Projeto de um tunel para proteção de conduto

Vicente de Sá Barbosa Junior
Eng.º Estagiario — 3.ª Secção Técnica

O tunel foi calculado inicialmente para sistema "arco apoiado em estribos". Verificámos ser o projeto anti-economico, quanto á grande quantidade de concreto necessario.

Considerando concreto simples, o arco era obtido em condições bastante economicas, na razão de 17 cm. na chave e 25 cm. nos estribos. Em compensação, chegamos a verdadeiros massiços para os estribos, devido á condição de grande carga de terra e grandes empuxos laterais.

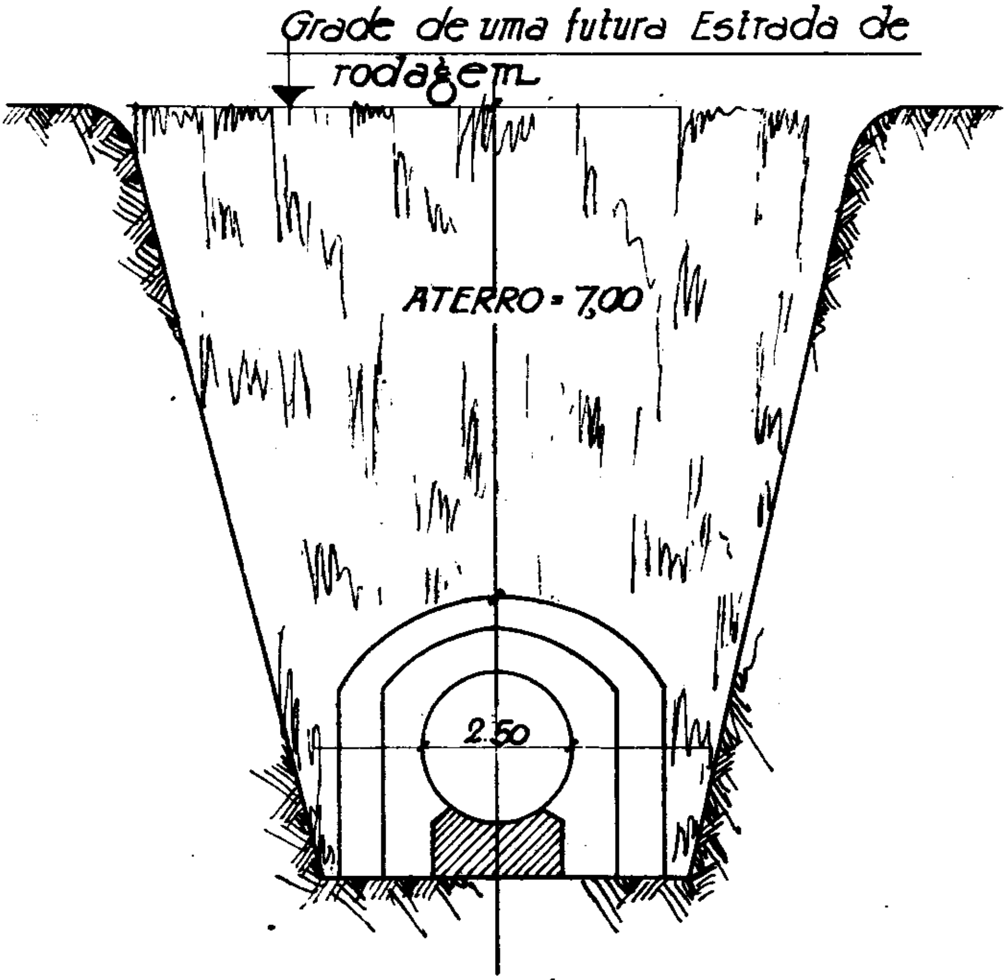


Fig. 1

Calculado em concreto armado e no mesmo sistema, obtivemos resultados mais vantajosos; mas, mesmo assim, pouco economicos.

Recorremos, então, a uma estrutura rigida e indeformavel, com momento de inercia variavel desde a chave até as sapatas. Baseamos o calculo na obra de R. Saliger (Editorial Labor. Barcelona), adaptando-lhe as formulas ás condições do problema. O calculo é baseado no trabalho de deformação.

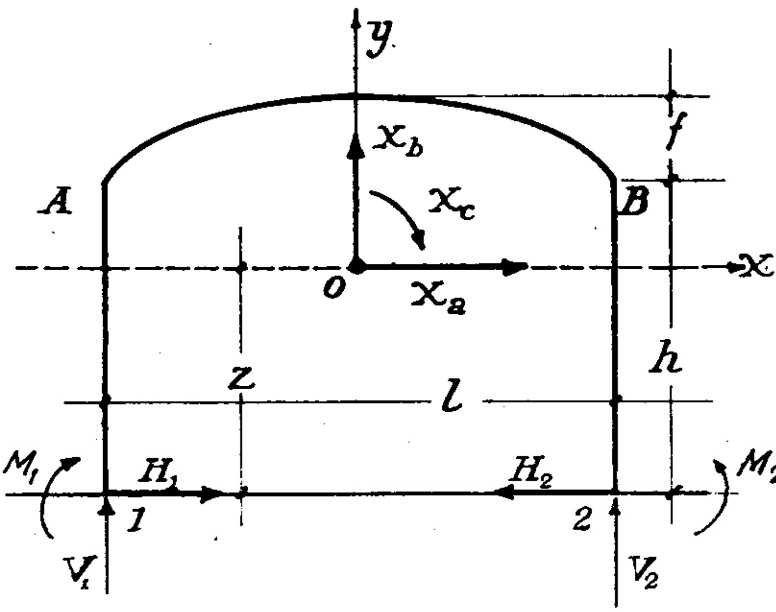


FIG. 2

As grandezas hiperestaticas, seguindo o processo de Schönhöfer que usa valôres fixos: $\frac{s}{J} = s'$, resultam:

$$X_a = \frac{\Sigma \mathfrak{M}\, y + \frac{1}{s'}\, E\, w\, t\, l}{\Sigma y^2}$$

$$X_b = \frac{\Sigma\, \mathfrak{M}\, x}{\Sigma\, x^2}$$

$$X_c = -\, \frac{\Sigma\, \mathfrak{M} + \frac{1}{s'}\, E\, w\, \Delta\, t\, \Sigma\, s''}{n}$$

$\mathfrak{M}$ = Momento fletor.
E = Coeficiente de elasticidade.
s' = peso elastico.
s'' = relação de espessura para comprimento do elemento de arco.

t = acrecimo de temperatura.
w = pressão unitaria devido á variação de temperatura.
n = numero de elementos de arco.

Momento em qualquer secção:

$$M = \mathfrak{M} - X_a\, y - X_b\, x + X_c$$

x mt	y mt
0	0
0,4	0,36
0,8	0,64
1,0	0,75
1,2	0,84
1,6	0,96
2,0	1,00

Quadro I

Coordenadas do arco A B

Usando a formula da parabola

$$y = \frac{4f}{l^2}\,(lx - x^2),$$

determinamos os valôres das coordenadas, cujos resultados encontramos no quadro abaixo.

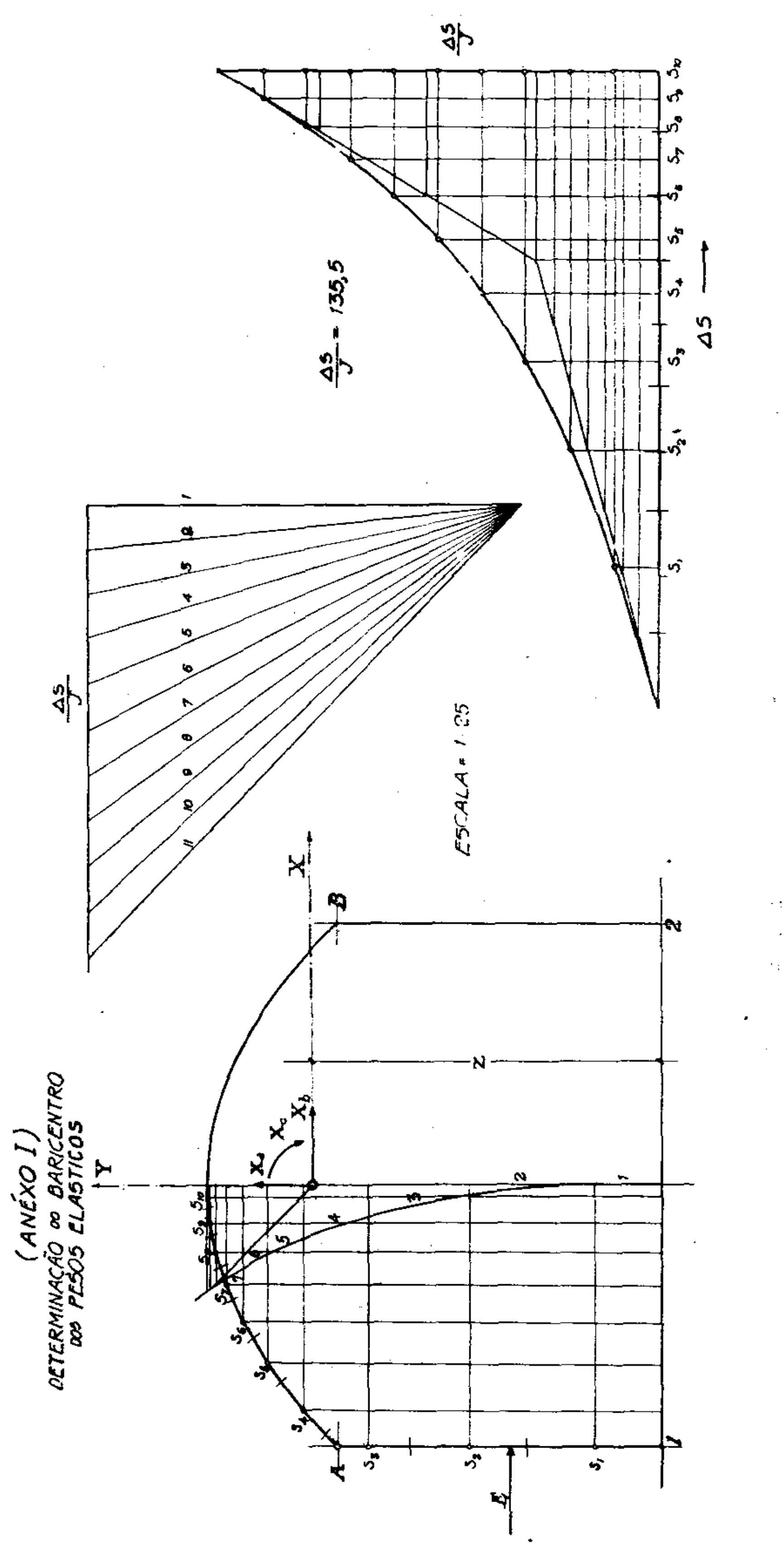
f = flexa = 1 mt.
l = vão = 4 mt.

