

COMENTÁRIOS SÔBRE O ESTUDO DO SOLO EM CAMADAS  
APLICAÇÕES AO ESTUDO DOS PAVIMENTOS

Araken Silveira



1963

Publicação nº 92

Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo

S 576

## A P R E S E N T A Ç Ã O

O presente trabalho foi desenvolvido durante o Curso de Doutorado sobre "TEORIAS MATEMÁTICAS DA MECÂNICA DOS SOLOS", na Escola Politécnica da U.S.P., curso a cargo do Professor Doutor Milton Vargas, tendo sido apresentado como trabalho final do curso.

COMENTÁRIOS SÔBRE O ESTUDO DO SOLO EM CAMADAS  
APLICAÇÕES AO ESTUDO DOS PAVIMENTOS

Araken Silveira

INTRODUÇÃO

No presente trabalho, foram examinados alguns artigos básicos para o estudo do solo em camadas, objetivando principalmente a aplicação ao estudo dos pavimentos. Dentro dêste critério iniciamos com o artigo "Soil Displacement Under a Circular Loaded Area" de autoria de Palmer, L.A. & Barber, E.S., publicado no volume 20, pág. 279 dos Proceedings Highway Research Board, em 1940. Em seguida foram examinadas as aplicações decorrentes do artigo de Burmister, D.M. "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways", publicado em 1943, também nos Proceedings Highway Research Board (volume 23 - 1943). Finalmente foram tecidas algumas considerações sôbre o método SOJUZDORNII, apresentado pelos russos no XI Congresso de Estradas de Rodagem, realizado no Rio de Janeiro, em 1959, e publicado em seus anais.

I - PALMER, L.A. & BARBER, E.S. - Soil Displacements Under a Circular Loaded Area - Proceedings Highway Research Board - v. 20 - pág. 279 - 1940 -

O artigo de Palmer & Barber desenvolve um processo ba

seado nas equações elásticas fundamentais de Boussinesq e nas integrações posteriores de Love e Carothers, fazendo uso de ensaios triaxiais, para definir um módulo de deformação em substituição ao módulo de elasticidade, tendo em vista a determinação do deslocamento vertical no solo devido a um carregamento uniforme sobre uma placa circular.

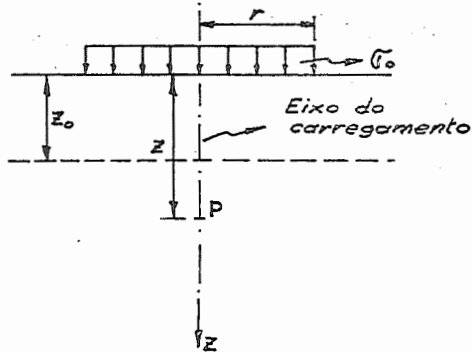


Fig. 1

Assim, considerando-se o solo um meio semi-infinito elástico e isotrópico, sabe-se da teoria da elasticidade que a deformação vertical em qualquer ponto P sobre o eixo do carregamento circular uniforme é

$$\epsilon_v = \frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{1}{E} (\sigma_z - 2\mu \sigma_r) \quad (1)$$

onde  $z$  é a profundidade do ponto P,  $\xi$  é o deslocamento vertical no ponto P e  $\sigma_z$  e  $\sigma_r$  são as tensões normais nas direções vertical e radial, respectivamente, atuando no ponto P.

Sabendo-se que:

$$\sigma_z = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (2)$$

e

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{2} \left[ 1 + 2\mu - \frac{2(1+\mu)z}{(r^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (3)$$

(sendo  $\sigma_0$  a tensão aplicada à superfície).  
 podem-se substituir estas expressões em (1) e integrar entre os limites  $z_0$  e  $\infty$ .

Obtém-se

$$\xi_{z_0} = \frac{\sigma_0}{E} \left[ (2-2\mu^2)(r^2+z_0^2)^{1/2} - \frac{(1+\mu)z_0^2}{(r^2+z_0^2)^{1/2}} + (\mu+2\mu^2-1)z_0 \right]$$

ou

$$\xi_{z_0} = \frac{\sigma_0 r}{E} \cdot F\left(\mu, \frac{z_0}{r}\right)$$

sendo

$$F\left(\mu, \frac{z_0}{r}\right) = (2-2\mu^2)\sqrt{1+\left(\frac{z_0}{r}\right)^2} - \frac{(1+\mu)\left(\frac{z_0}{r}\right)^2}{\sqrt{1+\left(\frac{z_0}{r}\right)^2}} + (\mu+2\mu^2-1)\frac{z_0}{r}$$

Para  $\mu = \frac{1}{2}$ , ou seja, admitindo-se que as deformações são a volume constante,

$$\xi_{z_0} = \frac{3\sigma_0 r^2}{2E(r^2+z_0^2)^{1/2}} \quad (4)$$

Se  $z_0 = 0$ , resulta:

$$\xi_{z_0} = \frac{3\sigma_0 r}{2E} \quad (4')$$

Por outro lado, sabe-se que a tensão cisalhante máxima em cada ponto sobre o eixo do carregamento considerado é dada por

$$\tau_{máx.} = \frac{1}{2} (\sigma_z - \sigma_r),$$

-4-

sendo  $\sigma_z - \sigma_r$ , a diferença entre as tensões principais no ponto.

$$(\sigma_z - \sigma_r) = \sigma_0 \left[ \frac{1-2\mu}{2} + (1+\mu) \frac{z}{(r^2+z^2)^{1/2}} - \frac{3z^3}{2(r^2+z^2)^{3/2}} \right] = \sigma_0 \cdot f.$$

sendo

$$f = \frac{1-2\mu}{2} + \frac{(1+\mu) \frac{z}{r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{r}\right)^2}} - \frac{3}{2} \left( \frac{\left(\frac{z}{r}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{r}\right)^2}} \right)^3 = f\left(\mu, \frac{z}{r}\right)$$

Para  $\mu = \frac{1}{2}$ ,  $f$  passa por um máximo igual a 0,58, à profundidade  $z = 0,71 r$ , onde teremos  $(\sigma_z - \sigma_r)_{\text{máx}} = 0,58 \sigma_0$ . (5)

Vejamos agora como, a partir destes elementos e com a utilização de ensaios triaxiais, Palmer & Barber encaminharam a questão ao estudo dos pavimentos.

