

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS DE
CONCRETO PARA O CASO DE EIXOS TANDEM TRIPLOS

Por:

Márcio Rocha Pitta (*)
Com a colaboração de
Marcos Dutra de Carvalho (**)

Trabalho apresentado à XIV
Reunião Anual da Associação
Brasileira de Pavimentação,
em João Pessoa (PB)

4 a 8/9/1978

Associação Brasileira de Cimento Portland
SAO PAULO / SP

(*) Engenheiro Assessor de Pavimentação, ABCP, SP
(**) Engenheiro Auxiliar, ABCP, SP

R E S U M O

A significativa frequência de eixos tandem triplos na composição da frota rodoviária de carga, em nosso País, obriga à consideração da influência que exercem sobre os pavimentos a eles submetidos. Não são públicos, até o momento, processos que permitam determinar, com a necessária segurança, a equivalência entre as solicitações deles advindas e as solicitações de um eixo simples padrão, nem existem, no caso de pavimentos de concreto, ábacos que conduzam ao relacionamento entre suas cargas e as tensões de tração na flexão que provocam na placa. Este trabalho pretende solucionar a questão para os pavimentos rígidos, quando aplicadas as fórmulas de Westergaard para a tensão na fibra inferior ao longo de um bordo ou de uma junta de uma placa de concreto, sem transferência de carga — ou seja, de acordo com o mesmo enfoque tomado por Pickett e Ray no cálculo e traçado dos ábacos que compõem o atual método de dimensionamento da Portland Cement Association.

O ábaco finalmente apresentado tem, por uma questão de coerência, respeito ao trabalho anterior e facilidade de traçado, a mesma forma e duas das quatro escalas idênticas às dos ábacos da PCA para os casos de eixos simples e tandem duplos, e tem sido empregado em dimensionamentos de pavimentos de concreto efetuados pela ABCP desde fins de 1977.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	pág.
1. INTRODUÇÃO	4
2. DESCRIÇÃO SUCINTA DAS HIPÓTESES FUNDAMENTAIS	4
3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE CÁLCULO E DE TRAÇADO DO ÁBACO .	7
4. EXEMPLOS ELUCIDATIVOS DO EMPREGO DO ÁBACO	15
5. BIBLIOGRAFIA	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figº nº	pág.
1. POSIÇÃO ESQUEMÁTICA DE CARREGAMENTO PARA O CÁLCULO DAS TENSÕES	6
2. CARTA DE INFLUÊNCIA Nº 6, DE PICKETT-RAY	8
3. ESQUEMA TEÓRICO REDUZIDO DO EIXO TANDEM TRIPLO TEÓRICO.	9
4. SUPERFÍCIES TEÓRICAS DE CONTACTO APOSTAS À CARTA DE INFLUÊNCIA Nº 6	10
5. DIMENSÕES DO EIXO TANDEM TRIPLO E DAS SUPERFÍCIES DE CONTACTO UTILIZADAS NOS CÁLCULOS	12
6. CONFIGURAÇÃO DO EIXO TANDEM TRIPLO CONFORME UTILIZADO NA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES PARA $P = 35 \text{ t}$, $K = 5,0 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ e $h = 20,0 \text{ cm}$	14
7. ÁBACO PARA DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS DE CONCRETO (CASO DE EIXOS TANDEM TRIPLOS)	16
8. EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DO ÁBACO	17

1. INTRODUÇÃO

Uma questão que vem preocupando, de longa data, os estudiosos brasileiros do dimensionamento de pavimentos rodoviários é a inexistência de processos comprovados que permitam o estabelecimento de relações de equivalência entre as solicitações oriundas de eixos em tandem triplo e as do eixo simples padrão. No caso de pavimentos flexíveis, tem-se notícia de estudos a esse respeito nas áreas do DNER e da DERSA, ainda não dados a público até a data (*) em que é redigido este trabalho. Para pavimentos rodoviários rígidos, dimensionados pelo método da *Portland Cement Association (PCA)*, o problema começou a ser enfrentado pela *Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)*, em fins de 1976, com as primeiras tentativas de simplificação do processo de cálculo de tensões até então empregado: a aplicação das cartas de influência de Pickett-Ray. O resultado desses esforços é apresentado neste trabalho, sob a forma de um ábaco que, concebido à semelhança dos ábacos da PCA para eixos simples e tandem duplo, permite o dimensionamento de pavimentos de concreto simples submetidos à ação de veículos dotados de eixos tandem triplos, de significativa incidência na composição do tráfego comercial das rodovias nacionais.

2. DESCRIÇÃO SUCINTA DAS HIPÓTESES FUNDAMENTAIS

O método de dimensionamento preconizado pela PCA⁽⁷⁾ e pela ABCP⁽⁸⁾ para pavimentos de concreto simples fundamenta-se na análise das seguintes fontes:

- a) *estudos teóricos, à luz da teoria da elasticidade, sobre o comportamento de placas de concreto assentes em fundação natural e submetidas à ação de cargas uniformemente distribuídas numa área limitada, executados principalmente por WESTERGAARD (1a⁶);*
- b) *ensaios de laboratório e em modelos, conduzidos pelo Bureau of Public Roads e pela PCA;*
- c) *resultados de pistas experimentais, como as de Bates, Arlington, Maryland e AASHO;*
- d) *observação sistemática de pavimentos em serviço.*

(*) Junho de 1978

A teoria desenvolvida por Westergaard para o cálculo das tensões solicitantes — base racional do método de dimensionamento — é, por seu turno, instruída pelas seguintes hipóteses:

- a) a placa de concreto tem comportamento elástico, dentro das condições normais de atuação e para valores constantes do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do concreto;
- b) a espessura da placa é uniforme e constante, e o seu tamanho é suficiente para tornar significativa a distância entre juntas ou bordos;
- c) a placa é considerada íntegra, ou seja, não fissurada, quando do carregamento teórico;
- d) a placa assenta completamente sobre uma fundação isotrópica e homogênea;
- e) em cada ponto da fundação, a reação é uma pressão vertical diretamente proporcional à deformação, sendo a constante de proporcionalidade o módulo de reação, ou coeficiente de recalque k .

Por razões já conhecidas e explanadas em outros trabalhos ^(7,8) a posição de carga considerada pelo método de cálculo da PCA é aquela configurada pela tangência dos pneumáticos de um dos eixos (simples ou não) solicitantes em relação à junta transversal (V. fig. n.º 1).