Dividimos o portal em 20 segmentos de igual peso elastico, considerando 26 cms. na chave e 46 cms. ao encontrar a sapata. A divisão em elementos de igual peso elastico efetuamos pelo metodo de Schönhöfer. Por meio de um poligono funicular obtivemos o baricentro dos pesos elasticos.

Coordenadas referidas ao baricentro elastico

SECÇÃO	y' mts	$y = y' - z$, $z = 2,70$	y^2	z	z^2	s	$d = f'$ mts	$J = \frac{bd^3}{12}$	$s'' = \frac{s}{d}$
1	0,523	-2,177	4,7200	2,000	4,000	1,045	0,453	0,00770	2,310
2	1,488	-1,212	1,4700	2,000	4,000	0,887	0,428	0,00655	2,120
3	2,263	-0,437	0,1910	2,000	4,000	0,662	0,388	0,00488	1,701
4	2,770	+0,070	0,0049	1,725	2,970	0,520	0,359	0,00384	1,405
5	3,050	+0,350	0,1220	1,365	1,860	0,400	0,328	0,00295	1,220
6	3,240	+0,540	0,2820	1,050	1,102	0,336	0,310	0,00248	1,084
7	3,365	+0,665	0,4420	0,770	0,592	0,275	0,291	0,00203	0,945
8	3,430	+0,730	0,5320	0,510	0,260	0,250	0,281	0,00185	0,890
9	3,480	+0780	0,6100	0,300	0,090	0,220	0,269	0,00162	0,818
10	3,499	+0,799	0,6400	0,102	0,010	0,205	0,262	0,00151	0,783
Σ	27,108	+0,108	9,0139	—	18,884	4,800	—	—	13,321

Quadro II


(ANÉXO I)
DETERMINAÇÃO DO BARICENTRO DOS PESOS ELÁSTICOS
$\frac{\Delta S}{J} = 135,5$
ESCALA = 1 : 25

Ordenada do baricentro dos pesos elasticos

$$z = 2{,}70 \text{ mts.}$$

$$s' = \frac{\Delta s}{J} = 135{,}5 \text{ m}^{-3}$$

$$\frac{1}{2} \Sigma s = 10 \times 135{,}5 = 1355 \text{ m}^{-3}$$

Cargas permanentes

A carga que atúa sobre o portal é de 7 mts. de altura de terra (piçarra) (Fig. 1). Aplicamos a formula de Frühling que mais se adapta ao caso.

$$p' = \gamma\ B \left[\frac{5}{3} - \frac{(5 - t)^3}{75}\right]$$

γ = peso especifico da terra
B = largura
t = altura da camada de terra
p' = carga por m^2.

A formula de Frühling considera a carga constante para uma espessura de terra maior que 5 mts. Sendo o peso especifico da terra $\gamma = 1{,}6$ T/m³ e para 1 mt. de largura e 1 mt. corrido de arco, teremos:

$$p' = 1{,}6 \times 1{,}0 \times \frac{5}{3} = 2{,}67 \text{ T/mt}^2$$

Devido á pequena variação de espessura do arco, podemos, para o calculo de carga permanente, consideral-o com uma espessura média de 0,32 mt. E considerando tambem o seu desenvolvimento, teremos um peso por m^2 de projeção:

$$p'' = 0{,}40 \text{ mt} \times 2{,}4 \text{ T/m}^3 = 0{,}96 \text{ T/m}^2.$$

carga permanente: $p = p' + p'' = 2{,}67 + 0{,}96 = 3{,}63$ T/m².

Cargas moveis

A grande camada de terra absorverá os efeitos das cargas moveis.

Empuxo de terra

$$E = \frac{1}{2} \gamma\ H_1^2\ tg^2 \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$H_1^2 = (H^2 - h_1^2)$$

$$E = \frac{1}{2} \times 1{,}6 \times 46 \times tg^2\ 22°\ 30'$$

$$E = 6{,}30 \text{ T}$$

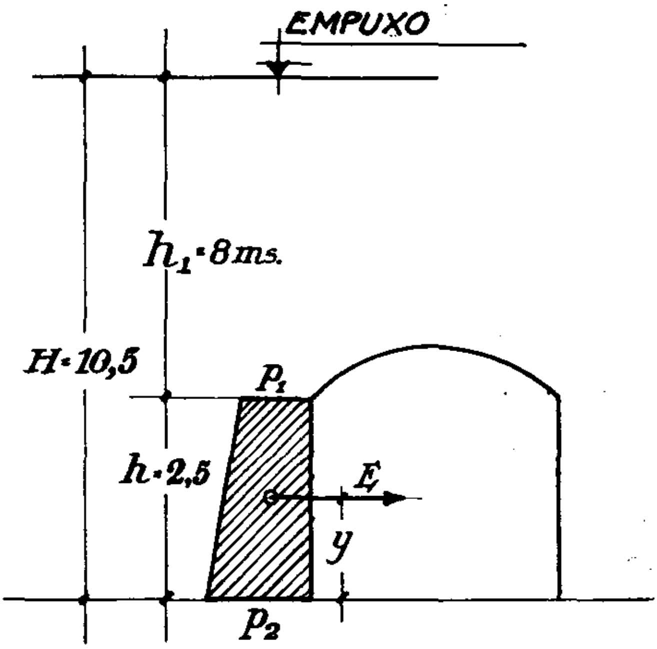


Fig 3

Ponto de aplicação da resultante:

$$y = \frac{h}{3}\left[\frac{2h_1 + H}{h_1 + H}\right] = 1{,}193 \text{ mts.}$$

$$E = 0{,}137\ H_1^2$$

$$p = \frac{dE}{dH} = 0{,}274\ H$$

$$p_1 = 8 \times 0{,}274 = 2{,}19 \text{ T/m}$$

$$p_2 = 10{,}5 \times 0{,}274 = 2{,}88 \text{ T/m.}$$

Podemos considerar com uma distribuição de carga retangular.