Primeiramente, devemos assimilar a pressão  $\sigma_0$  à carga por roda de um veículo, distribuída uniformemente sobre uma área circular de raio  $r$ .

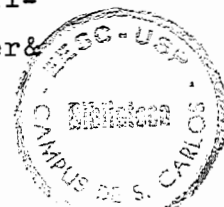
O deslocamento vertical produzido por este carregamento (sobre seu eixo), aplicado diretamente sobre a superfície de um solo, ou seja, o deslocamento vertical total sofrido pela massa de solo, da superfície a uma profundidade infinita e fixando-se  $\mu = \frac{1}{2}$ , é dado pela expressão (4'). Se entre o carregamento e a superfície considerarmos uma camada indeformável de espessura  $z_0$ , o deslocamento vertical será dado pela expressão (4).

O valor de  $z_0$  poderá então ser assimilado à espessura do pavimento (admitindo-se implicitamente, pois, com o mesmo módulo de elasticidade do solo). O deslocamento vertical será fornecido apenas pela massa de solo subjacente. O pavimento ape-

penas acompanhará este deslocamento. Fixado então um valor  $\bar{\xi}$  para o deslocamento vertical máximo admissível em função das características do pavimento, a expressão (4) nos fornecerá o valor de  $z_0$  mínimo, ou seja, da espessura do pavimento necessária a fim de que este deslocamento fixado não seja ultrapassado.

A utilização das expressões acima, entretanto, uma vez fixado  $\mu = \frac{1}{2}$ , exige o conhecimento do E, isto é, do módulo de elasticidade do solo. As simples análises das curvas tensão-deformação de um solo indicam que a sua interpretação não pode ser tomada na forma clássica definida para corpos elásticos. Palmer & Barber definiram e utilizaram, então, o "módulo de deformabilidade" C, que seria um módulo de elasticidade secante, uma vez que é definido de maneira análoga ao módulo de elasticidade, como sendo a relação entre uma tensão e a sua correspondente deformação específica, não sendo, entretanto, constante, em virtude da variação entre as tensões e as deformações em um solo não serem lineares.

Só por aí já vemos que teremos vários "módulos de deformabilidade" no lugar de um só. Além disto, a própria forma da curva tensão-deformação de um solo varia de acordo com o tipo e principalmente velocidade de deformação e com as condições de solicitação impostas. Fixando-se um determinado tipo e velocidade de deformação (que sempre poderá ser estabelecido de acordo com o problema ou como o mais desfavorável e não alterará o raciocínio), teremos por exemplo, como resultado de ensaios triaxiais realizados com vários valores de  $\sigma_3$ , mantidos constantes durante o ensaio, as curvas da Fig.2. Para cada ponto de cada curva teremos um "módulo de deformabilidade" C diferente. A fim de eliminar a variação entre as curvas, Palmer &



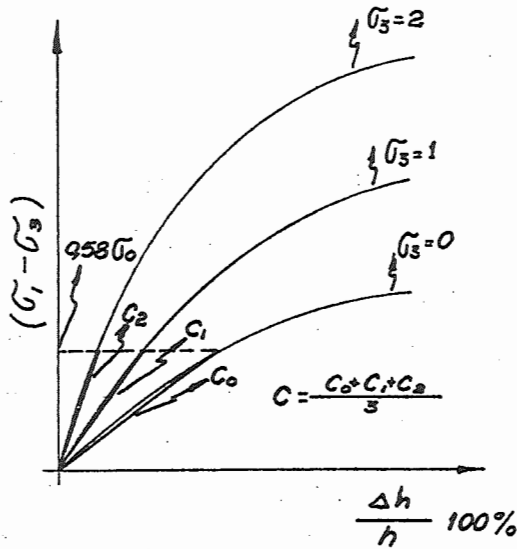


Fig. 2

Barber consideram uma média entre os valores obtidos em cada uma delas (da maneira que veremos a seguir), ou seja, consideram uma curva tensão-deformação média.

Para determinar os pontos sobre as curvas (ou o ponto sobre a curva média), para os quais devem ser calculados os módulos de deformabilidade, o critério estabelecido foi a utilização da máxima tensão cisalhante, ou se

ja, da diferença de tensões principais mais desfavorável possível.

Assim sendo, se  $z_0$  fôr menor que  $0,71 r$ , deveremos calcular os módulos de deformabilidade para  $(\sigma_1 - \sigma_3) = 0,58\sigma_0$ . Se  $z_0$  fôr maior que  $0,71 r$ , o valor de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  a ser utilizado será  $f \cdot \sigma_0$ , sendo  $f$  calculado para  $z_0/r$ . Neste caso, se temos fixado o valor de  $\bar{\xi}$ , deveremos proceder por tentativas ao cálculo de  $z_0$ , ou então calculamos para vários  $z_0$  os valores de  $\xi_0$  até encontrar um  $\xi_0 < \bar{\xi}$ .

Para facilidade de cálculos, as funções

$$F(\mu, \frac{z_0}{r})$$

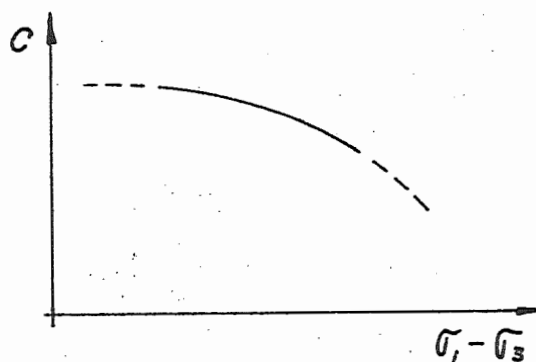
e

$$f(\mu, \frac{z_0}{r})$$



foram colocadas sob a forma de gráficos. (V. Fig. 4 e 5).

Em cada caso particular, também para facilidade de cálculos, podemos colocar o valor médio do módulo de deformabilidade  $C$  em função de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ . (Fig. 3).



