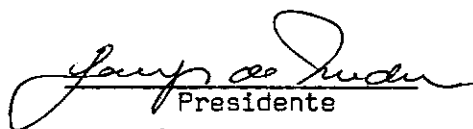


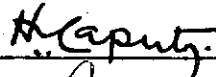
"CÁLCULO DE CARGA DE RODA EQUIVALENTE NO DIMENSIONAMENTO
DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: PROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA"

PAULO ROBERTO VERBICÁRIO CARIM

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO
DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUI-
SITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.).

Aprovada por :


Presidente


H. Caputo


Zilby Sabo


Marcondes

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL

ABRIL DE 1973

ABSTRACT

A study of flexible pavement design for airports, consisting of two main parts :

1) Historical Review of the California Bearing Ratio (CBR) Method, since its origin in 1928, describing work related to equivalent wheel load and the present criterium for its determination.

2) A computer program for the determination of equivalent single wheel load (ESWL), for any type of aircraft, using the CBR method. Variables taken into account : CBR value and Poisson ratio of subgrade soil; load, tire pressure, and type of landing gear. The only variable not included is the "coverage", which depends on the load repetition, and is taken into consideration through a percentage of thickness required, but does not enter directly into the computations. The program is valid for CBR values not greater than 12, because of limitations from theory.

As part of design parameters analysis, the influence of each variable into thickness determination is shown for three different types of landing gears.

In Appendix I, the determination of coverage is shown in a practical example. Appendix II presents a general guidance and some shortcuts for flexible pavement design whenever a computer is not available.

A MEUS PAIS pela vida e dedicação

A MEU IRMÃO pelo incentivo.

A G R A D E C I M E N T O S

PROF. JACQUES DE MEDINA - Pela maneira correta e consciente com que me orientou no trabalho e pela disponibilidade e amizade demonstrada neste período.

PROF. HOMERO PINTO CAPUTO - Meu primeiro professor de Mecânica dos Solos - Pelo exemplo de retidão e honestidade, tanto na escola, como na vida.

PROF. CIRUS A. HACKEMBERG - Pela ajuda na escolha de um método mais rápido na resolução das integrais elípticas.

OPERADORES DO NCE - Pela dedicação nos horários reservados para o processamento de vários programas necessários à pesquisa feita na tese.

PROFESSORES DA ÁREA DE MECÂNICA DOS SOLOS - Pelos esclarecimentos de dúvidas surgidas no decorrer deste trabalho.

COLEGAS - Que direta ou indiretamente me ajudaram e incentivaram.

YEDA - Pela datilografia da tese.

FÁTIMA - Pelos desenhos.

RESUMO

Este trabalho que estuda o dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos, divide-se em duas partes principais:

1. Apresentação de um histórico, onde mostra o desenvolvimento do método CBR de dimensionamento, desde sua aparição na Califórnia em 1928, e a sequência dos estudos em relação à roda equivalente, até o critério usado atualmente em sua determinação.

2. Uma programação automática, que por meio do cálculo da roda equivalente (ESWL), dimensiona qualquer pavimento flexível de aeroportos para qualquer tipo de aeronave pelo método do CBR, levando em consideração as variáveis: CBR e coeficiente de Poisson do subleito; peso, pressão dos pneus e tipo de trem de pouso da aeronave.

Não se considera no programa, tão somente a variável "cobertura", que leva em conta a repetição de cargas, pois sua influência - ainda muito discutida - é tomada como uma percentagem da espessura necessária, não entrando assim, diretamente nos cálculos. Porém, de como se leva em conta e calcula essa percentagem, explica-se no APÊNDICE I, expondo-se um exemplo detalhado do cálculo.

Devido à limitação da teoria, o programa só é válido para valores de CBR menores ou iguais a 12.

Apresenta também, na parte relativa à análise dos parâmetros de dimensionamento, um estudo da influência de cada variável na determinação da espessura, resultados estes obtidos, pesquisando três trens de pouso distintos.

Finalmente, encontra-se no APÊNDICE II um roteiro completo de dimensionamento com algumas sugestões simplificadoras, quando não se dispõe de computador e necessita-se dimensionar um pavimento flexível de aeroporto.

