección de las columnas soporte del arco con éste. Como se tienen 10 fuerzas concentradas por cada medio arco, se supuso que dichas cargas se repartían con una ley continua a lo largo del arco. El error así come-

tido es pequeño y en cambio se simplifican mucho los cálculos.

Este caso es entonces idéntico al primero y se pueden determinar los momentos de empotramiento del mismo modo.

Se hizo un cálculo único con los casos 1º y 2º, habiéndose encontrado que la carga $p(\phi)$ podía ponerse en la forma $p(\phi) = a + b\phi$, con una aproximación suficiente; siendo a y b dos coeficientes constantes.

3º Esfuerzos debidos a los momentos de las fuerzas de inercia de la tubería

Además de las fuerzas nombradas en el 2º, la tubería da lugar en los puntos donde

intersectan las columnas con el arco, a momentos cuya distribución está indicada en la gráfica número 1.

El sistema constituido por el arco y supuesto sometido únicamente a los momentos citados, es hiperestático, siendo los vectores momentos de reacción en los apoyos, iguales a $\frac{\Sigma M}{2}$ y horizontales.

El cálculo de los momentos M'_T y M'_F correspondientes, está indicado en las tablas.

D) RESULTADOS NUMERICOS

a) Momentos debidos a las fuerzas de inercia del arco y a las transmitidas por las columnas de la tubería:

$$R = 40.387 \text{ m.} \quad \alpha = 41^\circ 30' \quad \varphi_0 = 48^\circ 30'$$

$$P(\varphi) = a + b\varphi = 12.124 - 5.068\varphi$$

$$P = \int p ds = 683.873 \text{ Tons.}$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ Ton/m}^2 \quad I = 76.8 \text{ m}^4$$

$$EI = 161\,280\,000 \text{ Ton.m}^2$$

$$C = 12\,410\,000 \text{ Ton.m}^2 = 12.41 \times 10^6 \text{ Ton.m}^2$$

$$\frac{\delta U}{\delta M_{to}} = 0 = 29\,6632 M_{to} - 3.7913 M_{fo} - 958.9993$$

$$\text{ecuación que con } M_{to} \text{ sen } \alpha - M_{fo} \text{ sen } \alpha - \frac{M_x}{2} = 0,$$

da lugar al sistema:

$$29.6632 M_{to} - 3.7913 M_{fo} - 958.9993 = 0$$

$$0.6626 M_{to} - 0.7490 M_{fo} - 2893.0995 = 0$$

obteniéndose:

$$M_{to} = -520.1623 \text{ Ton. m.}$$

$$M_{fo} = -4322.7 \text{ Ton. m.}$$

El cálculo de los momentos M''_T y M''_F a lo largo del arco está indicado en las tablas I y II.

b) Momentos en el arco debidos a los mo-

mentos de las fuerzas de inercia de la tubería.

Su cálculo está indicado en las tablas III y IV.

c) Momentos totales.

$$M_T = M'_T + M''_T$$

$$M_F = M'_F + M''_F$$

Su representación gráfica está en la gráfica número 2.

E) CONCLUSIONES

Los momentos flexionantes dan lugar a esfuerzos máximos del orden de: 24 kg./cm².

Los momentos de torsión dan lugar a esfuerzos máximos del orden de: 11 kg./cm².

Estos esfuerzos se producen de un modo simultáneo con los debidos al trabajo normal

del arco. Habría que reforzar el arco por medio de fierro que daría lugar a complicaciones de construcción con el consiguiente aumento de precio de la estructura.

Se impone un estudio de otras alternativas.

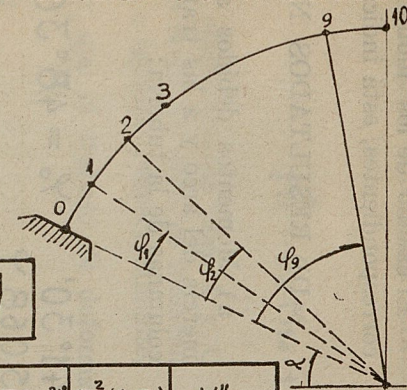
TABLA-I

CALCULO DE LOS MOMENTOS DE TORSION Y DE FLEXION M_T'' Y M_F'' EN DIVERSOS PUNTOS DEL ARCO, DEBIDOS A LAS FUERZAS DE INERCIA DEL ARCO Y LAS FUERZAS DE INERCIA DE LA TUBERIA SIN CONSIDERACION DE LOS MOMENTOS TRASMITIDOS.