A equação fundamental de Westergaard para a deformação ⁽⁶⁾, no caso de carga concentrada atuando no bordo (ou junta transversal) de uma placa de concreto assente sobre a fundação previamente descrita (*líquido denso*), aplicada na equação 11 de Pickett e Ray ⁽⁹⁾ para o momento fletor nas mesmas condições, e substituída a carga concentrada pela carga uniformemente distribuída fornece:

$$M = \frac{2q\ell^2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\gamma^2 \operatorname{sen} \frac{a}{2} \alpha \left[S(1 - \cos \frac{\beta b}{2} e^{-\gamma b/2}) - T \operatorname{sen} \frac{\beta b}{2} e^{-\gamma b/2} \right]}{\alpha (\beta^2 + \gamma^2) \left[1 + 4(1 - \mu) \alpha^2 \gamma^2 - (1 - \mu)^2 \alpha^4 \right]} d\alpha$$

onde:

q = carga uniformemente distribuída

$$l = \left(\frac{D}{k} \right)^{1/4} = \left[\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k} \right]^{1/4} \quad (\text{para fundação líquida denso})$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} = \text{rigidez da placa}$$

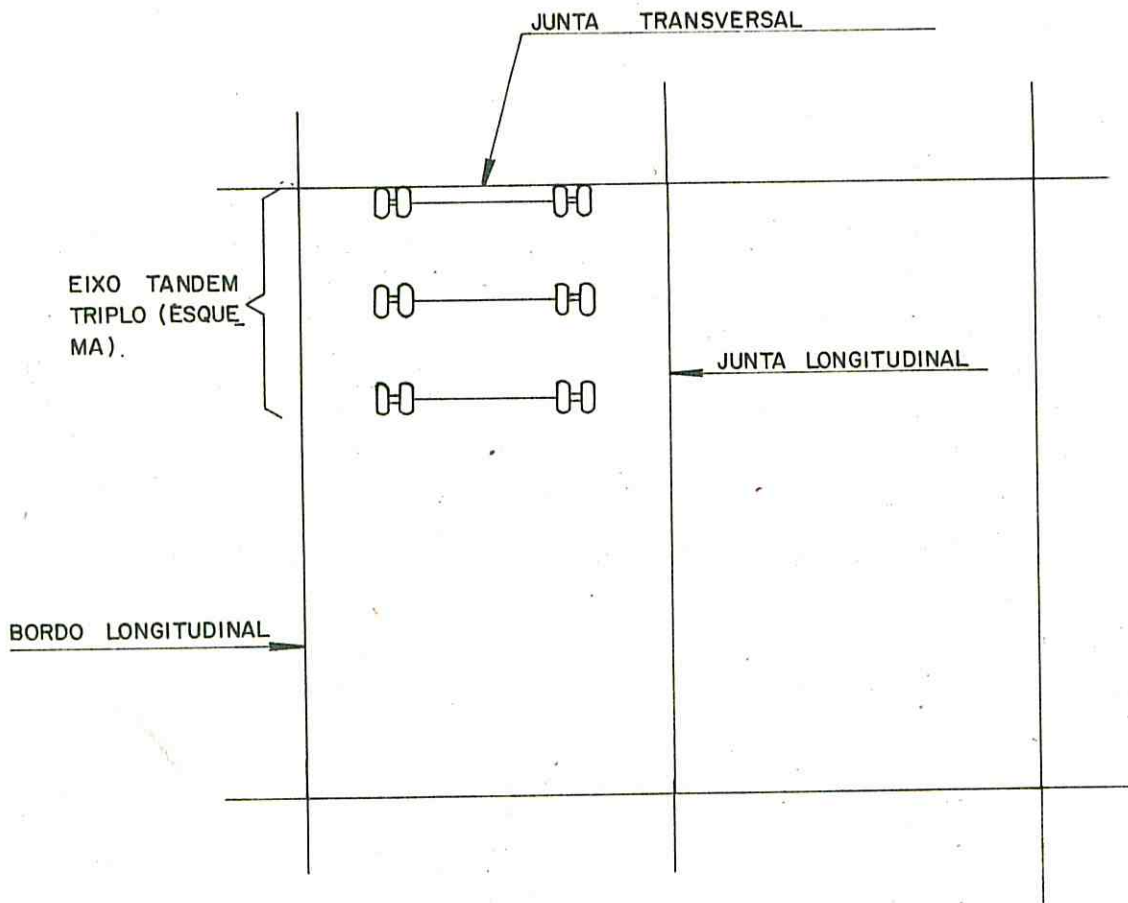


FIG. 1 POSIÇÃO ESQUEMÁTICA DE CÁLCULO.

E = m\u00f3dulo de elasticidade do concreto

h = espessura da placa

μ = coeficiente de Poisson de concreto (= 0,15)

k = coeficiente de recalque da funda\u00e7\u00e3o

$$\alpha = (\gamma^2 - \beta^2)^{1/2}$$

$$\beta = \left[\frac{(1+\alpha^4)^{1/2} - \alpha^2}{2} \right]^{1/2}$$

$$\gamma = \left[\frac{(1+\alpha^4)^{1/2} + \alpha^2}{2} \right]^{1/2}$$

a, b = semi-eixos da elipse representativa da \u00e1rea de contacto de um pneum\u00e1tico (a \u00e9 o semi-eixo paralelo \u00e0 junta ou ao bordo)