I N D I C E

Dedicatória	1
Agradecimentos	11
Resumo	111
Abstract	v
Indice	vi

A - INTRODUÇÃO

B - REVISÃO DA LITERATURA

1 - O Problema de Boussinesq

1.1 - Carga Concentrada	5
-------------------------------	---

1.2 - Carga Circular Uniformemente Distribuída	6
--	---

2 - A Contribuição de Love	8
----------------------------------	---

3 - Início e Desenvolvimento do Método do CBR

3.1 - Primeiros Estudos	13
-------------------------------	----

3.2 - O Ensaio CBR	14
--------------------------	----

3.3 - As Primeiras Curvas de Dimensionamento	15
--	----

3.4 - Adoção do Método do CBR pelo Corpo de Engenheiros	16
---	----

3.5 - Adaptação do Método do CBR aos Pavimentos de Aeroportos ...	17
---	----

3.6 - Extrapolação para Novas Curvas	18
--	----

4 - Primeira Consideração da Roda Equivalente

4.1 - Necessidade	21
-------------------------	----

4.2 - Considerações Iniciais	22
------------------------------------	----

4.3 - Primeiros Estudos	23
-------------------------------	----

4.4 - Primeiras Conclusões	28
----------------------------------	----

4.5 - Variação de Roda Equivalente entre os Limites Determinados	28
--	----

4.6 - Correlação das Profundidades Limites com "d" e "S"	29
5 - Trabalhos Principais do Corpo de Engenheiros	
5.1 - Finalidade	31
5.2 - Primeiro Trabalho	32
5.3 - Segundo Trabalho	35
5.4 - Terceiro Trabalho	35
5.5 - Quarto Trabalho	36
6 - Novo Critério da Roda Equivalente	39
7 - Expressão Matemática das Curvas de Dimensionamento pelo Método do CBR	43
8 - Consolidação do Critério do CBR para Pavimentos Flexíveis	48
C - ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE COMPUTAÇÃO AUTOMÁTICA	
1 - Teoria Usada na Programação	
1.1 - Para o Cálculo da Roda Equivalente	55
1.2 - Determinação das Integrais Elípticas	57
1.3 - Para Determinação da Espessura Necessária	60
2 - O Programa	
2.1 - Estruturação	61
2.2 - Observações e Simplificações do Programa	68
2.3 - Limitações do Programa	69
2.4 - Cartões de Entrada	69
2.5 - Resumo e Format	76
2.6 - Tempo de Computação	78
2.7 - Diagrama de Blocos	79
2.8 - Listagem	83

D - APLICAÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO	100
E - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO COM AUXÍLIO DO PROGRAMA AUTOMÁTICO	104
APÊNDICE I - REPETIÇÃO DE CARGAS EM AEROPORTOS. COBERTURA	
1 - Conceito de Cobertura	115
2 - Sequência do Estudo da Repetição de Cargas em Pavimentos	115
3 - Determinação da Cobertura	117
APÊNDICE II - ROTEIRO PARA UM DIMENSIONAMENTO . GRÁFICOS	127
REFERÊNCIAS	150

A. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos flexíveis (revestimento de mistura betuminosa, bases e sub-bases granulares) de aeroportos, foi objeto de importantes pesquisas nos E.U.A. durante a Segunda Guerra Mundial, quando do advento da aeronave de bombardeio B-29, dotada de rodas múltiplas.

O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos foi incumbido de resolver este problema de dimensionamento, visto que, até então, somente se dispunha de ábacos aplicáveis a rodas simples.

A maioria dos estudos foi realizada no WATERWAYS EXPERIMENT STATION, em Vicksburg, Mississippi, contando-se com a assessoria de conhecidos especialistas de Mecânica dos Solos (A. Casagrande, O.J. Porter).

No pós-guerra prosseguiram os estudos, com maior apoio teórico. Baseando-se no trabalho teórico de LOVE, os engenheiros do WES, Ahlvin e Foster (10), desenvolveram um critério de determinação da carga de roda equivalente que hoje vigora.

Paralelamente, outra pesquisa era feita visando dar um tratamento teórico ao método do CBR de dimensionamento. Isto foi conseguido em 1957 após um trabalho de Turnbull e Ahlvin (11).

Em 1962, Ahlvin (12) consolidou o dimensionamento pelo método do CBR para qualquer tipo de distribuição de rodas.

O Brasil prepara-se para receber grandes aviões como o DC.10, o Concorde, o Boeing 2707, etc. Muitas pistas de aeroportos começam a ser construídas para satisfazerem às exigências dessas aeronaves, cujo peso eleva-se a 300 toneladas.