$$\begin{cases} M_{t0} = -520.1623 \\ M_{f0} = -4322.7 \\ P = 683.873 \\ R = 40.387 \end{cases}$$

$$\begin{cases} PR = 27619.58 \\ R^2 = 1631.1098 \\ a = 12.124 \\ b = -5.068 \end{cases}$$

$$1 \text{ rad} = 57.29577$$



$$M_T'' = M_{t0} \cos \varphi - M_{f0} \text{Sen} \varphi - PR \text{Sen}^2 \frac{\varphi}{2} + R^2 \left[a(\varphi - \text{Sen} \varphi) + b \left(\frac{\varphi^2}{2} + \cos \varphi - 1 \right) \right]$$

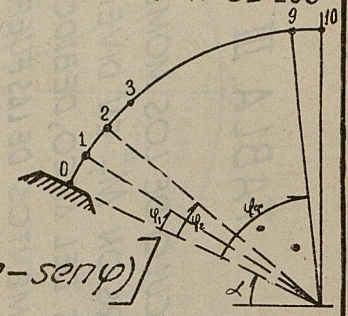
| φ | φ en radianes | $\text{Sen} \varphi$ | $\cos \varphi$ | $\text{Sen}^2 \frac{\varphi}{2}$ | $\varphi - \text{Sen} \varphi$ | $a(\varphi - \text{Sen} \varphi)$ | $\frac{\varphi^2}{2} + \cos \varphi - 1$ | $b(\frac{\varphi^2}{2} + \cos \varphi - 1)$ | $M_{t0} \cos \varphi$ | $-M_{f0} \text{Sen} \varphi$ | $-PR \text{Sen}^2 \frac{\varphi}{2}$ | $R^2(A+B)$ | M_T'' |
|-----------|-----------------------------|----------------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|---|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -520.1623 | 0 | 0 | 0 | -520.1623 |
| 1 | 5°45' | 0.100356 | 0.99497 | 0.0025078 | 0.000166 | 0.002013 | 0.000005 | 0.0000253 | -517.546 | +433.091 | -69.264 | +3.3242 | -150.394 |
| 2 | 11°10' | 0.1949 | 0.98107 | 0.009465 | 0.00124 | 0.01503 | 0.000063 | 0.000319 | -510.32 | +837.134 | -261.42 | +25.0359 | +90.43 |
| 3 | 16°20' | 0.28507 | 0.9596 | 0.020178 | 0.00387 | 0.04692 | 0.000233 | 0.001181 | -499.148 | +1215.243 | -557.308 | +78.4564 | +217.243 |
| 4 | 21°30' | 0.37525 | 0.9304 | 0.034790 | 0.00875 | 0.1061 | 0.000805 | 0.00408 | -483.959 | +1584.269 | -960.885 | +179.7157 | +319.141 |
| 5 | 26°00' | 0.4538 | 0.8988 | 0.050603 | 0.0154 | 0.1867 | 0.001765 | 0.008945 | -467.522 | +1895.072 | -1397.634 | +319.1103 | +349.026 |
| 6 | 30°50' | 0.5381 | 0.8587 | 0.070671 | 0.0256 | 0.3104 | 0.003475 | 0.017611 | -446.663 | +2215.384 | -1951.903 | +535.020 | +351.838 |
| 7 | 35°00' | 0.6109 | 0.8192 | 0.09043 | 0.0373 | 0.4522 | 0.0058 | 0.02939 | -426.117 | +2479.501 | -2497.639 | +785.526 | +341.271 |
| 8 | 39°30' | 0.6894 | 0.7716 | 0.114190 | 0.0533 | 0.6452 | 0.009235 | 0.0468 | -401.357 | +2749.669 | -3153.88 | +1130.359 | +324.791 |
| 9 | 43°50' | 0.765 | 0.7214 | 0.13932 | 0.0724 | 0.8778 | 0.014015 | 0.071028 | -375.245 | +2993.902 | -3847.96 | +1547.646 | +318.343 |
| 10 | 48°30' | 0.8465 | 0.6626 | 0.16869 | 0.0975 | 1.182 | 0.02088 | 0.10582 | -344.659 | +3237.702 | -4659.15 | +2100.543 | +334.436 |

TABLA-II

CALCULO DE LOS MOMENTOS DE TORSION Y DE FLEXION M_T'' Y M_F'' EN DIVERSOS PUNTOS DEL ARCO, DEBIDOS A LAS FUERZAS DE INERCIA DEL ARCO Y LAS FUERZAS DE INERCIA DE LA TUBERIA SIN CONSIDERACION DE LOS MOMENTOS TRANSMITIDOS.