$$S = (1-\mu^2) \alpha^2 \left[1 + 2 (1-\mu) \alpha^2 \beta^2 \right]$$

$$T = (1-\mu^2) \alpha^2 \left[(1-\mu) \alpha^2 - 2\beta^2 \right]$$

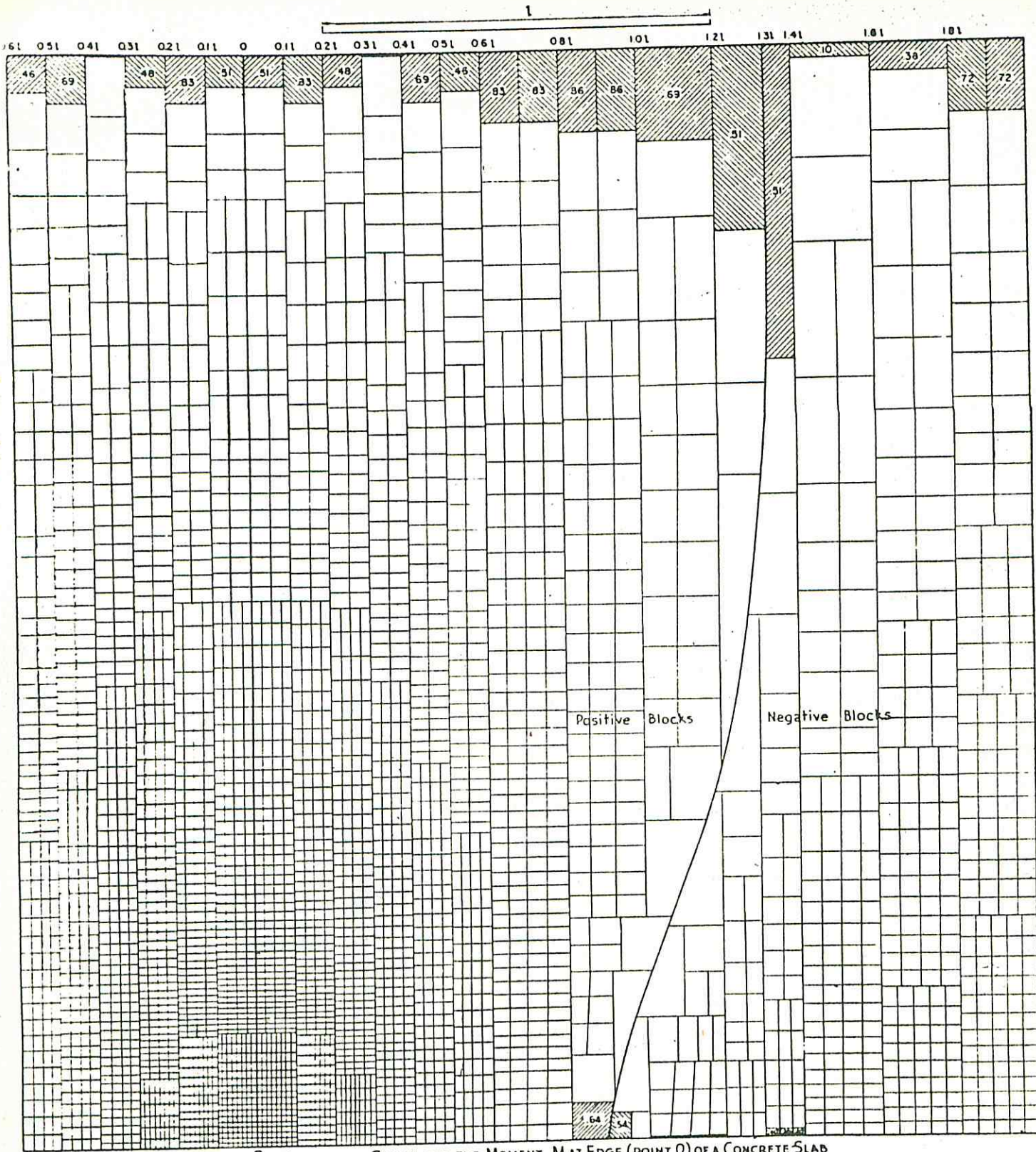
A partir dessa express\u00e3o, Pickett e Ray ⁽⁹⁾ desenvolveram a carta de influ\u00eancia n\u00b0 6 (V.fig.n\u00b02), que permite o c\u00e1lculo do momento fletor e da tens\u00e3o de tra\u00e7\u00e3o na flex\u00e3o sem o emprego direto da f\u00f3rmula, claramente de manejo complexo para o dia-a-dia do projetista de pavimentos de concreto.

3. DESCRI\u00c7\u00c3O DO PROCESSO DE C\u00c1LCULO E DE TRA\u00c7ADO DO \u00c1BACO

O \u00e1baco foi calculado de forma bastante artesanal, n\u00e3o tendo sido empregado o computador eletr\u00f4nico. O processo seguiu a linha comum adotada por Pickett e Ray quando da cria\u00e7\u00e3o dos \u00e1bacos para eixos simples e tandem duplos, a saber:

- 1) *desenho, em papel transparente, das superf\u00edcies de contacto dos pneus, numa escala apropriada (dependente da escala da carta de influ\u00eancia e do raio de rigidez relativa l do pavimento) (V.fig.n\u00b03);*
- 2) *aposi\u00e7\u00e3o do desenho sobre a carta de influ\u00eancia, de forma a obter a maior contagem positiva de blocos envolvidos pelas superf\u00edcies de contacto (N) (V.fig.n\u00b04);*
- 3) *c\u00e1lculo do momento fletor e da conseq\u00fcente tens\u00e3o de tra\u00e7\u00e3o na flex\u00e3o, pelas f\u00f3rmulas:*

$$M = \frac{q l^2 N}{10^4} \quad e \quad \sigma_{tf} = \frac{M}{h^2/6} \quad ;$$



0 INFLUENCE CHART FOR THE MOMENT AT EDGE (POINT 0) OF A CONCRETE SLAB
 DUE TO A LOAD IN THE VICINITY OF THE EDGE
 (Subgrade assumed to be a dense liquid. Poisson's ratio for pavement = 0.15)

fig. 2 Carta de influência nº 6, de Pickett - Ray, para o cálculo do momento fletor no bordo de uma placa de concreto devido a um carregamento próximo ao bordo. (desenho muito reduzido em relação ao original).