Considerando que não dispunhamos de pesquisa suficiente sobre a mecânica dos pavimentos flexíveis, segundo o enfoque dado pelo Corpo de Engenheiros, que os problemas de dimensionamento que surgem com as novas e gigantescas aeronaves envolvem um conhecimento mais profundo da teoria básica, e que os elementos necessários à solução destes problemas de dimensionamento, chegam-nos atrasados e sem os esclarecimentos indispensáveis à sua boa compreensão, achamos útil tentar preencher esta lacuna, no projeto estrutural de pavimentos de aeroportos.

Com essa finalidade, dispusemo-nos a rever a teoria básica do dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos como preliminar à programação automática do dimensionamento que atenderesse às solicitações atuais e futuras.

B. REVISÃO E LITERATURA

1 - O PROBLEMA DE BOUSSINESQ

1.1 - CARGA CONCENTRADA

Boussinesq (1) foi o primeiro a resolver o problema em que se determinam os esforços, em qualquer ponto de um meio semi-infinito, produzidos por uma carga vertical concentrada, atuando na superfície horizontal, sendo este meio homogêneo, isótropo e linearmente elástico (FIG. B.1)

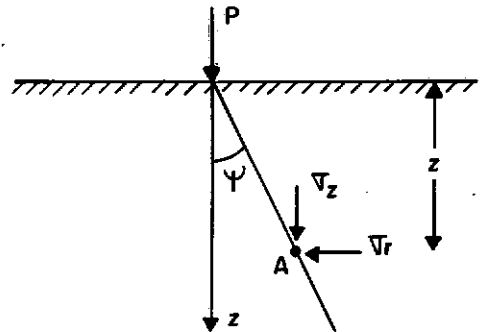


FIG. B.1

As tensões vertical e radial, em um ponto A qualquer, são dadas pelas fórmulas (não sendo considerado o peso próprio):

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{\cos^5 \psi}{z^2} \quad (B.1)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi z^2} \left\{ 3\cos^3 \psi \cdot \sin^2 \psi - (1-2\nu) \frac{\cos^2 \psi}{1+\cos \psi} \right\} \quad (B.2)$$

onde

P = carga concentrada

z = profundidade

ψ = ângulo entre o vetor posição de A e o eixo z

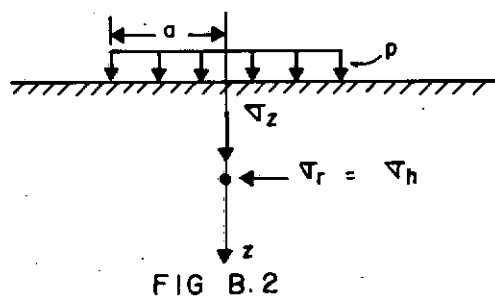
ν = coeficiente de Poisson

1.2 - CARGA CIRCULAR UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA:

1.2.1 - Tensões

A partir da solução inicial de Boussinesq, considerando a carga concentrada, novos casos (2) foram resolvidos.

Os esforços ao longo da normal baixada ao centro de uma carga circular uniformemente distribuída (FIG. B.2), podem ser obtidos integrando as equações correspondentes à carga concentrada em toda a área circular, resultando:



$$\sigma_z = p \left\{ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right\} \quad (B.3)$$

$$\sigma_r = \sigma_h = \frac{p}{2} \left\{ 1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right\} \quad (B.4)$$

onde

a = raio da placa circular

p = pressão de contato na placa circular (uniforme)

1.1.2 - Deformações

Considerando um pequeno elemento de solo à profundidade " z " abaixo da superfície e conhecendo-se as tensões vertical e horizontal num ponto abaixo do centro da placa, a sua deformação elástica

(FIG. B.3), pela teoria da Elasticidade é:

$$\delta = \frac{1}{E_m} \{ \sigma_z - 2\nu\sigma_r \} \quad (B.5)$$

onde:

δ = deformação elástica

E_m = módulo de elasticidade do meio

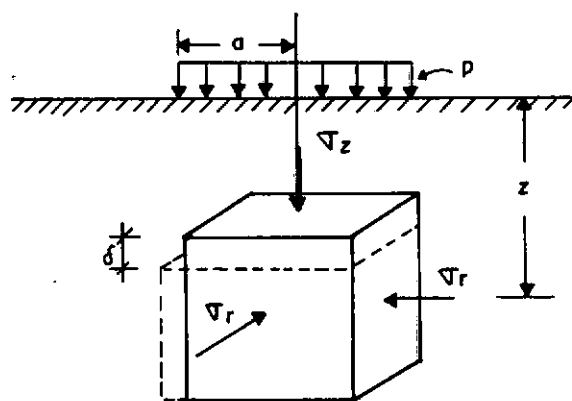


FIG B.3

Substituindo as equações B.3 e B.5 e integrando entre $z=z$ e $z=\infty$ resulta a equação que dá a deflexão em qualquer ponto sob o centro da placa flexível:

$$\Delta = \frac{pa}{E_m} \left\{ \frac{(2-2\nu)(1+(z/a)^2)^{1/2}}{1+(z/a)^2} - \frac{(1+\nu)(z/a)^2}{\{1+(z/a)^2\}^{1/2}} + (1+2\nu-1)z/a \right\} \quad (B.6)$$

A expressão entre chaves é denominada fator de deflexão (F) sendo dependente apenas do coeficiente de Poisson e da profundidade, em unidades de raio do carregamento circular.

Para $\nu=0,5$ a equação B.6, simplifica-se:

$$\Delta = \frac{3pa^2}{2E_m(a^2+z^2)^{1/2}} \quad (B.7)$$

ou

$$\Delta = \frac{pa}{E_m} (F) \quad (B.8)$$

onde

$$F = \frac{3}{2} \frac{1}{\{1+(z/a)^2\}^{1/2}} \quad (B.9)$$

Neste caso, na expressão de F não aparece o coeficiente de Poisson e a equação B.8 é conhecida como equação de recalque de Boussinesq, para deflexões sob o centro da placa flexível.

2 - A CONTRIBUIÇÃO DE LOVE:

A.E.H. LOVE (3) em 1929, deu um tratamento mais geral ao problema de um carregamento circular uniforme, tornando o seu trabalho um dos mais importantes no assunto.

Existia um trabalho anterior ao de Love, desenvolvido por Terazawa, porém era aplicável somente a um limite circular de carregamento e em casos de pressão distribuída simetricamente sobre o centro. Na sua forma de solução, os componentes de deslocamentos e tensões são expressos em termos de integrais simples envolvendo funções de Bessel. Love chamou esse método de "Método da Função de Bessel".

A solução de Love, que considera como Boussinesq, um espaço semi-infinito, e o material homogêneo, isotrópico e linearmente elástico, aplica-se para carregamentos circulares e retangulares e não obrigatoriamente uniformes.

Os componentes de tensões e deslocamentos em qualquer ponto do sólido, são expressos em derivadas parciais de primeira e segunda ordem de uma certa função " χ " chamada por Boussi

nesq de "O Potencial Logaritmico a Tres Variáveis" (Equação B.10), cuja dificuldade de avaliação da integral foi o obstáculo principal da resolução do problema, e uma função convenientemente introduzida "V", denominada "Potencial Newtoniano de uma Superfície de Distribuição" (Equação B.11). Nessas expressões encontramos também duas constantes, chamadas constantes elásticas de Lamé "λ" e "μ" (Equações B.12 a B.15).

$$x = p \iint \log \{z + \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}\} dx' dy' \quad (B.10)$$

$$V = p \iint \frac{dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} \quad (B.11)$$

onde:

x, y, z = coordenadas do ponto dentro do sólido onde se deseja calcular as tensões e deslocamentos.

$x', y', 0$ = coordenadas do ponto da superfície sobre a qual o elemento de pressão $p dx' dy'$ é aplicado.

$$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = \nu \quad (B.12)$$

$$\frac{\mu}{\lambda + \mu} = 1 - 2\nu \quad (B.13)$$

$$\frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} = E_m \quad (B.14)$$

$$\frac{1}{\lambda + \mu} = \frac{2(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E_m} \quad (B.15)$$

Primeiramente, Love apresenta as expressões de tensões e deslocamentos em coordenadas retangulares para uma pressão "p" constante, cujas expressões dos deslocamentos diz pertencer a Hertz.