Como resultante de discussões subsequentes, os autores do artigo estenderam a análise do problema, primeiro numa extensão da fórmula devido ao fato da não igualdade entre os módulos de elasticidade (ou deformabilidade) do pavimento e do solo e segundo pela consideração da capacidade de carga do solo em provas de carga diretas.

Da fórmula (4) resulta imediatamente:

$$Z_0 = r \sqrt{\left(\frac{3\sigma_0 r}{2C\xi_0}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

Chamando de  $C_p$  e  $C_s$ , respectivamente, os módulos de deformabilidade do pavimento e do solo e de  $\mu_p$  e  $\mu_s$  os módulos de Poisson respectivos do pavimento e do solo, a expressão

para a espessura do pavimento  $e_p$  pela primeira consideração acima resultaria

$$e_p = z_0 \sqrt[3]{\frac{C_s}{C_p} \cdot \frac{1-\mu_p^2}{1-\mu_s^2}} \quad (7)$$

Adotando como simplificação  $\mu_p = \mu_s$

$$e_p = z_0 \sqrt[3]{\frac{C_s}{C_p}} \quad (7')$$

Pela segunda consideração poderíamos fixar  $\bar{\xi}$ , através de prova de carga direta, tendo em vista a equação (4'), de onde resultaria:

$$\bar{\xi} = \frac{1,52 p_0}{C} \quad (8)$$

sendo  $p_0$  a carga (na prova de carga) correspondente ao deslocamento admissível  $\bar{\xi}$ .

Substituindo (8) em (6), resulta

$$z_0 = 2 \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{p_0}\right)^2 - 1}$$

que, substituído em (7'), daria finalmente

$$e_p = \frac{2}{\sqrt[3]{C_p/C_s}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{p_0}\right)^2 - 1}$$

fórmula que tem sido utilizada pelo Kansas Highway Department.