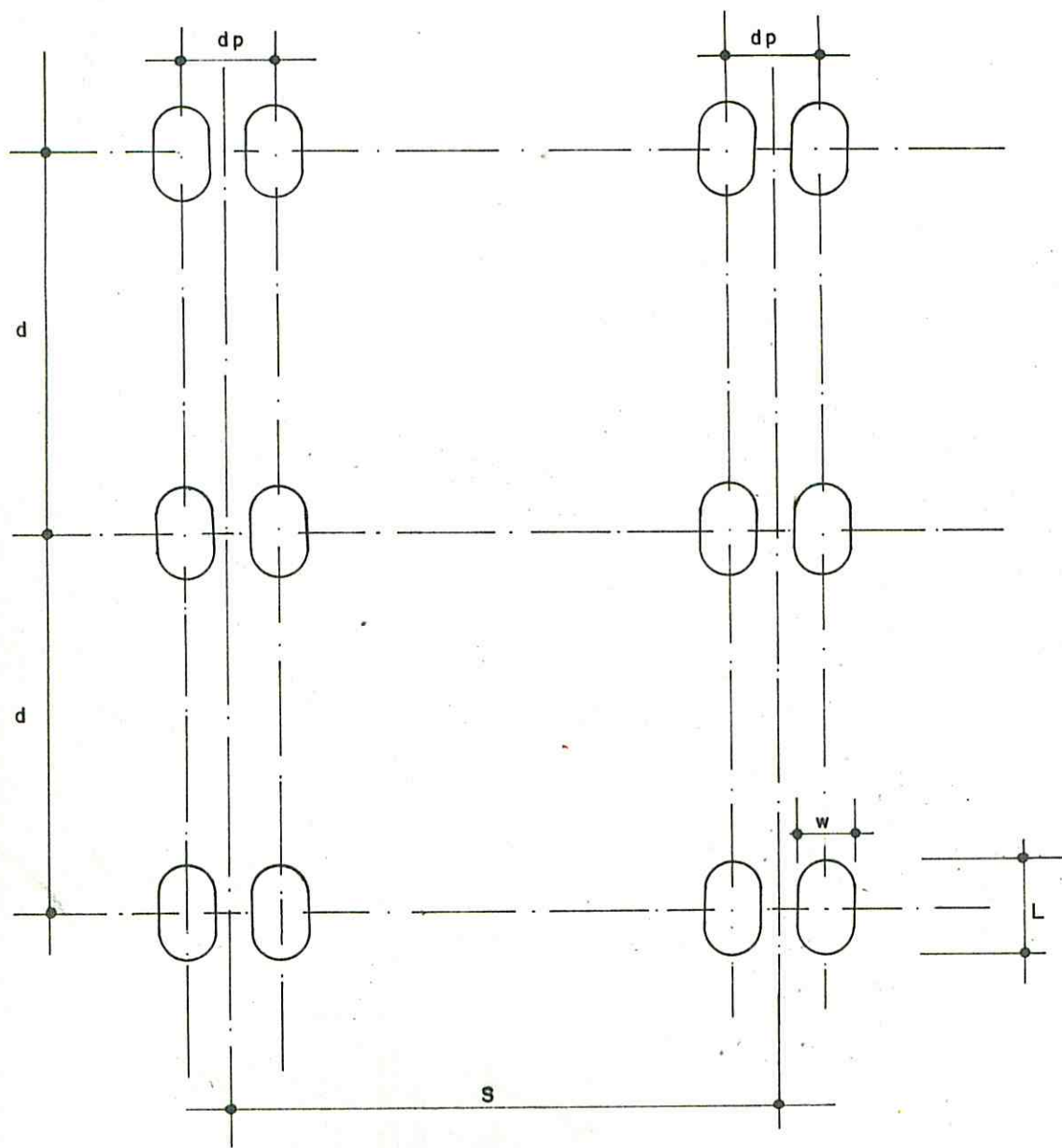


FIG. 3 ESQUEMA REDUZIDO DO EIXO TANDEM TRIPLO (DESENHO REDUZIDO EM RELAÇÃO AO TAMANHO NORMAL).

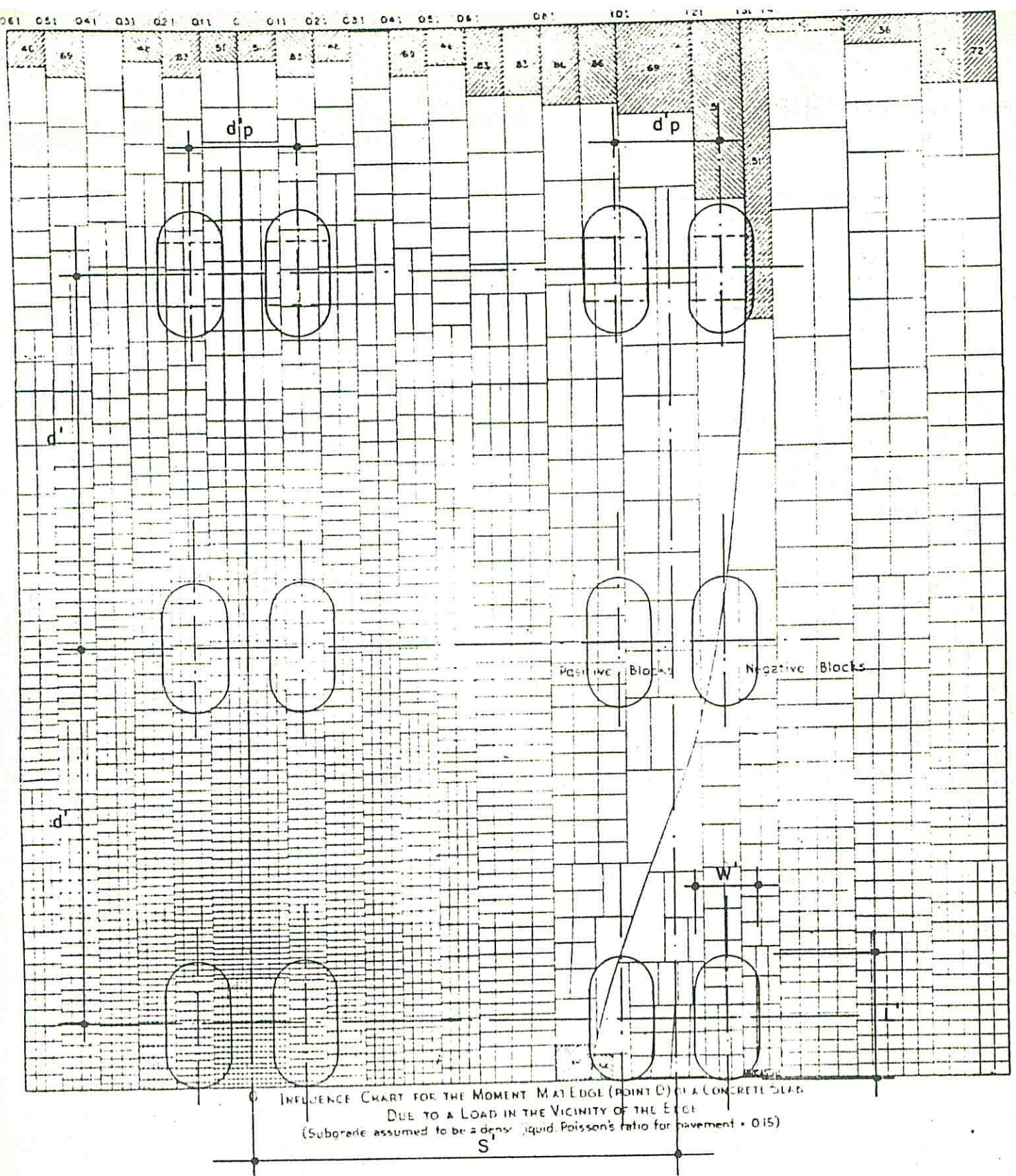


Fig. 4 Superfícies teóricas de contacto apostas à carta de influência nº 6 (desenho muito reduzido em relação ao original).