$M_{t_0} = -520.1623$ $PR = 27619.58$
 $M_{f_0} = -4322.7$ $R^2 = 16311.1098$
 $P = 683.873$ $a = 12.124$
 $R = 40.387$ $b = -5.068$

$1 \text{ rad} = 57.29577$



$$M_F'' = M_{t_0} \sin \varphi + M_{f_0} \cos \varphi + \frac{PR}{2} \sin \varphi - R^2 [a(1 - \cos \varphi) + b(\varphi - \sin \varphi)]$$

| PUNTO | φ | φ en radianes | $(1 - \cos \varphi)$ | $(\varphi - \sin \varphi)$ | A $a(1 - \cos \varphi)$ | B $b(\varphi - \sin \varphi)$ | $-R^2(A+B)$ | $M_{t_0} \sin \varphi$ | $M_{f_0} \cos \varphi$ | $\frac{PR}{2} \sin \varphi$ | M_F'' |
|-------|-----------|--------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4322.700 | 0 | -4322.700 |
| 1 | 5°45' | 0.10019 | 0.00503 | 0.000166 | 0.0609 | 0.0008413 | -100.7047 | -52.115 | -4300.960 | 1383.603 | -3070.1767 |
| 2 | 11°10' | 0.19366 | 0.01893 | 0.001240 | 0.2295 | 0.0062800 | -384.5830 | -100.735 | -4240.870 | 2674.404 | -2051.784 |
| 3 | 16°20' | 0.28120 | 0.04040 | 0.003870 | 0.4898 | 0.0196100 | -830.9036 | -146.269 | -4148.060 | 3883.313 | -1241.920 |
| 4 | 21°30' | 0.36650 | 0.06960 | 0.008750 | 0.8438 | 0.0443400 | -1448.6540 | -190.639 | -4021.840 | 5061.288 | -599.845 |
| 5 | 26°00' | 0.43840 | 0.10120 | 0.015400 | 1.2269 | 0.0780500 | -2128.5170 | -228.039 | -3885.243 | 6054.212 | -187.587 |
| 6 | 30°50' | 0.51250 | 0.14130 | 0.025600 | 1.7131 | 0.1297000 | -3005.8090 | -266.583 | -3711.902 | 7077.517 | +93.223 |
| 7 | 35°00' | 0.57360 | 0.18080 | 0.037300 | 2.1920 | 0.1890000 | -3883.6720 | -298.365 | -3541.156 | 7921.296 | +178.103 |
| 8 | 39°30' | 0.63610 | 0.22840 | 0.053300 | 2.7691 | 0.2701000 | -5120.3800 | -330.875 | -3335.395 | 8784.407 | -2.243 |
| 9 | 43°50' | 0.69260 | 0.27860 | 0.072400 | 3.3777 | 0.3669000 | -6107.8540 | -360.264 | -3118.396 | 9564.661 | -21.853 |
| 10 | 48°30' | 0.74900 | 0.33740 | 0.097500 | 4.0910 | 0.4941000 | -7478.8010 | -389.602 | -2864.221 | 10343.533 | -389.091 |

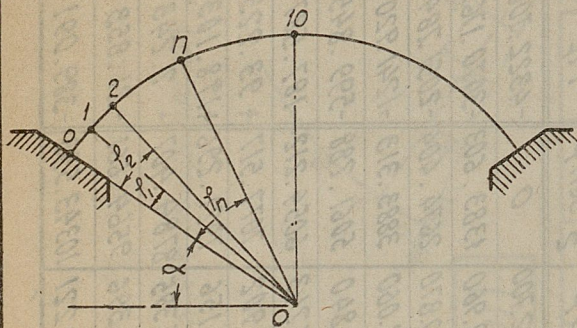


TABLA III

CALCULO DE LOS MOMENTOS DE TORSION M_T'' EN DIVERSOS PUNTOS DEL ARCO, DEBIDOS A LOS MOMENTOS DE LAS FUERZAS DE INERCIA DE LA TUBERIA, TRANSMITIDOS AL ARCO POR LOS CABALLETES.