Para o caso que nos irá interessar no desenvolvimento deste trabalho - carregamento circular - apresenta as expressões referidas acima em termos de coordenadas cilíndricas por serem mais apropriadas. Essas expressões são:

$$u_{\rho} = - \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\lambda+\mu} \frac{\partial \chi}{\partial \rho} + \frac{z}{\mu} \frac{\partial V}{\partial \rho} \right\} \quad (B.16)$$

$$u_z = \frac{1}{4\pi\mu} \left\{ \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} V - \frac{\partial V}{\partial z} z \right\} \quad (B.17)$$

$$\rho\rho = \sigma_{\rho} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\lambda}{(\lambda+\mu)} \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\mu}{(\lambda+\mu)} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \rho^2} - z \frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} \right\} \quad (B.18)$$

$$\omega\omega = \sigma_{\theta} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\lambda}{(\lambda+\mu)} \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\mu}{(\lambda+\mu)} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \chi}{\partial \rho} - \frac{z}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \rho} \right\} \quad (B.19)$$

$$zz = \sigma_z = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial V}{\partial z} - z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right\} \quad (B.20)$$

$$\rho z = \tau_{\rho z} = - \frac{z}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial \rho \partial z} \quad (B.21)$$

Os valores para a primeira e segunda derivada parcial de χ e V com respeito a ρ ($\partial \chi / \partial \rho$, $\partial^2 \chi / \partial \rho^2$, $\partial V / \partial \rho$, $\partial^2 V / \partial \rho^2$) foram obtidos aplicando o teorema de Green, integrando por partes e substituindo uma identidade pelo valor da função trigonométrica do numerador. As partes resultantes foram integradas separadamente com alguns termos, sendo transformados em formas conhecidas de in-

tegrais elípticas.

Os valores da primeira e segunda derivada parcial de V com respeito a z ($\partial V/\partial z$, $\partial^2 V/\partial z^2$) e a segunda derivada parcial de χ com respeito a z ($\partial^2 \chi/\partial z^2$), foram determinadas pelas derivadas de χ e V com respeito a ρ , em conjugação com as relações: $\nabla^2 \chi = 0$, $\nabla^2 V = 0$ e $\partial \chi/\partial z = V$, onde:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Os métodos usados por Love para determinação das derivadas precedentes com respeito a ρ e z não são adaptáveis à integração de $\partial \chi/\partial z = V$, logo, V teve que ser avaliado por outra maneira.

Love, no seu trabalho, diz: "Conhece-se uma expressão para V sob a forma de uma integral elíptica", todavia, não a apresenta. Faz referência à expressão de F.W. Dyson para o potencial de um disco elíptico fino como uma integral simples, que no caso de um disco circular, assume a seguinte forma:

$$V = 2pa^2 \int_{\lambda_1}^{\infty} \sqrt{\left(1 - \frac{\rho^2}{a^2 + \psi} - \frac{z^2}{\psi}\right)} \frac{d\psi}{(a^2 + \psi)\sqrt{\psi}} \quad (\text{B.22})$$

onde

$$\lambda_1 = \text{raiz positiva da equação } \frac{\rho^2}{a^2 + \lambda} + \frac{z^2}{\lambda} = 1$$

ψ = função de fluxo de Stokes ("Stokes stream-function")

A expressão de $\partial V/\partial z$ apresentada por Love é a seguinte:

$$\partial V / \partial z = -2p \{ K' E(k, \theta) - (K' - E') f(k, \theta) - K' k \sin \theta \} \quad (B.23)$$

Um valor para $\partial V / \partial z$ com a forma de integral simples, obtida da relação $\nabla^2 \chi = 0$, foi integrado para se obter o valor de V . Esta determinação foi feita pelo WES (Waterways Experiment Station), pois como já dissemos, Love não a apresentou, apenas a citou. Este valor foi mais tarde confirmado por transformações dos termos de Terazawa.

$$V = -2p\pi (z-r) \quad \text{para } \rho=0 \quad (B.24)$$

$$V = -2p \left\{ z(\pi - J) - \frac{1}{R_2} \{ R_2^2 E' + (r^2 - \rho^2) K' \} \right\} \quad \text{para } \rho < r \quad (B.25)$$

$$V = p \{ -\pi z + 2R_2 E' \} \quad \text{para } \rho = r \quad (B.26)$$

$$V = -2p \left\{ zJ - \frac{1}{R_2} E' + (r^2 - \rho^2) K' \right\} \quad \text{para } \rho > r \quad (B.27)$$

onde

$K, K', F(k, \phi)$ = integrais elípticas de primeira espécie, sendo K e K' completas e $F(k, \phi)$ incompleta.