4) *locação do ponto obtido no âbaco-tentativa.*

As características do eixo tandem triplo examinado foram:

- . Cargas totais por eixo tandem triplo

$$9 \text{ t} \leq P \leq 50 \text{ t}$$

- . Pressão de contacto de pneumático (constante) 90 psi

$$q = 6,33 \text{ kgf/cm}^2$$

- . Comprimento de eixo, entre centros de rodas duplas (constante)

$$d = 180 \text{ cm}$$

- . Distância entre eixos (constante)

$$s = 125 \text{ cm}$$

- . Distância entre centros de pneus (constante)

$$d_p = 30 \text{ cm} \quad - \quad (\text{V. fig. n}^\circ 5)$$

Outras variáveis:

- . Coeficiente de recalque da fundação
 $1,4 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \leq K \leq 15,0 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$

- . Espessuras de placa

$$10 \text{ cm} \leq h \leq 30 \text{ cm}$$

A estratégia de cálculo seguida foi a de fixar valores de p e de k, variando h e, por conseguinte, determinando σ_{tf} .

Todos os cálculos foram executados para um módulo de elasticidade e um coeficiente de Poisson do concreto iguais, respectivamente, a $2,8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ e a 0,15.

A seguir, mostra-se um exemplo numérico real de cálculo, passo a passo.

$$P = 35.000 \text{ kgf}$$

$$k = 5,0 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$$

$$h = 20,0 \text{ cm}$$

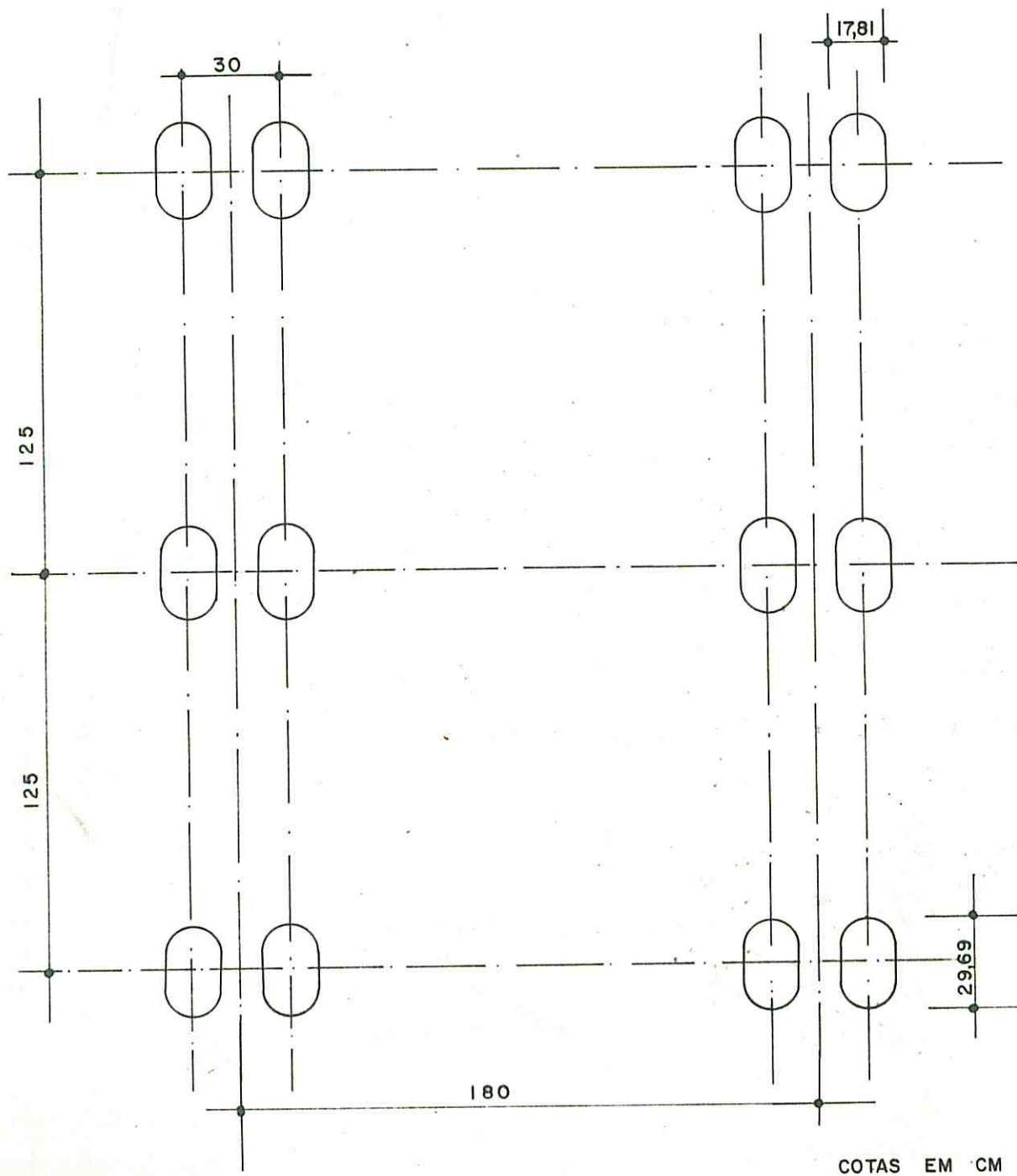


FIG. 5 DIMENSÕES DO EIXO TANDEM TRIPLO UTILIZADO NOS CÁLCULOS.