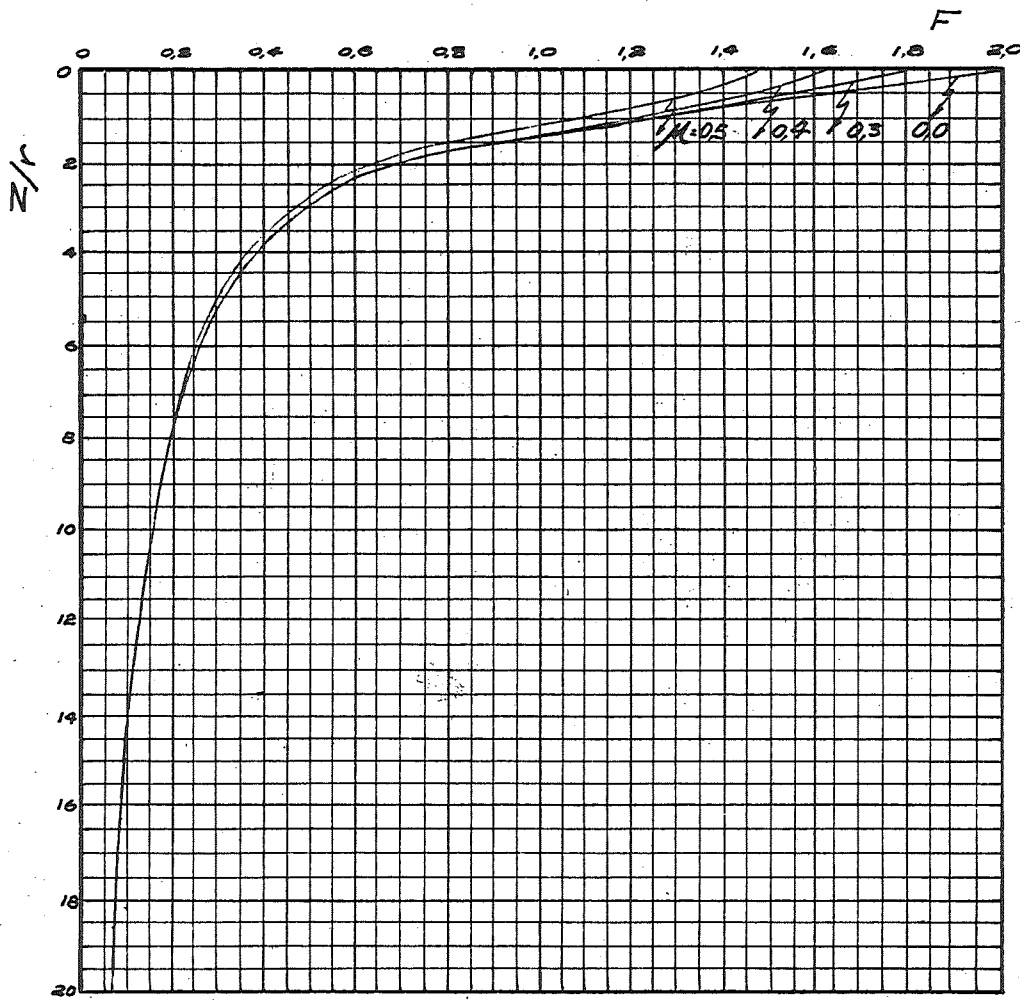


Fig. 4 - COEFICIENTE F

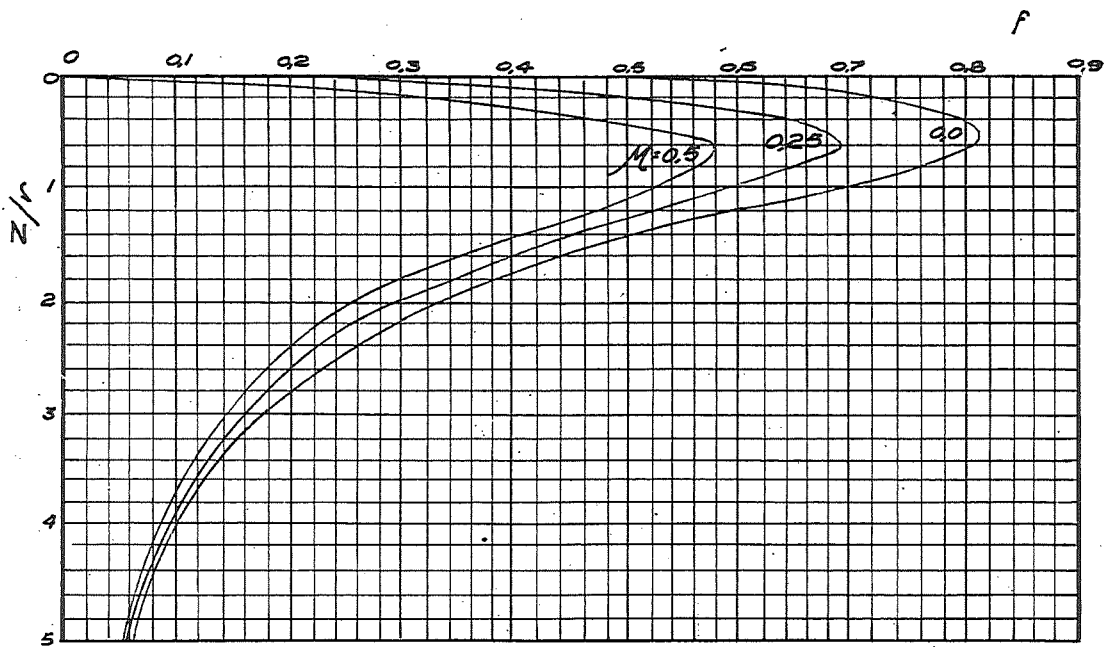


Fig-5 - COEFICIENTE  $f$

II. - BURMISTER, D.M. - "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways" - Proceedings Highway Research Board Vol.23 - 1943 - pág.126.

Burmister desenvolveu uma teoria matemática de distribuição de tensões e deslocamentos para um "sistema de duas camadas", utilizando-se da teoria da elasticidade e das hipóteses a ela inerentes e adotando ainda mais as seguintes condições de limites e continuidade:

a) o sistema é constituído por duas camadas elásticas superpostas, a superior de espessura constante  $h_1$ , sem peso, está continuamente em contacto com a inferior de dimensão vertical semi-infinita, estendendo-se ambas infinitamente no sentido horizontal.

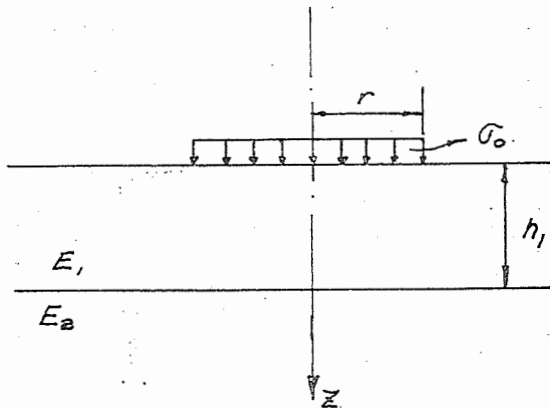
b) a interface de contacto é perfeitamente rugosa.

c) o carregamento é feito por carga uniformemente distribuída sobre área circular de raio  $r$ , na superfície da camada superior, onde são consideradas nulas todas as tensões normais e cisalhantes fora da área carregada.

d) as tensões e os deslocamentos são nulos à profundidade infinita.

e) em ambas as camadas foi tomado  $\mu = \frac{1}{2}$

Partindo destas hipóteses e apoiado nos trabalhos de Love e Timoshenko, Burmister deduziu expressões teóricas para as



tensões verticais, para as tensões radiais e para os deslocamentos verticais, tanto na interface entre as camadas como na superfície da camada superior.

O cálculo numérico, entretanto, só foi estendido para o deslocamento vertical

no centro da área carregada e à superfície da camada superior, tendo chegado à equação final.

$$\xi_0 = \frac{1,5 \sigma_0 r}{E_2} \cdot F_W \quad (1)$$

onde  $\xi_0$  é o deslocamento vertical referido;  $\sigma_0$  é a pressão uniformemente distribuída sobre área circular de raio  $r$ ;  $E_2$  é o módulo de elasticidade da camada inferior (subleito) e  $F_W$  é um coeficiente função das relações  $r/h_1$  e  $E_2/E_1$ , sendo  $h_1$  e  $E_1$  respectivamente a espessura e o módulo de elasticidade da camada superior (pavimento).

O coeficiente  $F_W$  é de expressão complicada e foi colocado em forma de gráficos (V. figs. 2 e 3), em função de valores práticos das relações  $r/h_1$  e  $E_2/E_1$ .

Como se pode observar, o coeficiente  $F_W$  atua como um fator de correção a ser aplicado sobre a fórmula de Boussinesq

$$\xi = 1,5 \sigma_0 r / E$$

para carregamento flexível e  $\mu = 1/2$ ; por analogia Burmister - estendeu sua fórmula para carregamento rígido, assimilando o valor 1,18 de Boussinesq. Teremos, pois, para carregamento rígido

$$\xi_0 = \frac{1,18 r_0^2}{E_2} \cdot F_w \quad (1')$$

A utilização prática das equações de Burmister, ou seja, da teoria do "sistema de duas camadas", no dimensionamento de pavimentos, fica condicionada ao conhecimento dos módulos de elasticidade do sub-leito e do pavimento, bem como do deslocamento vertical admissível.

Como deslocamento vertical admissível, Burmister recomenda 0,2" para pavimentos flexíveis e 0,05" para pavimentos rígidos, sugerindo o uso de provas de carga diretas sobre placa de diâmetro fixado (30") para avaliação dos módulos de elasticidade. Seguindo esta linha, seria realizada uma prova de carga direta sobre o sub-leito utilizando uma placa rígida de 30" de diâmetro ( $r_0 = 15"$ ). Neste caso  $F_w = 1$ , e pela fórmula (1) teríamos o valor de  $E_2$ , uma vez fixado  $\xi = 0,2"$  e sendo  $p_0$  o valor obtido durante a prova para o deslocamento  $\xi$ .

$$E_2 = \frac{1,18 p_0 r_0^2}{\xi}$$

Em seguida seria feita uma nova prova de carga sobre uma camada de espessura fixada  $h_0$  do material do pavimento sobre o mesmo sub-leito, obtendo-se então uma nova pressão  $p'_0$  para o mesmo deslocamento vertical admissível  $\xi$ . Como já temos  $E_2$  entrando-se com estes valores na fórmula (1), calcula-se o valor  $F_w$  para este caso.



$$F_w = \frac{E_2 \bar{\xi}}{1,18 p_0 r_0}$$

Com êste valor de  $F_w$  e como se tem  $h_0/r_0$  ou  $r_0/h_0$ , obtem-se com o auxílio dos gráficos das figuras 2 ou 3 o valor de  $E_2/E_1$  e consequentemente de  $E_1$ .