Caso A — Momentos fletores devido ás cargas permanentes

Considerámos o caso de carga da fig. 4. Os momentos $\mathfrak{M}$ foram obtidos graficamente e dados pelo quadro III.

$$\frac{1}{2}\Sigma\, y^2 = 9{,}014 \qquad \frac{1}{2}\Sigma\, x^2 = 18{,}884 \qquad \frac{1}{2}\, n = 10$$

Grandezas hiperestaticas:

$$X_a = \frac{\Sigma \mathfrak{M} y}{\Sigma y^2} = \frac{24{,}986}{9{,}014} = $$
$$= 2{,}50 \text{ T}$$

$$X_b = 0$$

$$X_c = -\frac{\Sigma \mathfrak{M}}{n} = -\frac{38{,}70}{10} = -$$
$$= -3{,}87 \text{ T. m.}$$

$$H_1 = X_a = 2{,}50 \text{ T}$$

$$V_1 = \frac{P}{2} = \frac{4 \times p}{2}$$

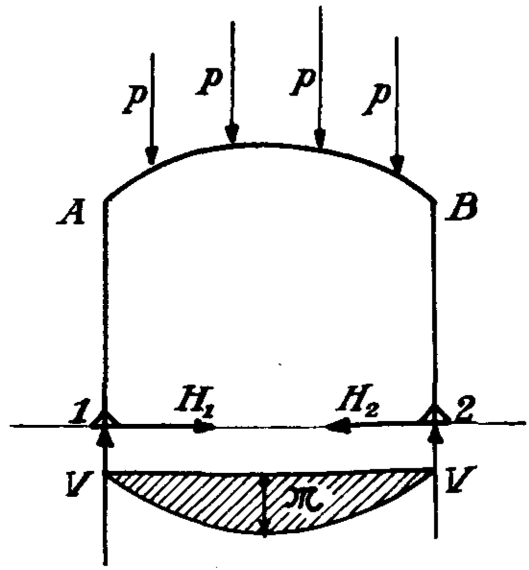


Fig. 4

Momentos nas diversas secções:

$$M_4' = \mathfrak{M}_4 - X_a y_4 + X_c = 1{,}80 - 25\,(0{,}070) - 3{,}87 = -2{,}25 \text{ T. M.}$$

$M_5' = -0{,}75$ T. M.	$M_8' = +1{,}11$ T. M.
$M_6' = +0{,}08$ » »	$M_9' = +1{,}38$ » »
$M_7' = +0{,}67$ » »	$M_{10}' = +1{,}54$ » »

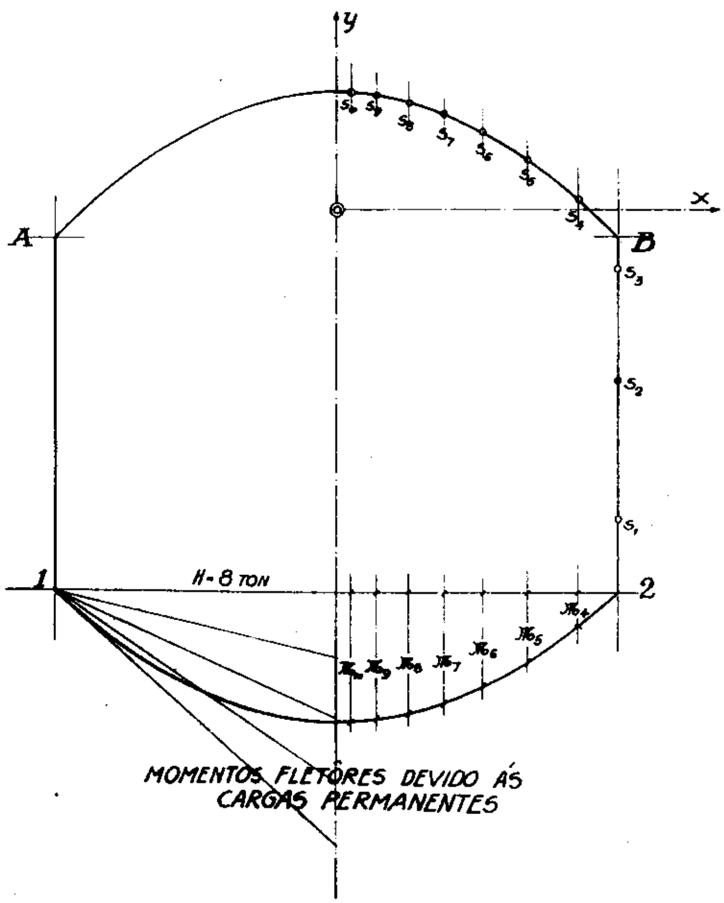
$$M_A = -X_a\, y_a + X_c = -25\,(-0{,}20) - 3{,}87 = -3{,}37 \text{ T. M.}$$

$$M_1 = M_2 = -X_a\, z + X_c = \div 25\,(-2{,}70) - 3{,}87 = 2{,}38 \text{ T. M.}$$