1º passo - Cálculo da área de contacto de pneumático

$$A = \frac{P}{3 \times 4} \div q' = \frac{35000}{3 \times 4 \times 6,33} \approx 461 \text{ cm}^2$$

2º passo - Cálculo das dimensões teóricas da área de contacto

(V.Fig.nº5)

$$\text{Comprimento: } L = \left(\frac{A}{0,5227} \right)^{1/2} = \left(\frac{461}{0,5227} \right)^{1/2} = 29,69 \text{ cm}$$

$$\text{Largura: } W = 0,6 \times L = 0,6 \times 29,69 = 17,81 \text{ cm}$$

3º passo - Cálculo do raio de rigidez relativa

$$l = \left[\frac{E h^3}{12(1 - \mu^2) k} \right]^{1/4}$$

$$l = \left[\frac{2,8 \times 10^5 \times 20,0^3}{12(1 - 0,15^2) 5,0} \right]^{1/4} = 78,61 \text{ cm}$$

4º passo - Cálculo da relação escalar

$$\phi = \frac{l \text{ carta de influência (*)}}{l}$$

$$\phi = \frac{25,4}{78,61} = 0,32$$

5º passo - Cálculo das dimensões para o desenho

$$\begin{array}{llll} L' & = & \phi L & \rightarrow & L' & = & 9,5 \text{ cm} \\ W' & = & \phi W & \rightarrow & W' & = & 5,7 \text{ cm} \\ d' & = & \phi d & \rightarrow & d' & = & 57,6 \text{ cm} \\ j' & = & \phi j & \rightarrow & j' & = & 40,0 \text{ cm} \\ d'_p & = & \phi d_p & \rightarrow & d'_p & = & 9,6 \text{ cm} \end{array}$$

(V.Fig.nº6)

(*) Medido na carta de influência nº 6

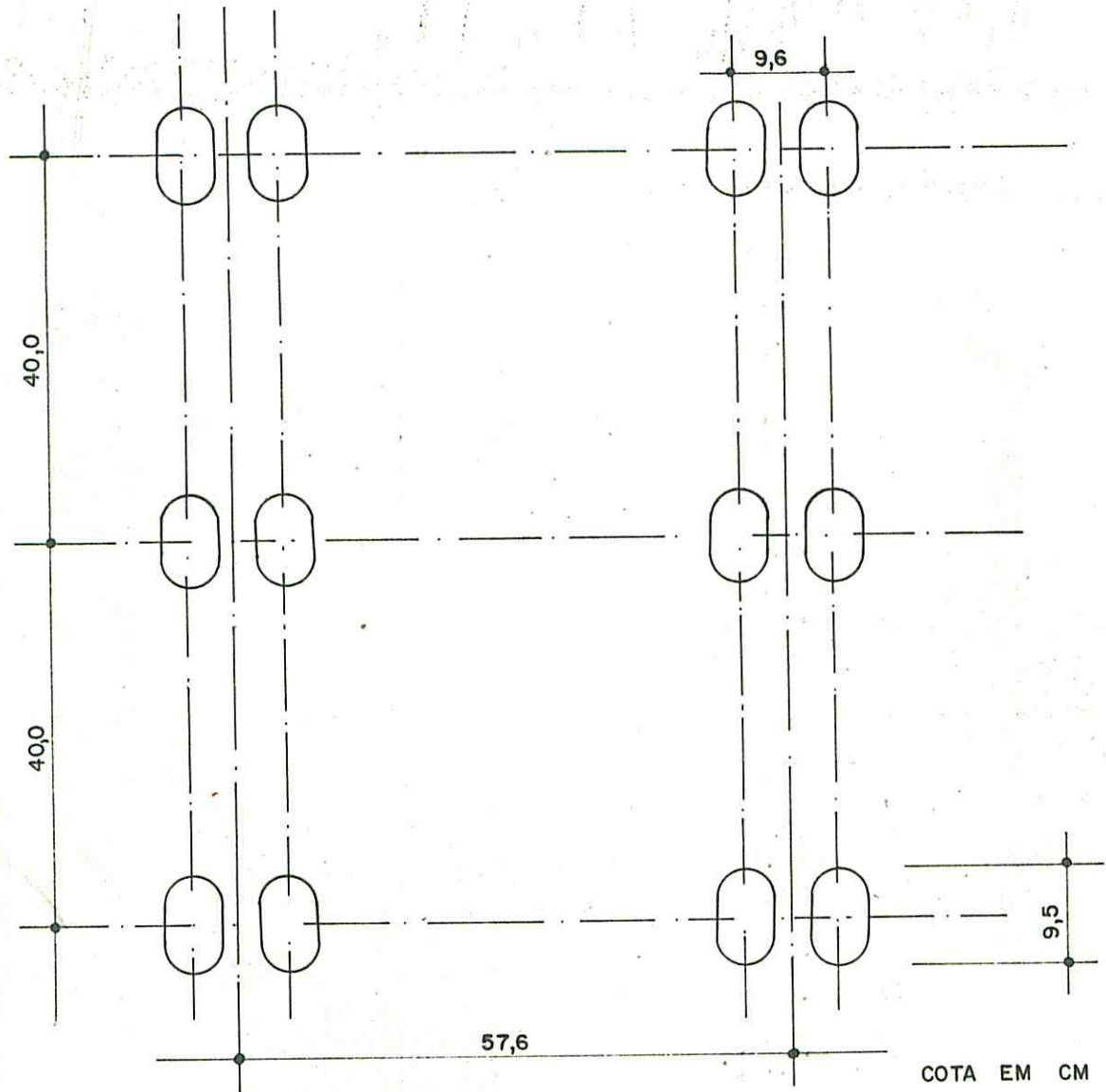


FIG. 6 CONFIGURAÇÃO E DIMENSÕES DO EIXO TANDEM TRIPLO, CONFORME USADO NA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES PARA $P = 35\text{ t}$, $k = 5,0\text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ E $h = 20,0\text{ cm}$ (DESENHO MUITO REDUZIDO EM RELAÇÃO AO ORIGINAL).

6º passo - Aposição do desenho na carta de influência e contagem de N
(V.Fig.nº4)

$$N = 2700$$

7º passo - Cálculo do estado de tensões

$$M = \frac{q l^2 N}{10000} = \frac{6,33 \times 29,69^2 \times 2700}{10000} = 1507 \text{ kgfxcm/cm}$$

$$\sigma_{tf} = \frac{M}{h^2/6} = \frac{1507}{20,0^2 \div 6} = 22,6 \text{ kgf/cm}^2$$

8º passo - Locação do ponto no ábaco-tentativa

Esta seqüência foi repetida, para a gama de valores proposta, por cerca de 300 vezes. O resultado final está mostrado na fig. 7.