$E, E', E(k, \phi)$ = integrais elípticas de segunda espécie, sendo E e E' completas e $E(k, \phi)$ incompleta.

$$\phi = \arcsin z/R_1$$

$$k = R_1/R_2$$

$$J = K' E(k, \phi) - (K' - E') F(k, \phi)$$

outros dados : FIG B.4

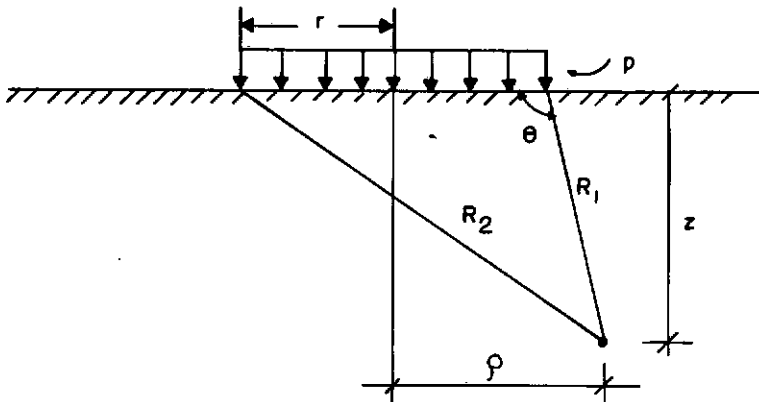


FIG B.4

3 - INICIO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DO CBR:

3.1 - PRIMEIROS ESTUDOS:

Em 1928 e 1929 (4), a Divisão de Rodovias da Califórnia fez uma intensa investigação de pavimentos apresentando sinais de rutura, nas rodovias do Estado.

Investigou-se as condições de drenagem e outros fatores que influenciavam a estabilidade do pavimento nas áreas com rutura. Amostras indeformadas foram obtidas para fornecer informações quanto à densidade e umidade dos materiais abaixo do pavimento. Em consequência, tres tipos principais de rutura de pavimentos foram apontados:

- 1) Deslocamento lateral do material do subleito devido a ter o pavimento absorvido água e enfraquecido após construção.
- 2) Recalque diferencial dos materiais abaixo do pavimento.
- 3) Deflexão excessiva dos materiais abaixo do pavimento,

resultante da repetição de cargas.

Os tipos 1 e 2 eram devidos principalmente à compactação insuficiente, enquanto o tipo 3, achou-se ser devido à espessura insuficiente, e também à pouca resistência ao cisalhamento dos materiais de base.

Tornava-se necessário, então, um método de ensaio que fosse satisfatório, para estabelecer a densidade a ser usada em sub-bases e a resistência ao cisalhamento que fosse necessária. Seria desejável, também, que o ensaio fosse simples e rápido, para avaliar as qualidades dos materiais do subleito, sub-base e base.

Experimentou-se, principalmente, provas de carga estática no campo. Eram estas largamente influenciadas pela deformação plástica e elástica do material abaixo do ensaiado, assim como pela sua umidade e densidade. Também não era possível no campo, impor as condições mais desfavoráveis de umidade, em locais atingidos pela carga. Assim, estes ensaios não representavam a condição final e a ação do subleito durante o uso.

3.2 - ENSAIO CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO):

Foi criado em 1929 um novo ensaio que se chamou de ensaio CBR (California Bearing Ratio), com a finalidade de eliminar algumas das dificuldades das provas de carga no campo, e de poder comparar, de um modo rápido, materiais de bases e sub-bases locais, a fim de reforçar os subleitos.

Após ser compactada a uma certa umidade, a amostra de dimensões padronizadas, é colocada na água durante quatro dias com uma sobrecarga representativa do peso do pavimento, a fim de representar condições críticas do campo. Logo em seguida, faz-se a penetração da amostra por um pistão, determinando assim, sua resistência ao deslocamento lateral e medindo-se a influência combinada de coesão e atrito interno. Este procedimento elimina a maior parte da deformação de consolidação que havia nos ensaios de campo.

Vários ensaios foram realizados com materiais (pedra britada) tidos como representativos da alta qualidade dos materiais de base. A média desses valores foi convencionada representar CBR=100. O resultado dos ensaios é expresso então como uma percentagem do valor da brita.

3.3 - AS PRIMEIRAS CURVAS DE DIMENSIONAMENTO:

Experiências realizadas entre 1928 e 1942 pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia, em pavimentos satisfatórios e naqueles que se haviam rompido, forneceram elementos para o estabelecimento da relação empírica entre os valores de CBR e as espessuras necessárias de revestimento e base, para suportar adequadamente o tráfego.