Determinado  $E_2/E_1$  e fixado  $\bar{\xi}$ , poderemos através da fórmula ① e dos gráficos das figuras 2 ou 3, determinar a espessura do pavimento necessária para suportar o carregamento real de projeto  $\bar{\sigma}_0$  uniformemente distribuído sôbre uma área de raio  $r$  (determinado pelo veículo-tipo).

Deve-se observar entretanto que os "módulos de elasticidade" assim determinados carecem de significado físico e variam com  $\bar{\xi}$  e com  $h/r$ , além de que a existência do pavimento pode influir no próprio "módulo de elasticidade" do sub-leito. Burnis ter sugere um outro caminho, que consiste na realização de várias provas de carga sôbre o pavimento, variando-se  $h/r$ , ou através de  $h$  ou de  $r$ . Para cada  $h/r$ , tem-se  $F_w = f(E_2)$ . Atribuindo-se valôres a  $E_2$ , resultam valôres para  $F_w$ , que serão colocados sôbre o gráfico da fig. 3, para cada  $h/r$ . Unindo-se os pontos de mesmo  $E_2$ , obtém-se linhas de mesmo aspecto das curvas  $E_2/E_1$ . Uma interpretação dêstes resultados tendo-se em vista uma maior ajustagem e concordância entre as curvas permite fixar o  $E_2$  e a relação  $E_2/E_1$ , mais consistentes. As provas de carga poderão ser feitas ou para um  $\bar{\xi}$  fixado (resultando as pressões respectivas) ou fixando-se o carregamento e medindo-se os deslocamentos verticais correspondentes. Êste carregamento pode ser a própria roda do veículo, caso em que a equação ① deve ser utilizada.



Burmister estendeu sua análise para o caso de três camadas (para poder separar a base do revestimento), definindo um outro coeficiente,  $f_w$  tal que

$$\xi_0 = 1,18 \sqrt{0,2} \left( \frac{F_w \cdot f_w}{E_3} \right) \quad (2)$$

ou seja,

$$f_w = \frac{\xi_0}{1,18 \sqrt{0,2}} \left( \frac{E_3}{F_w} \right) \quad (2')$$

Admitiu ainda que  $f_w$  segue curvas de influência semelhantes às  $F_w$  da Fig.3. Neste caso, um raciocínio análogo ao anterior permitiria avaliar  $E_3$ ,  $E_3/E_2$  e  $f_w$  considerando-se apenas as duas camadas inferiores (base e sub-leito). Uma nova prova de carga sobre a mesma espessura de base considerada no cálculo de  $F_w$ , encimada por uma camada de revestimento de espessura  $\bar{h}$ , forneceria elementos para calcular  $f_w$ , através de (2'). Com  $f_w$  e o valor  $\bar{h}/r$ , seria determinada a curva de influência correspondente na fig.3. Estas curvas definem agora por analogia  $E_3/F_w/E_1$ , de onde sai o valor de  $E_1$ .

Um raciocínio análogo pode ser feito quando o revestimento é de concreto de "módulo de elasticidade"  $E_1$  conhecido, procedendo-se por tentativas até uma ajustagem de  $E_3$ ,  $E_2$  e  $E_1$ , utilizando-se os dados das provas de carga e das curvas da fig.3.

Finalizando, Burmister construiu curvas (consideradas tentativas) para o dimensionamento de pavimentos betuminosos e de concreto, baseadas respectivamente nas teorias das duas e das três camadas, para diversos tipos de base e para deslocamentos verticais admissíveis fixados (0,2" para pavimento betuminoso e

0,05" para pavimento de concreto (V.figs.4 e 5).

A Marinha Americana utiliza a teoria das duas camadas no dimensionamento de pavimentos de aeroportos, seguindo de início o primeiro raciocínio aqui visto, ou seja, a realização de duas provas de carga sobre placa rígida de 30" de diâmetro, uma sobre o sub-leito e outra sobre o pavimento com uma espessura fixada, calculando em seguida uma espessura  $h$  para o pavimento - em função do carregamento real de projeto (uma carga por roda, uma pressão no pneu e um fator de rigidez). Esta espessura inicial  $h$  é tomada como base do projeto e em função dela são construídas seções experimentais (geralmente três, uma com espessura  $h$ , uma com espessura maior e outra com espessura menor, para as três posições: de corte, atêrro e greide). Sobre estas seções experimentais são realizadas provas de carga reproduzindo as condições de solicitação de projeto e são medidos os deslocamentos verticais correspondentes. Estes deslocamentos são colocados em gráficos em função da espessura (após terem sofrido uma correção por efeito de saturação através de ensaios de compressão simples sobre amostras indeformadas do sub-leito). Fixado então o deslocamento vertical admissível de 0,2", o gráfico construído fornece a espessura final do pavimento (Navy Method).

Barber, discutindo o artigo de Burmister, faz uma extensão de sua fórmula, vista no ítem I, a fim de considerar também o deslocamento do pavimento. Assim, de sua fórmula (7') (Ver ítem I, pág.8), vimos que a espessura do pavimento era dada por

$$e_p = 2 \sqrt{\left(\frac{1,5 \sigma_0 z}{C \xi_0}\right)^2 - 1} \cdot \sqrt{\frac{C_s}{C_p}}$$

onde  $\xi_0$  seria o deslocamento vertical à superfície no centro do carregamento, sem considerar nenhum deslocamento no pavimento e dado portanto por

$$\xi_0 = \frac{1,5 \sigma_0 r}{C_s} \sqrt{1 + \frac{(C_p/C_s)^{2/3}}{r/e_p}} = \frac{1,5 \sigma_0 r}{C_s} \cdot F_s$$