$$M_{T_0} = 1366.7 \operatorname{sen} \alpha = 1366.7 \times 0.6626 = 905.575 \text{ Tm.}$$

$$M_{T_1 i} = 1366.7 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_1) = 1003.568$$

$$M_{T_1 d} = (1366.7 - 303.57) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_1) = 1063.13 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_1) = 780.656$$

$$M_{T_2 i} = 1063.13 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_2) = 845.229$$

$$M_{T_2 d} = (1063.13 - 250.35) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_2) = 812.78 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_2) = 646.242$$

$$M_{T_3 i} = 812.78 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_3) = 688.018$$

$$M_{T_3 d} = (812.78 - 199.19) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_3) = 613.59 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_3) = 519.404$$

$$M_{T_4 i} = 613.59 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_4) = 546.709$$

$$M_{T_4 d} = (613.59 - 160.10) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_4) = 453.49 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_4) = 404.059$$

$$M_{T_5 i} = 453.49 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_5) = 418.979$$

$$M_{T_5 d} = (453.49 - 126.65) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_5) = 326.85 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_5) = 301.977$$

$$M_{T_6 i} = 326.85 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_6) = 311.423$$

$$M_{T_6 d} = (326.85 - 100.69) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_6) = 226.16 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_6) = 215.485$$

$$M_{T_7 i} = 226.16 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_7) = 219.918$$

$$M_{T_7 d} = (226.16 - 76.18) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_7) = 149.98 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_7) = 145.841$$

$$M_{T_8 i} = 149.98 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_8) = 148.135$$

$$M_{T_8 d} = (149.98 - 64.43) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_8) = 85.55 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_8) = 84.498$$

$$M_{T_9 i} = 85.55 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_9) = 85.268$$

$$M_{T_9 d} = (85.55 - 58.23) \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_9) = 27.32 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_9) = 27.23$$