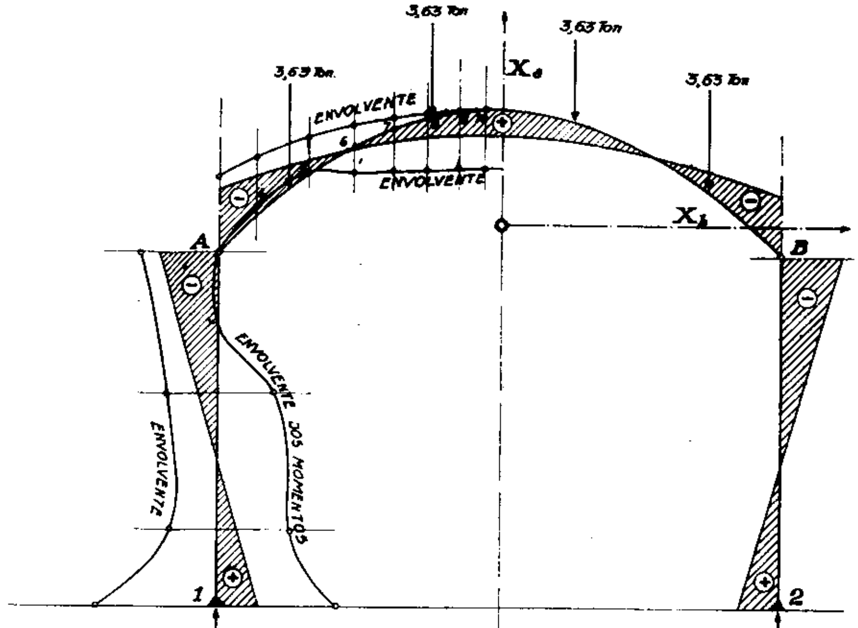
Quadro III

Elemento	$\mathfrak{M}$	y	$\mathfrak{M}\, y$
4	1.80	+0,070	0.126
5	4,00	+0,350	1.400
6	5,30	+0,540	2,860
7	6,20	+0,665	4,120
8	6,80	+0,730	4,960
9	7.20	+0,780	5,610
10	7.40	+0,799	5,910
1/2 Σ	38,70		24,986

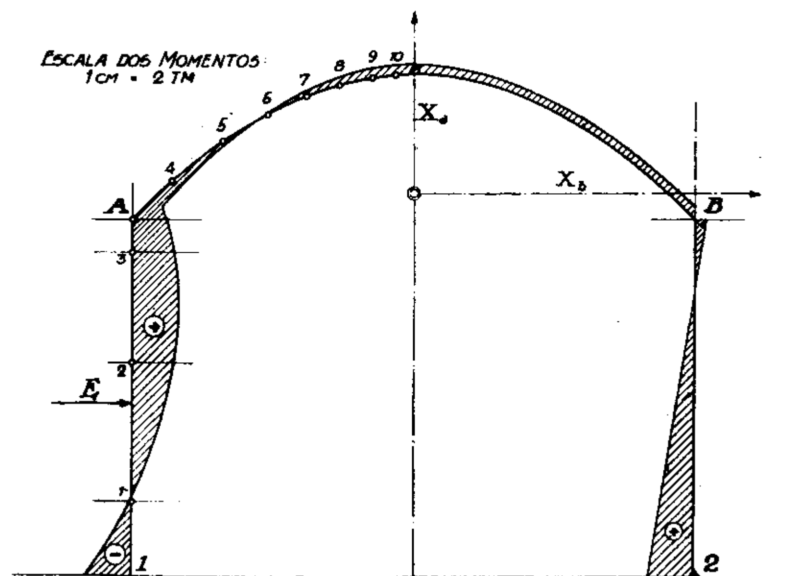
DIAGRAMA DOS MOMENTOS



MOMENTOS FLETÔRES DEVIDO ÁS CARGAS PERMANENTES



CARGA PERMANENTE
(CASO A)



EMPUXO DE TERRA
(CASO B)

Caso B — Momento fletor devido ao empuxo de terra

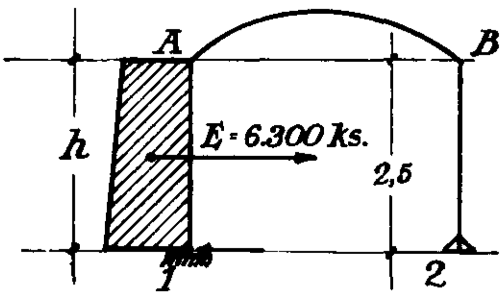


Fig. 5

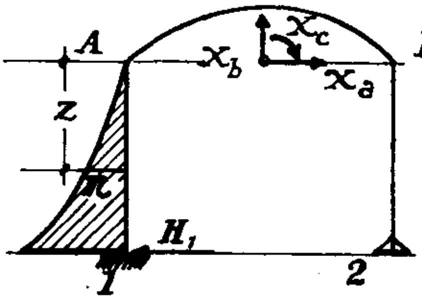


Fig. 6

Damos abaixo um quadro dos momentos fletores calculados.