Considerando o deslocamento vertical  $\xi_p$  dentro do pavimento como

$$\xi_p = \frac{1,5 \sigma_0 r}{C_s} \cdot F_p$$

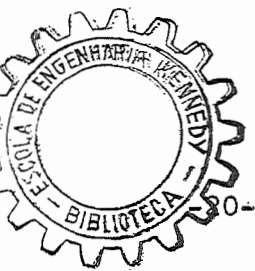
sendo

$$F_p = \frac{1 - F_s}{C_p/C_s}$$

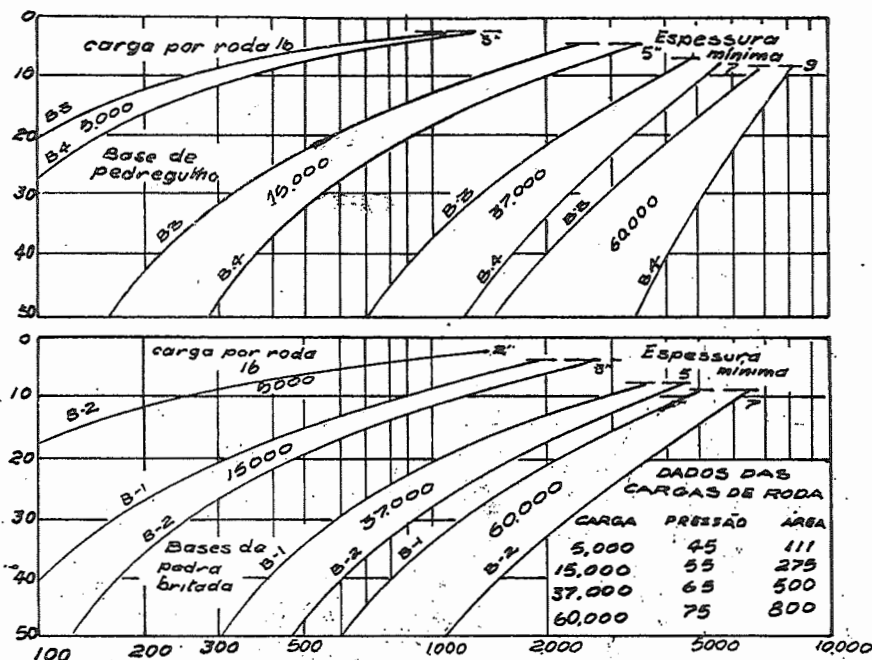
teremos que o deslocamento total à superfície sobre o centro do carregamento é dado por:

$$\xi_0 + \xi_p = \frac{1,5 \sigma_0 r}{C_s} (F_s + F_p)$$

Barber calculou os valores de  $(F_s + F_p)$  e  $F_w$  para várias relações  $C_p/C_s = E_1/E_2$  e  $r/e_p = r/h_1$ , encontrando per feita semelhança.



ESPESSURA COMBINADA DE REVESTIMENTO E BASE por



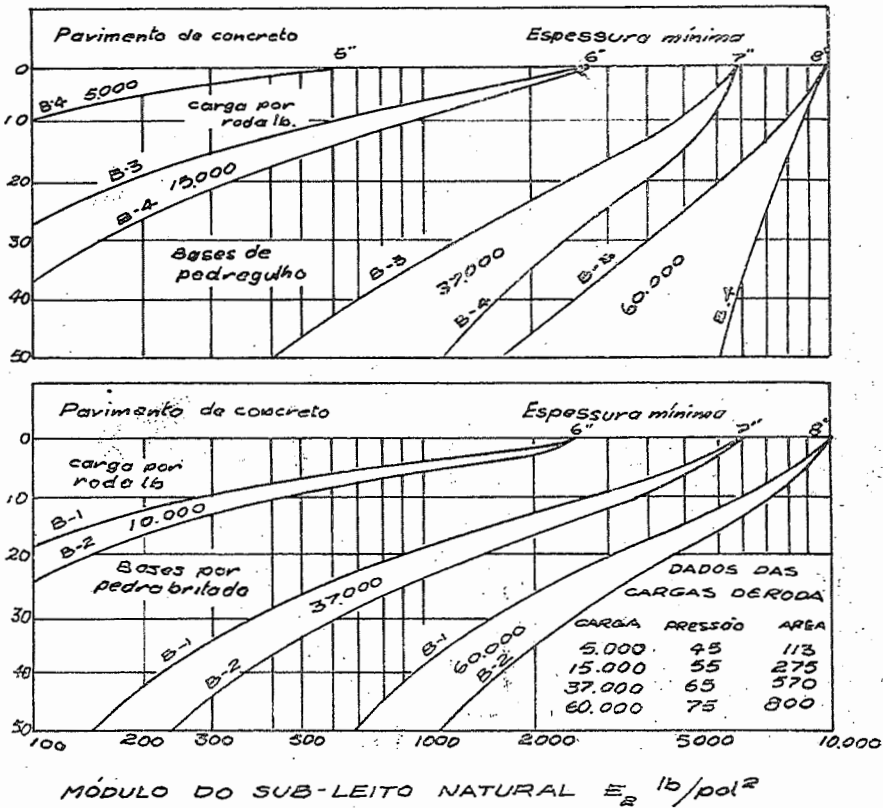
MÓDULO DO SUB-LEITO NATURAL,  $E_2 - 10/pól^2$

Deslocamento vertical admissível 0,20"

Módulo  $E_1$

Pedra britada-B-1	ótima qualidade, compactação máxima	100.000
B-2	bôa qualidade e compactação	50.000
Pedregulho -B-3	bem graduado, compactação máxima	30.000
B-4	mal graduado, bôa compactação	15.000

ESPESURA DA CAMADA DE BASE, SOMEMENTE - POL



Deslocamento vertical admissível 0,05"