$$M_{T_{10} i} = 27.32 \operatorname{sen} (\alpha + \varphi_{10}) = 27.32$$

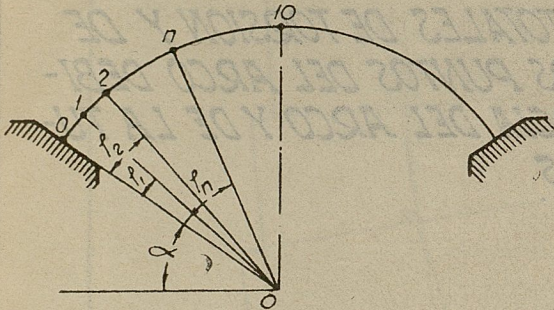


TABLA IV

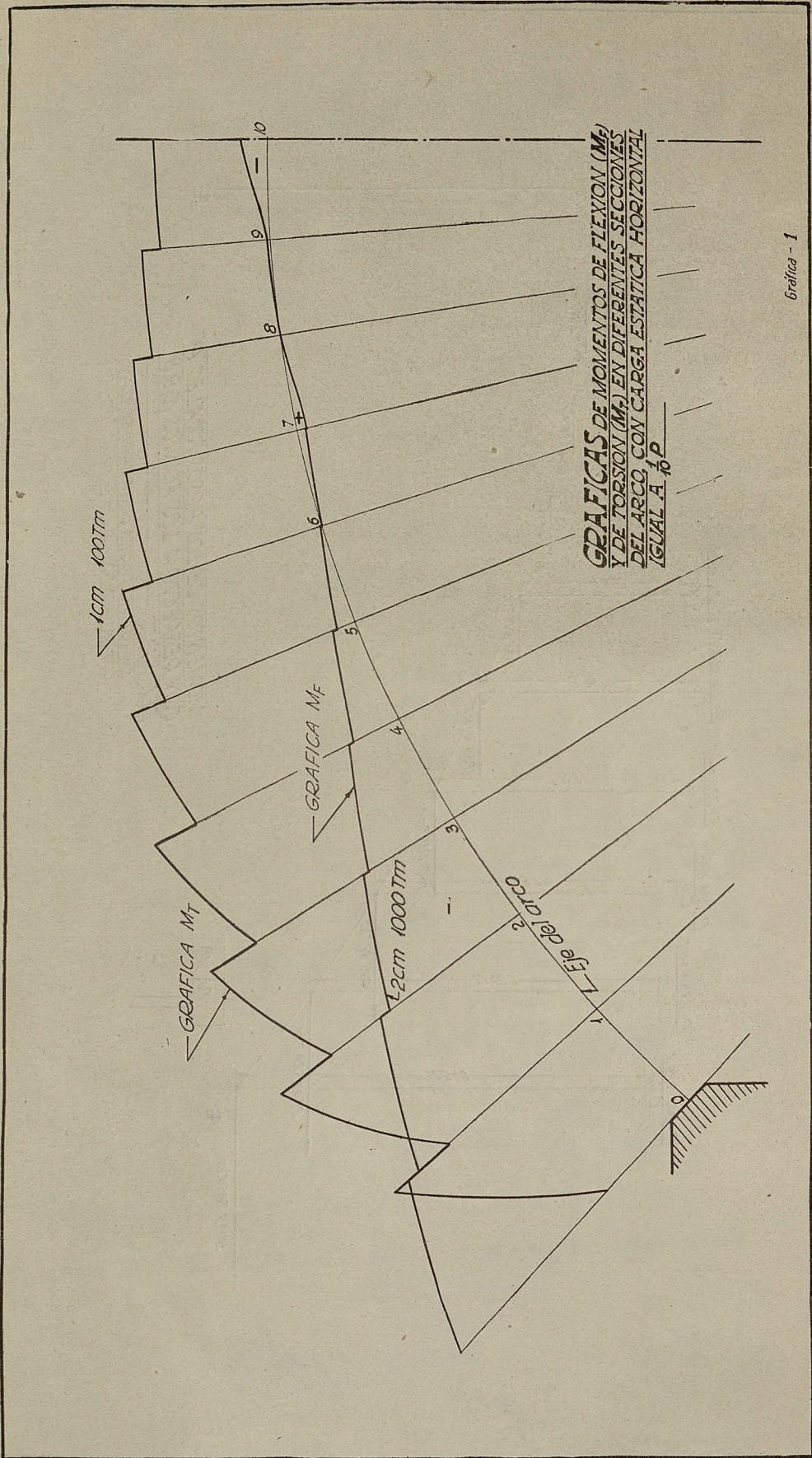
CALCULO DE LOS MOMENTOS DE FLEXION \$M_F''\$ EN DIVERSOS PUNTOS DEL ARCO, DEBIDOS A LOS MOMENTOS DE LAS FUERZAS DE INERCIA DE LA TUBERIA, TRASMITIDOS AL ARCO POR LOS CABALLETES.

- $M'_{F_0} = -1366.7 \cos \alpha = -1023.6583 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_1 i} = -1366.7 \cos (\alpha + \phi_1) = -927.716 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_1 d} = -1063.13 \cos (\alpha + \phi_1) = -721.653 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_2 i} = -1063.13 \cos (\alpha + \phi_2) = -644.788 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_2 d} = -812.78 \cos (\alpha + \phi_2) = -492.951 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_3 i} = -812.78 \cos (\alpha + \phi_3) = -432.724 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_3 d} = -613.59 \cos (\alpha + \phi_3) = -326.68 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_4 i} = -613.59 \cos (\alpha + \phi_4) = -278.57 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_4 d} = -453.49 \cos (\alpha + \phi_4) = -205.884 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_5 i} = -453.49 \cos (\alpha + \phi_5) = -173.551 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_5 d} = -326.85 \cos (\alpha + \phi_5) = -125.085 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_6 i} = -326.85 \cos (\alpha + \phi_6) = -99.199 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_6 d} = -226.16 \cos (\alpha + \phi_6) = -68.639 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_7 i} = -226.16 \cos (\alpha + \phi_7) = -52.808 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_7 d} = -149.98 \cos (\alpha + \phi_7) = -35.020 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_8 i} = -149.98 \cos (\alpha + \phi_8) = -23.457 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_8 d} = -85.55 \cos (\alpha + \phi_8) = -13.38 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_9 i} = -85.55 \cos (\alpha + \phi_9) = -6.964 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_9 d} = -27.32 \cos (\alpha + \phi_9) = -2.224 \text{ Tm.}$
- $M'_{F_{10} i} = -27.32 \cos (\alpha + \phi_{10}) = 0$