4. EXEMPLOS ELUCIDATIVOS DO EMPREGO DO ÁBACO

O ábaco pode ser empregado para dois fins principais: (a) dados a carga, o suporte e a tensão admissível de tração na flexão, calcular a espessura da placa de concreto, e (b) dados a carga, o suporte e a espessura da placa de concreto, calcular a tensão solicitante de tração na flexão.

Os dois demonstram os processos.

EXEMPLO 1 - Dados: $P = 30 \text{ t}$
 $k = 4,0 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$
 $\sigma_{tf \text{ adm}} = 22,5 \text{ kgf/cm}^2$

Na figura 8: $h \approx 19,5 \text{ cm}$

EXEMPLO 2 - Dados: $P = 25 \text{ t}$
 $k = 8,0 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$
 $h = 16,0 \text{ cm}$

Na figura 8: $\sigma_{tf} = 20,4 \text{ kgf/cm}^2$

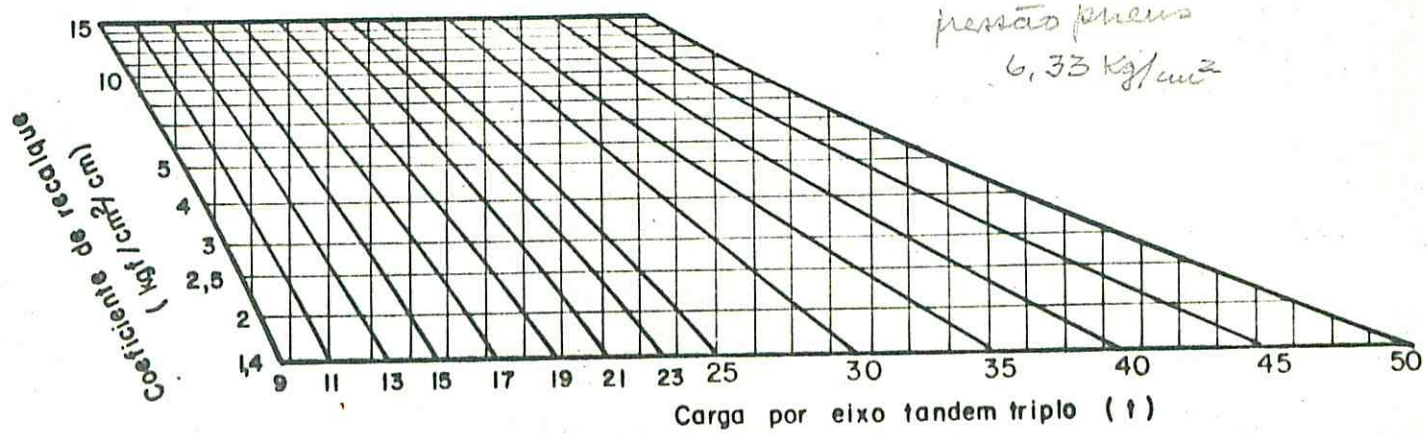
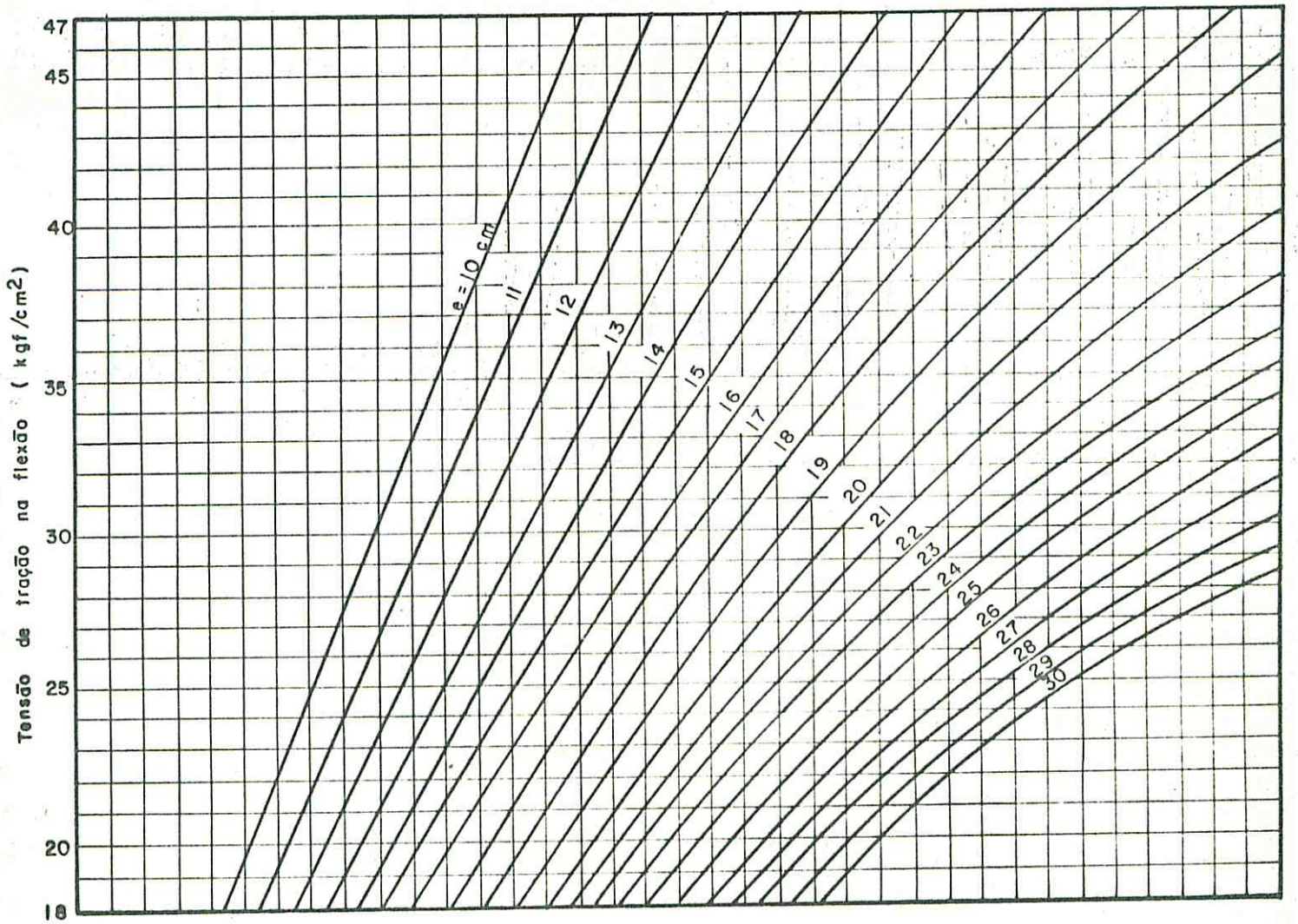
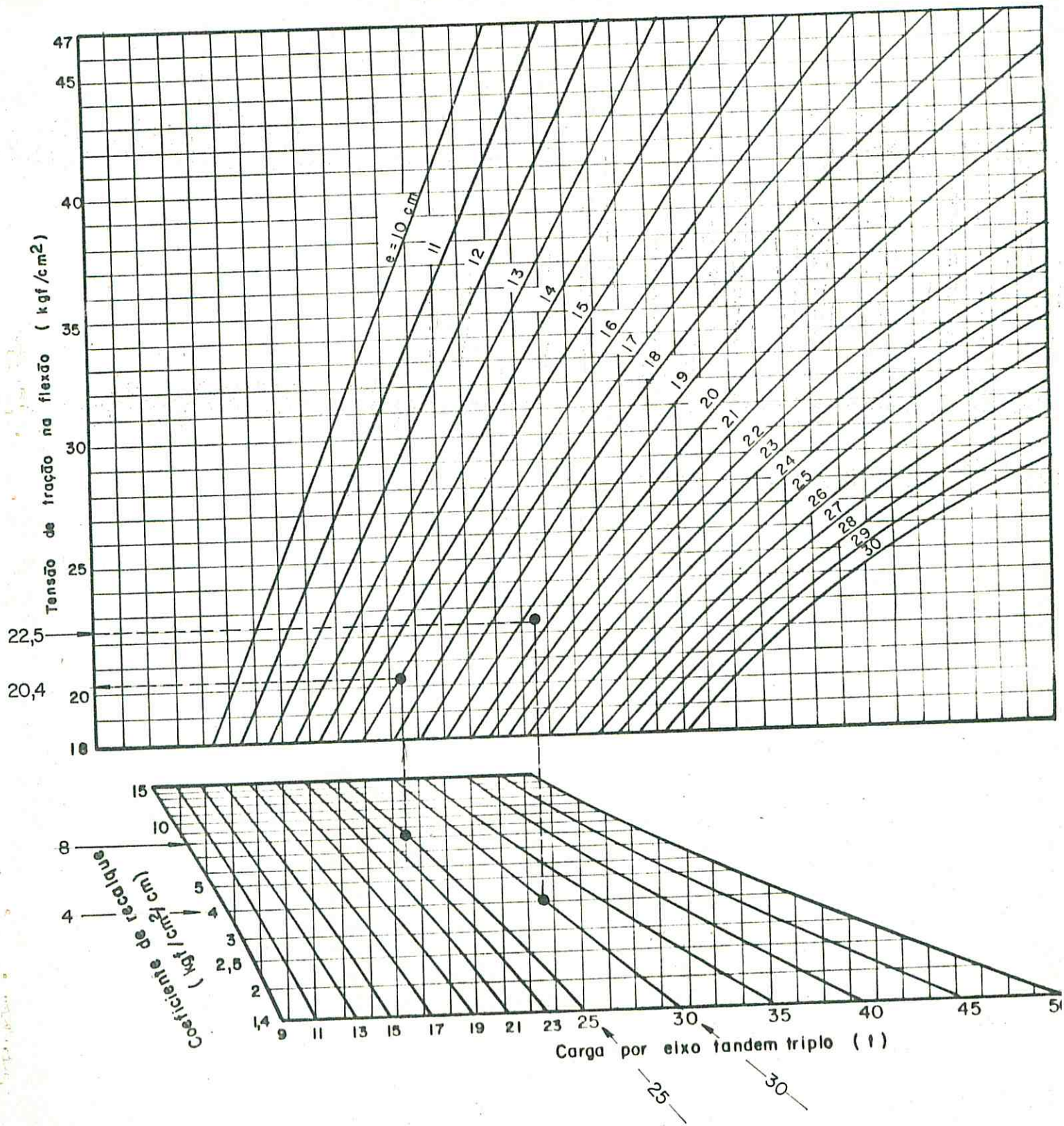