Módulo do concreto  $E_1 = 3.000.000 \text{ lb/pol.}^2$

Módulo  $E_2$

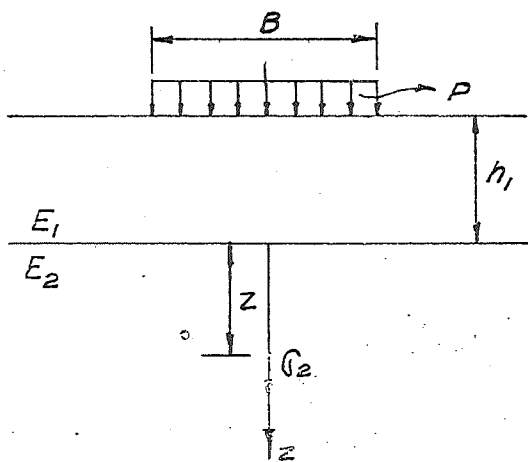
Pedra britada-B-1	ótima qualidade, compactação máxima	100.000
B-2	bõa qualidade e compactação	50.000
Pedregulho -B-3	bem graduado, compactação máxima	30.000
B-4	mal graduado, bõa compactação	15.000



III-O MÉTODO RUSSO - Anais do XI Congresso de Estradas de Rodagem-Rio de Janeiro-1959

Este método de dimensionamento de pavimentos flexíveis foi desenvolvido no Instituto Central de Pesquisas Rodoviárias (SOJUZDORNII) da U.R.S.S., por uma equipe sob a direção do Professor N.N.Ivanov e é conhecido como Método SOJUZDORNII.

Referindo-se à Fig.1 ao lado, o método parte de duas equações experimentais: a primeira definindo uma espessura equivalente



$$h_{eq} = h_1 \sqrt[2.5]{E/E_0}$$

semelhante a uma expressão de Palmer & Barber, com a diferença apenas da raiz que passa de 3 para 2,5; a segunda, definindo a distribuição de pressões ao longo do eixo de carregamento.

$$\sigma_z = \frac{p}{1 + a \left( \frac{z + h_{eq}}{B} \right)^2}$$

onde a é um fator de concentração das tensões. Para o caso de pavimentos, a pode ser tomado como valendo 1. Para a = 2,5, obtém-se praticamente os mesmos valores dados utilizando-se a teoria de Boussinesq.

O método baseia-se ainda em que o deslocamento vertical  $d\rho$  sofrido por uma camada elementar  $dz$  à profundidade  $z$  é dado por

$$d\rho = \frac{\sigma_z dz}{E}$$

o que implica na adoção de  $\mu = 0$ .

O deslocamento vertical  $\rho$  será então

$$\rho = \int_0^{\infty} \frac{\sigma_z dz}{E}$$

que pode ser desdobrado em dois termos correspondentes às duas camadas consideradas.

$$\rho = \int_0^{h_1} \frac{\sigma_z dz}{E_1} + \int_{h_1}^{\infty} \frac{\sigma_z dz}{E_0}$$

Substituindo  $\sigma_z$  pelo seu valor e efetuando-se a integração, obtém-se

$$\rho = \frac{pB}{E_0} \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt[3.5]{(E_1/E_0)}} \right) \operatorname{arctg} \frac{h_1}{B} \sqrt[3.5]{E_1/E_0} \right] \quad (1)$$

Os valores de  $E$  ( $E_1$ ,  $E_0$ ) são chamados módulos de deformação, e são definidos como uma função da carga  $p$ , por uma deformação total relativa  $\lambda$ , definida por sua vez pela relação  $\rho/B$ .

Se considerarmos as duas camadas iniciais substituídas por uma só camada uniforme equivalente, com módulo de deformação  $E_{eq} = E_0 = E_1$ , teremos

$$\rho = \frac{\pi p B}{2 E_{eq}} \quad (2)$$

onde, portanto,

$$E_{eq} = \frac{E_0}{1 - \frac{2}{\pi} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt[3.5]{(E_1/E_0)^{3.5}}} \right) \operatorname{arc\,tg} \frac{h_1}{B} \sqrt[3.5]{E_1/E_0}} \quad (3)$$

Esta expressão foi colocada sob forma de gráficos para várias relações  $h_1/B$ ,  $E_1/E_0$  e  $E_{eq}/E_1$  (V.Fig.2).

Sendo  $\lambda = \rho/B$ , substituindo  $\rho$  pelo seu valor dado - por (2), temos

$$\lambda = \frac{\pi p}{2 E_{eq}} \quad (4)$$

O veículo-tipo russo para projeto determina uma carga de roda  $p = 5\text{kg/cm}^2$ , distribuída sobre uma área de diâmetro  $B = 34\text{ cm}$ . O valor  $p$  deve ser multiplicado por um coeficiente  $K = 0,5 - 0,65 \log N$ , derivado de observações laboratoriais e de campo e onde  $N$  é a intensidade de tráfego, definida como o número de veículos-tipo que passam em estrada de duas faixas em 24 horas.

Tendo-se em vista estas considerações, a equação (4) passa a

$$\lambda = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{p(0,5 + 0,65 \log N)}{E_{eq}} \quad (4')$$



onde o módulo de deformação equivalente passa a ser o módulo de deformação requerido ( $E_{req}$ ) para o pavimento.

Daí, então

$$E_{req} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{P}{\lambda} (0,5 + 0,65 \log N) \quad (5)$$

A experiência russa estabelece uma variação de  $\lambda$  de 0,03 para tráfego pesado e 0,05 para tráfego leve.

Determinado o módulo de deformação equivalente às duas primeiras camadas, este módulo pode ser considerado um novo  $E_0$ , sobre o qual podemos considerar uma outra camada de módulo  $E_2$ , calculando-se um novo módulo equivalente  $E'_{eq}$  e assim por diante, estendendo a teoria de duas camadas para um número qualquer de camadas. Em cada fase a experiência deve fixar o valor de  $\lambda$ , que também é função do tipo de pavimento.

O dimensionamento dos pavimentos é então feito baseado nas equações (3) e (5) ou nos gráficos da fig.2, uma vez fixados  $\lambda$  e os módulos de deformação das camadas.

De uma maneira geral, o método utilizado pelos russos segue a mesma linha dos trabalhos anteriores, apresentando inclusive as mesmas dificuldades de ordem prática de determinação dos dados necessários.

Pelo que se pode observar, entretanto, dá-se uma forte importância à experimentação sistemática através de provas de carga diretas, inclusive sobre pavimentos já construídos, a fim de se levantarem os dados diretamente de valores medidos no campo. A direção das investigações parece ser no sentido de aumentar a precisão dos dimensionamentos russos a partir de condições estabelecidas cada vez mais conhecidas.