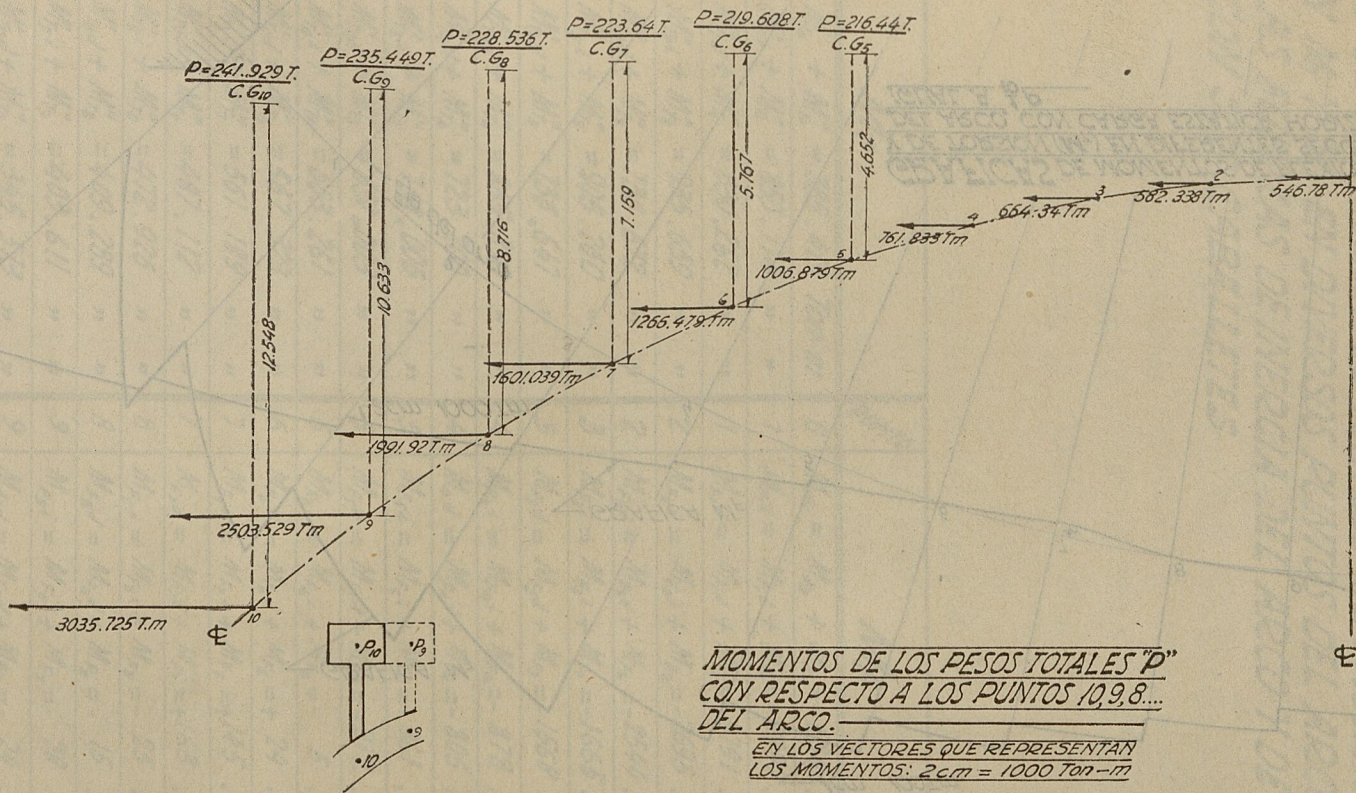
TABLA - V

CALCULO DE LOS MOMENTOS TOTALES DE TORSION Y DE FLEXION M_T Y M_F EN DIVERSOS PUNTOS DEL ARCO DEBIDOS A LAS FUERZAS DE INERCIA DEL ARCO Y DE LA TUBERIA CON SUS CABALLETES