$$\mathfrak{M} = -\frac{1}{2}\, q\, z^2$$

$$q = \frac{E}{h} = \frac{6{,}3 \text{ T}}{2{,}5} = 2{,}52 \text{ T/M.}$$

$$H = -qh = -1{,}26 \times 2{,}5$$

$$H = -3{,}15 \text{ T}$$

$$H_a = \frac{12{,}296}{9{,}014} = +1{,}36 \text{ T}$$

$$X_b = \frac{-12{,}32}{18{,}884} = -0{,}65 \text{ T}$$

$$X_c = \frac{-6{,}261}{10} \cong 0{,}63 \text{ T. M.}$$

Quadro IV

Elemento	z	$\mathfrak{M}$	y	x	$\mathfrak{M}\,y$	$\mathfrak{M}\,x$
1	1,98	-4,940	-2,177	+2,00	+10,730	-9,88
2	1,00	-1,260	-1,212	+2,00	+1,540	-2,32
3	0,22	-0,061	-0,437	+2,00	+0,026	-0,12
Σ	~	-6,261	~		+12,296	-12,32

Momentos nas Secções

$$M_1' = \mathfrak{M} - X_a y - X_b + X_c$$

$$M_1' = -4{,}94 - 1{,}36\,(-2{,}177) + 0{,}65\,(2{,}00) + 0{,}63 = -0{,}05 \text{ T.M.}$$

$M_2' = +\ 2{,}32$ T. M.
$M_3' = +\ 2{,}47$ »
$M_A = +\ 2{,}90$ »
$M_1 = -\ 2{,}55$ »
$M_2 = +\ 2{,}73$ »
$M_B = -\ 0{,}398$ »

$H_1 = H_A + X_a = -\ 1{,}79$ T. M.

$V_1 = -\ V_2 = X_b$

$H_2 = E - H_1 = 4{,}51$ T. M.

Caso C — Momentos devidos à variação de temperatura

Calculámos para uma temperatura $t = \pm\ 10^\circ c$ e um acrecimo $\Delta\, t = \pm\ 5^\circ c$.

As grandezas hyperestaticas serão:

$$X_a = \frac{\frac{1}{s'}\ E\ w\ t\ l}{\Sigma\ y^2} = \frac{\frac{1}{135.5} \times 20 \times 10 \times 4}{9.014} = \pm\ 0{,}655 \text{ T.}$$

considerando $E = 2 \times 10^6$ $w = 10^{-5}$
$E\ w = 20$ $l = 4$ mts.

$$X_c = \frac{\frac{1}{s'}\ E\, w\ \Delta\ t\ \Sigma\ s''}{n} = \frac{\frac{1}{135{,}5} \times 20 \times 5 \times 13{,}32}{20} = \mp 0{,}497 \text{ T.M.}$$

Donde

$M_1 = -\ X_a\ y = -\ [\pm\ 0{,}655\ (-\ 2{,}7)] = \pm\ 1{,}77$ T. M.

$M_A = \pm\ 0{,}13$ T. M.

$M_s = \mp\ 0{,}52$ T. M.

Retração

Equivale a uma redução geral uniforme de $t = -\ 15^\circ c$.

$$X_a = -\ \frac{15}{10} \times 0{,}655 = -\ 0{,}982 \text{ T.}$$

$M_1 = X_a\ z = -\ 2{,}65$ $M_a = -\ 0.19$ $M_{chave} = 0{,}79$

A seguir damos um quadro dos momentos maximos e minimos provenientes do empuxo, temperatura e retração do conjunto.

Cargas verticais nas paredes:

a) Cargas permanentes — (reação vertical).

$$V_1 = \frac{pl}{2} = \frac{3{,}63 \times 4}{2} = 7{,}26 \text{ T.}$$

Quadro V

CARGAS EVENTUAES

Maximos e minimos momentos devidos ao empuxo, temperatura e retração do conjunto

				A	B	C	D	E				
Elementos	x	y		EMPUXO		Variação termica		Retração	Momentos maximos		Momentos minimos	
				Esquerda	Direita	$\pm t\ 10°$	$\pm \Delta t\ 5°$	$t = -15°$	Casos	Total	Casos	Total
Engastamento (1)	2,000	-2,700		-2.55	+2.73	± 1.77	∓ 0,50	-2.65	B+C	+4.50	A+C+E	-6.97
1	2,000	-2,177		-0,05	+1.70	± 1.42	〃	-2,14	B+C	+3,12	A+C+E	-3,61
2	2,000	-1,212		+2.32	+0,30	± 0,80	〃	-1,19	A+C	+3,12	C+E	-1,99
3	2,000	-0,437		+2.47	-0.39	± 0,29	〃	-0,43	A-D	+2.97	B+C+E	-1,11
A	2,000	-0,200		+2.19	-0.40	± 0.13	〃	-0,19	A-D	+2.69	B+C+E	-0,72
4	1,725	+0,070		+0,84	-0,41	∓ 0,05	〃	+0,07	A-C-D+E	+1,46	B+C+D	-0,96
5	1,365	+0,350		+0,16	-0,42	∓ 0,23	〃	+0,34	A-C-D+E	+1.23	B+C+D	-1.15
6	1,050	+0,540		+0,04	-0,43	∓ 0,35	〃	+0,53	A-C-D+E	+1.42	B+C+D	-1,28
7	0,710	+0,665		-0,22	-0.44	∓ 0.44	〃	+0,65	-C-D+E	+1.59	B+C+D	-1.38
8	0,510	+0,730		-0.40	-0,45	∓ 0,48	〃	+0.72	-C-D+E	+1,70	B+C+D	-1,43
9	0,300	+0,780		-0,44	-0,45	∓ 0,51	〃	+0.77	-C-D+E	+1,78	B+C+D	-1,46
10	0,102	+0,799		-0,45	-0,46	∓ 0,52	〃	+0,78	-C-D+E	+1,80	B+C+D	-1,48
S (chave)	0,000	+0,800		-0,46	-0,46	∓ 0,52	〃	+0,79	-C-D+E	+1,81	B+C+D	-1,48
			H_1	-1,79	+4,51	± 0,655	0	-0,982				
			V_1	-0,65	+0,65	0	0	0				

Reação horizontal total, considerando cargas permanentes e eventuais:

1) Maxima $H_1 = 2{,}50 + 4{,}51 + 0{,}655 = +7{,}665$ T.