Dentro desta linha de investigação, definem o "coeficiente de resistência" dos pavimentos, K, como sendo a relação entre o módulo de deformação existente  $E_{exist}$  e o módulo de deformação requerido  $E_{req}$ .

$$K = \frac{E_{exist.}}{E_{req.}}$$

A observação de que uma parte (15%) dos pavimentos - com K maior que 1,0 apresentavam danos sugeriu a utilização de um coeficiente adicional de segurança variando de 1,1 a 1,2 a ser multiplicado ao módulo de deformação de projeto determinado ( $E_{req}$ ).

Outras considerações que têm sido desenvolvidas em torno do Método SOJUZDORNII, referem-se principalmente à utilização de provas de carga mais rápidas, através de carregamento com velocidade constante e tal que produza resultados que possam ser relacionados com os obtidos em provas de carga clássicas, utilizando-se de considerações reológicas. Referem-se também ao comportamento do solo sob a ação de cargas repetidas. Foi observado que a influência logarítmica inicialmente admitida tem efeitos diferentes de acordo principalmente com o tipo de solo do sub-leito. Outro fator a ser considerado e que também altera os efeitos da repetição de carga é a velocidade de aplicação. Os resultados de investigações neste sentido levaram à consideração da utilização do estágio elasto-viscoso para o cálculo de dimensionamento, considerando-se a deformação elástica permissível, ao invés do estágio elasto-visco-plástico do método inicial. O cálculo seria o mesmo do método SOJUZDORNII, sem a utilização do coeficiente de repetição de cargas, e usando-se o mó

dulo de elasticidade  $E_y$  no lugar do módulo de deformação  $E$  e abaixando-se a deformação permissível.

Comparando-se os dois processos, chega-se a

$$E_y / E = 3,25$$

A substituição de um processo pelo outro dependerá en tão da determinação da relação  $E_y/E$  do solo e dos materiais do pavimento. Quando a relação não excede 3,5 os métodos conduzem a resultados semelhantes. Para valores superiores a 3,5 o cálculo elasto-viscoso superdimensiona e para valores inferiores a 2,5 é mais prudente.

Os russos aconselham a determinação do módulo de elasticidade em ensaios diretos sobre as estradas e não através de processos indiretos (como propagação de ondas), sem entretanto - indicar no artigo a maneira de fazê-lo.

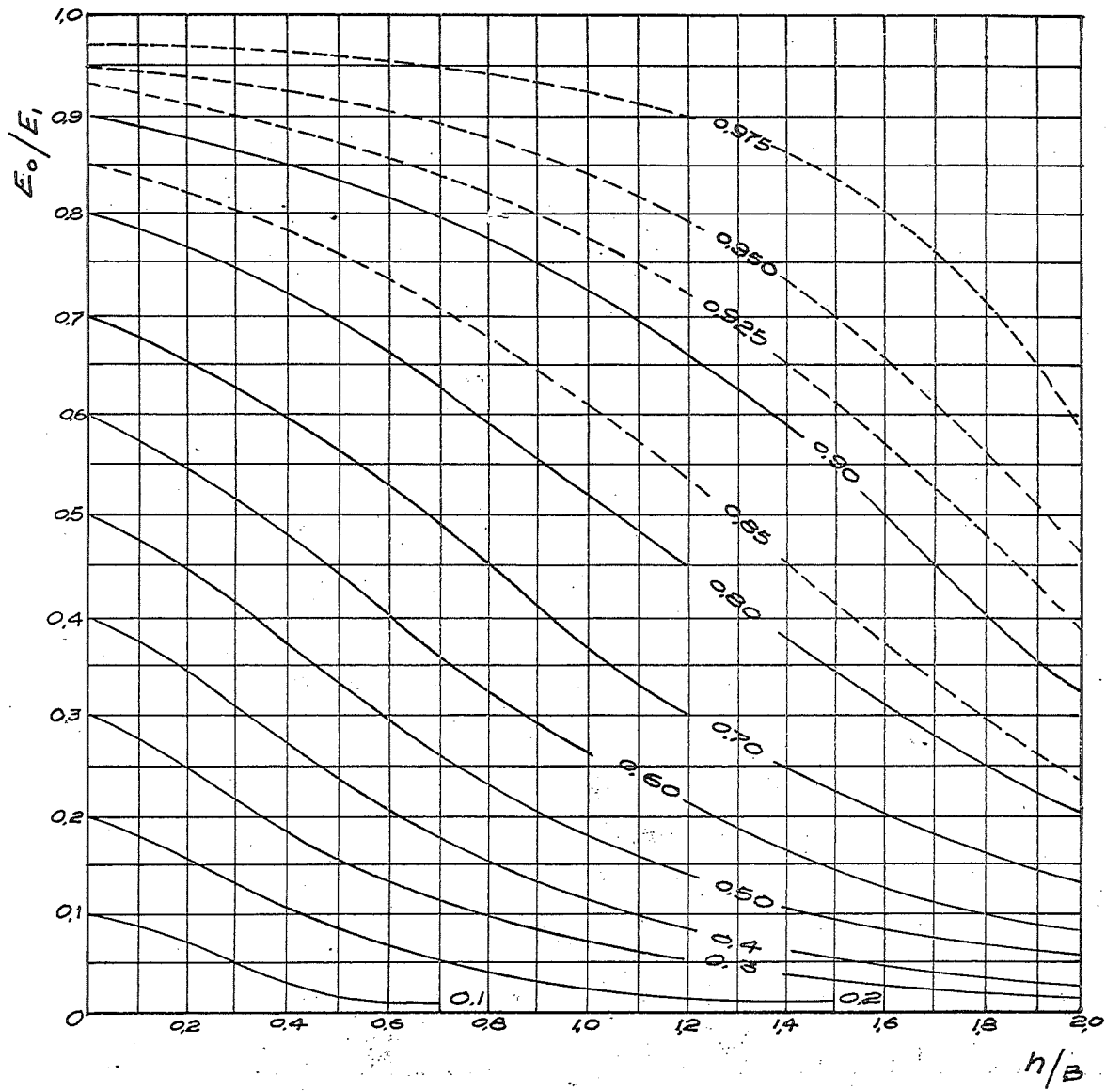


Fig. 2