| PUNTO | M_T | PUNTO | M_F |
|-------|---|-------|---|
| 0 | $M_{T_0} = M'_{T_0} + M''_{T_0} = 385.413 \text{ Ton-m}$ | 0 | $M_{F_0} = M_{F_2} + M_{F_0} = -5346.358 \text{ Ton-m}$ |
| 1 | $M_{T_1i} = M'_{T_1i} + M''_{T_1i} = 853.174 \text{ " "}$ | 1 | $M_{F_1i} = M_{F_1i} + M_{F_1} = -3997.893 \text{ " "}$ |
| 1 | $M_{T_1d} = M'_{T_1d} + M''_{T_1} = 630.262 \text{ " "}$ | 1 | $M_{F_1d} = M_{F_1d} + M_{F_1} = -3791.83 \text{ " "}$ |
| 2 | $M_{T_2i} = M'_{T_2i} + M''_{T_2} = 935.659 \text{ " "}$ | 2 | $M_{F_2i} = M_{F_2i} + M_{F_2} = -2696.572 \text{ " "}$ |
| 2 | $M_{T_2d} = M'_{T_2d} + M''_{T_2} = 736.672 \text{ " "}$ | 2 | $M_{F_2d} = M_{F_2d} + M_{F_2} = -2544.735 \text{ " "}$ |
| 3 | $M_{T_3i} = M'_{T_3i} + M''_{T_3} = 905.260 \text{ " "}$ | 3 | $M_{F_3i} = M_{F_3i} + M_{F_3} = -1665.644 \text{ " "}$ |
| 3 | $M_{T_3d} = M'_{T_3d} + M''_{T_3} = 736.647 \text{ " "}$ | 3 | $M_{F_3d} = M_{F_3d} + M_{F_3} = -1568.600 \text{ " "}$ |
| 4 | $M_{T_4i} = M'_{T_4i} + M''_{T_4} = 865.850 \text{ " "}$ | 4 | $M_{F_4i} = M_{F_4i} + M_{F_4} = -878.415 \text{ " "}$ |
| 4 | $M_{T_4d} = M'_{T_4d} + M''_{T_4} = 723.200 \text{ " "}$ | 4 | $M_{F_4d} = M_{F_4d} + M_{F_4} = -805.729 \text{ " "}$ |
| 5 | $M_{T_5i} = M'_{T_5i} + M''_{T_5} = 768.005 \text{ " "}$ | 5 | $M_{F_5i} = M_{F_5i} + M_{F_5} = -361.138 \text{ " "}$ |
| 5 | $M_{T_5d} = M'_{T_5d} + M''_{T_5} = 651.003 \text{ " "}$ | 5 | $M_{F_5d} = M_{F_5d} + M_{F_5} = -312.672 \text{ " "}$ |
| 6 | $M_{T_6i} = M'_{T_6i} + M''_{T_6} = 663.261 \text{ " "}$ | 6 | $M_{F_6i} = M_{F_6i} + M_{F_6} = -5.976 \text{ " "}$ |
| 6 | $M_{T_6d} = M'_{T_6d} + M''_{T_6} = 567.323 \text{ " "}$ | 6 | $M_{F_6d} = M_{F_6d} + M_{F_6} = +24.584 \text{ " "}$ |
| 7 | $M_{T_7i} = M'_{T_7i} + M''_{T_7} = 561.189 \text{ " "}$ | 7 | $M_{F_7i} = M_{F_7i} + M_{F_7} = +145.295 \text{ " "}$ |
| 7 | $M_{T_7d} = M'_{T_7d} + M''_{T_7} = 487.112 \text{ " "}$ | 7 | $M_{F_7d} = M_{F_7d} + M_{F_7} = +163.083 \text{ " "}$ |
| 8 | $M_{T_8i} = M'_{T_8i} + M''_{T_8} = 472.926 \text{ " "}$ | 8 | $M_{F_8i} = M_{F_8i} + M_{F_8} = -25.700 \text{ " "}$ |
| 8 | $M_{T_8d} = M'_{T_8d} + M''_{T_8} = 409.289 \text{ " "}$ | 8 | $M_{F_8d} = M_{F_8d} + M_{F_8} = -15.623 \text{ " "}$ |
| 9 | $M_{T_9i} = M'_{T_9i} + M''_{T_9} = 403.611 \text{ " "}$ | 9 | $M_{F_9i} = M_{F_9i} + M_{F_9} = -28.817 \text{ " "}$ |
| 9 | $M_{T_9d} = M'_{T_9d} + M''_{T_9} = 345.573 \text{ " "}$ | 9 | $M_{F_9d} = M_{F_9d} + M_{F_9} = -24.077 \text{ " "}$ |
| 10 | $M_{T_{10}} = M'_{T_{10}} + M''_{T_{10}} = 361.756 \text{ " "}$ | 10 | $M_{F_{10}} = M_{F_{10}} + M_{F_{10}} = -389.091 \text{ " "}$ |



Grafica - 1



Gráfica - 2