2) Minima $H_1 = 2{,}50 - 1{,}79 - 0{,}655 = +0{,}055$ T.

Esforços normais nas Secções

Secções 10-9-8-7-6-5-4 $N' = V_1 = 7{,}26$ T.

Secção 3: $N_3' = V_1 +$ peso do elemento 3.

$N_3' = 7{,}26 + (0{,}25\ \text{mt} \times 0{,}39\ \text{mt} \times 1{,}0\ \text{mt})\ 2{,}4\ \text{T/m}^3 = 7{,}49$ T.

Secção 2: $N_2' = N_3 +$ peso do elemento 2.

$N_2' = 7{,}49 + (0{,}78 \times 0{,}42 \times 1{,}0)\ 2{,}4 = 8{,}27$ T.

Secção 1: $N_1' = N_2 +$ peso do elemento 1.

$N_1' = 8{,}27 + (0{,}97 \times 0{,}45 \times 1{,}0)\ 2{,}4 = 9{,}32$ T.

Engastamento

$N_1 = 9{,}32 + (0{,}52 \times 0{,}46 \times 1{,}0)\ 2{,}4 - X_b$

$N_1 = 9{,}32 + 0{,}69 + 0{,}65 = 10{,}66$ T.

Calculo da Resultante

Momento total em 1 ou 2 devido ás cargas permanentes e empuxo.

$$M_t = 2{,}38 + 2{,}73 = 5{,}11 \quad \text{T. M.}$$

Esforço normal $\qquad N_{1max} = 10{,}66$ T.

» $\quad$ horizontal $\qquad H_{1max} = 7{,}665$ T.

Teremos para a resultante

$$R = \sqrt{N_1^2 + H_{1max}} = 13{,}12 \text{ T.}$$

E a excentricidade será: $e = \frac{M}{R} = \frac{5{,}11}{13{,}12} = 0{,}39$ mt.

Com este quadro calculámos a ferragem.

Quadro VI

MOMENTOS TOTAES								
Elementos	Cargas aventuais max M	Cargas aventuais min N	Cargas permanentes M	Momentos total maximo M	Esforço normal N	Largura a	Excentricidade $L = \frac{M}{N}$	Extensão b
Engast. 1	+ 4,50	- 6,97	+ 2.38	- 6.97	10,66	0,46	65,4	1,00
1	+ 3,12	- 3.61	+ 1.00	+ 4.12	9.32	0.45	44,2	"
2	+ 3.12	- 1.99	+ 1.10	+ 3.12	8,27	0,43	37.7	"
3	+ 2.97	- 1.11	- 3,00	- 4.11	7.49	0,39	55,0	"
A	+ 2.69	- 0.72	- 3.37	- 4.09	7.26	0,38	56,2	"
4	+ 1,46	- 0,96	- 2.25	- 3,21	7.26	0.36	44,2	"
5	+ 1.23	- 1.15	- 0.75	- 1.90	7.26	0,33	26,2	"
6	+ 1.42	- 1.28	+ 0.08	+ 1.50	7,26	0,31	20,6	"
7	+ 1.59	- 1.38	+ 0.67	+ 2.26	7,26	0,29	31.2	"
8	+ 1,70	- 1.43	+ 1.11	+ 2.81	7,26	0.28	38,7	"
9	+ 1.78	- 1.46	+ 1.38	+ 3.16	7,26	0,27	43,5	"
10	+ 1.80	- 1.48	+ 1.54	+ 3,34	7,26	0,26	46,0	"
Chave 5	+ 1.81	- 1,48	+ 1,55	+ 3.36	7.26	0,26	46,3	"

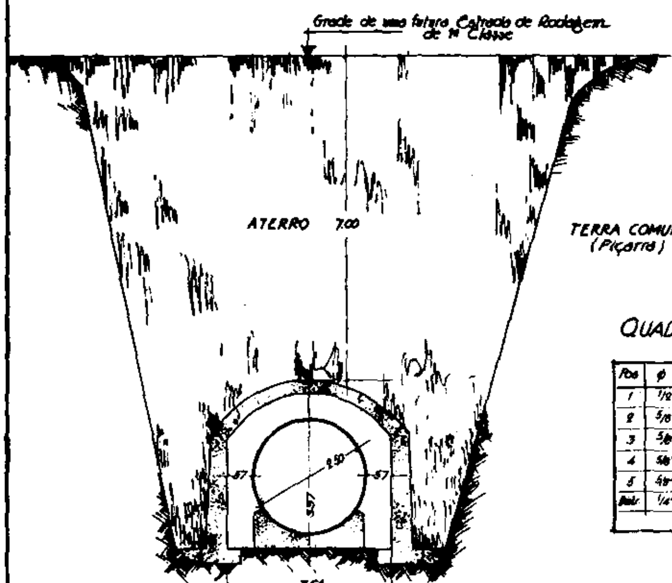
Ferragem

Calculámos á flexo-pressão. Os resultados estão na folha anexa.

R.A.E.
3ª S.T.