FIG. 7

ÁBACO PARA DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS DE CONCRETO (CASO DE EIXOS TANDEM TRIPLOS)



ÁBACO PARA DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS DE CONCRETO (CASO DE EIXOS TANDEM TRIPLOS)

FIG. 8 EXEMPLOS ELUCIDATIVOS DO EMPREGO DO ÁBACO.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. WESTERGAARD, H. M. - Computation of stresses in concrete roads. In: ESTADOS UNIDOS. Highway Research Board - Proceedings of the fifth annual meeting, Washington, D.C., 1925. v.5, p.90-112.
2. _____ - Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. Public Roads, 7(2): 25-35, Apr. 1926.
3. _____ - Theory of concrete pavement design. In: ESTADOS UNIDOS. Highway Research Board - Proceedings of the seventh annual meeting, Washington, D.C., 1928. v.7, p.175-181.
4. _____ - Analytical tools for judging results of structural tests of concrete pavements. Public Roads, 14(10): 185-188, Dec. 1933.
5. _____ - Stresses in concrete runways of airports. In: ESTADOS UNIDOS. Highway Research Board - Proceedings of the nineteenth annual meeting, Washington, D.C., 1939. v.19, p.197-205.
6. _____ - New formulas for stresses in concrete pavements of airfields. A.S.C.E., Transactions, 113: 434; 1948.
7. PORTLAND Cement Association - Thickness design for concrete pavements. Chicago, 1966. (HB-35).
8. PITTA, Márcio Rocha - Dimensionamento dos pavimentos rodoviários de concreto. São Paulo, ABCP, 1977. (ET-14).
9. PICKETT, Gerald & Ray, G. K. - Influence charts for concrete pavements. A.S.C.E., Transactions, 116: 49-73; 1951.