ADUTÔRA DO RIO CLARO

PROJÉTO DE UM TUNEL PARA PROTEÇÃO DE CONDÚTO

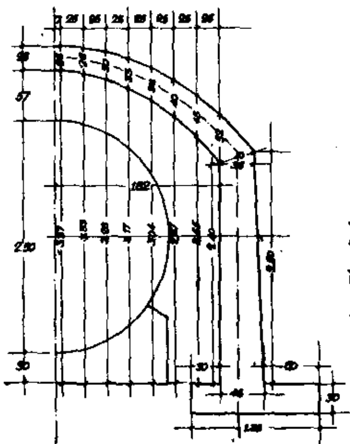


SECÇÃO DO CONJÚNTO
ESC. = 1:50

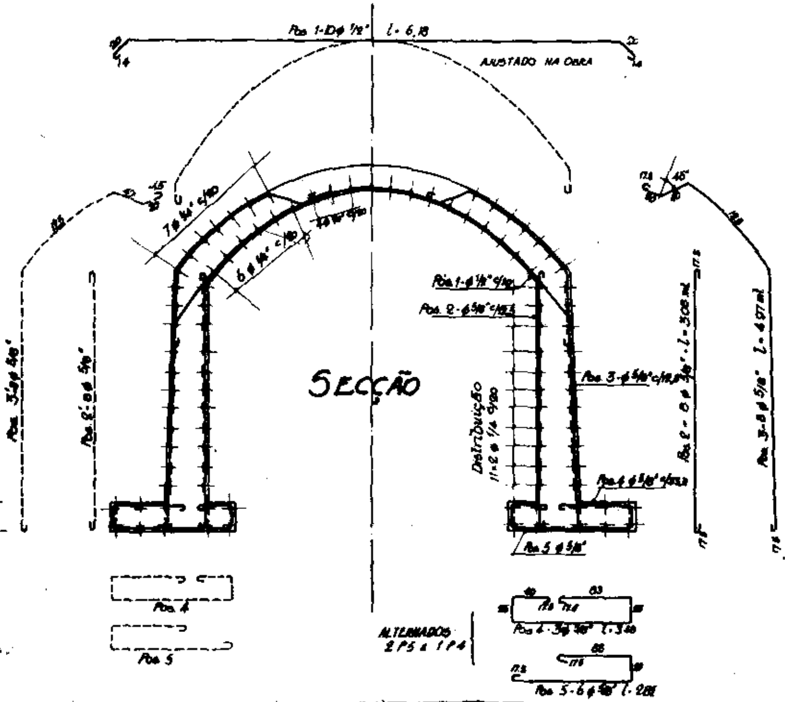
QUADRO DA FERRAGEM
POR METRO CORRIDO

Pos	ϕ	Quant	Comprimento Unit.	Comprimento Total	Peso Unit.	Peso Total
1	1/2"	10	6.18	61.80	6,110	61,100
2	5/16"	15	3.08	49.28	4,750	76,000
3	5/8"	16	4.97	79.52	7,680	123,000
4	5/16"	6	3.48	20.88	5,300	31,800
5	5/8"	12	2.82	33.84	4,350	58,200
Distr.	1/4"	97	1.00	97.00	0,247	23,950
					Peso Total =	372,050 kg

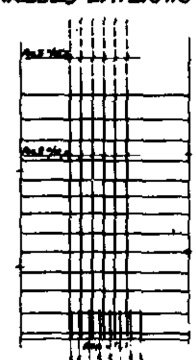
CONCRÉTO
VOLUME POR METRO CORRIDO = 4,44 m³
RELAÇÃO DE FERRO
POR METRO CUBICO DE CONCRÉTO 83,9 kg Fe/m³



ESC. = 1:25



FERRAGEM NAS PAREDES LATERAIS



DEPARTIÇÃO DE AGUAS E ESGOTOS DE SÃO PAULO
AD RIO CLARO
PROJ. TUNEL PARA PROTEÇÃO DO CONDUTO
ESCALA 1:50 e 1:25

Sapata

Considerámos a compressão maxima do terreno de 3 kgs./cm². Calculámos segundo a lei do triangulo.

Processo identico de calculo é encontrado no Boletim R. A. E. N.° 10 (fls. 124/132).

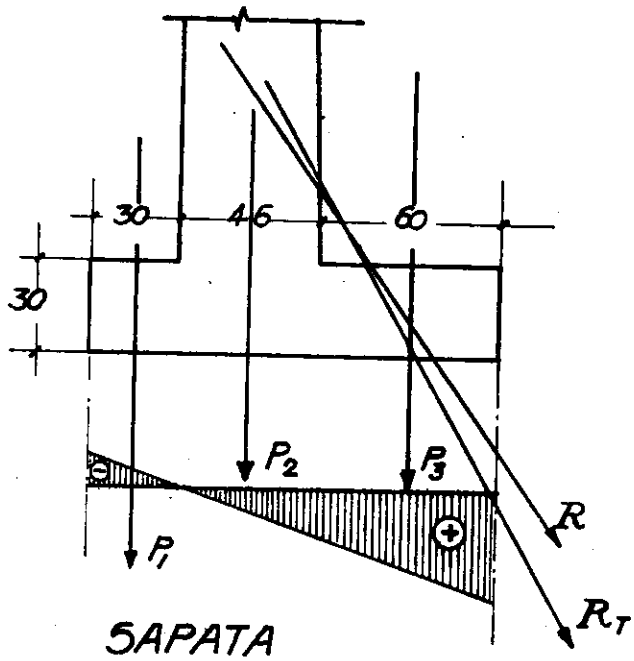


Fig 7