Duas curvas (FIG. B.5), A e B, foram traçadas. A

curva "B" representa valores de pesquisas originais pelo Departamento de Materiais e Pesquisas daquele organismo, indicando a espessura mínima para um pavimento destinado a tráfego leve.

A Curva "A", usada em 1942, também pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia, indica a espessura de revestimento e base sobre o subleito adequada para o tráfego rodoviário em condições médias.

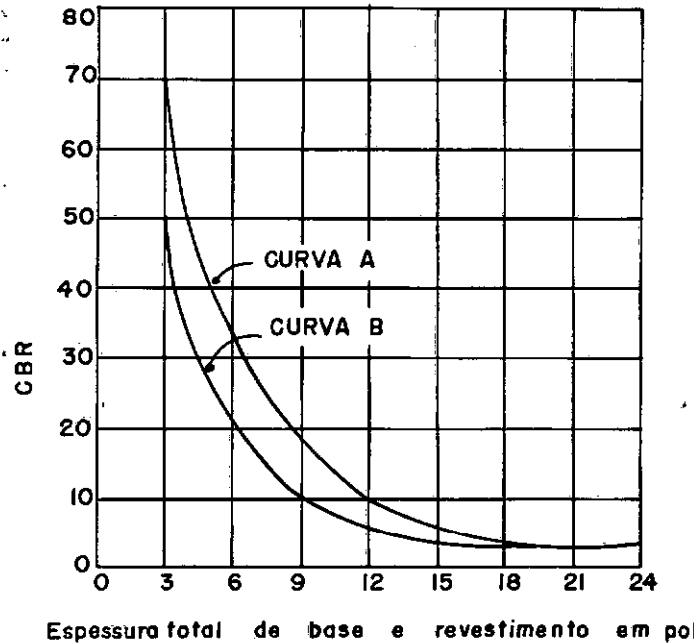


FIG 8.5 (REF. 4 PAG. 466)

Foi fixado que o revestimento não poderia ser menor que tres polegadas e que nenhum revestimento poderia se apoiar diretamente sobre uma base de CBR menor que 50.

Estas curvas poderiam ser usadas para dimensionamento de camadas sucessivas, obrigando-se apenas que a superior fosse de qualidade melhor do que a inferior.

3.4 - ADOÇÃO DO MÉTODO DO CBR PELO CORPO DE ENGENHEIROS:

No início da Segunda Guerra Mundial, o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (5) necessitava de um método de dimensionamento exclusivamente para aeroportos, pois os existentes eram destinados a pavimentos rodoviários. Porém o desenvolvimento de um método inteiramente novo não era possível devido à emergência da guerra.

Resolveu-se então examinar os métodos existentes e a escolha

recairia naquele mais facilmente aplicável a aeroportos. Os principais critérios para a escolha foram:

1. Simplicidade dos ensaios do material do subleito e dos materiais componentes do pavimento.
2. Um acervo de experiência satisfatório.
3. Possibilidade de adaptação rápida ao problema aeroportuário.

O escolhido foi o Método do CBR, que permitia com um ensaio de solo relativamente simples, determinar as espessuras necessárias para sub-base, base e revestimento.

3.5 - ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DO CBR AOS PAVIMENTOS DE AEROPORTOS:

Para fazer uso dos ábacos de dimensionamento, era necessário avaliar as curvas A e B em termos de tráfego de aeronaves. Três fatores foram considerados para a conversão:

1. Pesos relativos dos veículos carregados.
2. Características dos pneus dos veículos rodoviários e das aeronaves.
3. Distribuição lateral do tráfego.

A curva escolhida como base da conversão foi a "A", por apresentar maior segurança. Considerou-se então esta curva como representativa do tráfego rodoviário para 9.000 lb (4.082 kgf) de carga por roda, pois esta era a carga dos caminhões que trafegavam nas estradas que não apresentaram falhas no pavimento.

A pressão dos pneus em rodovias permitia uma deformação média dos mesmos, menor que 10%, enquanto nas aeronaves, esta deformação era em torno de 35%, permitindo assim maior área de contato para uma dada carga.

Por outro lado, o tráfego nas estradas foi considerado ser bem canalizado, enquanto nos aeroportos, as limitadas informações, indicaram que o tráfego era bastante desordenado, com cerca de 50% dele concentrado no terço central da pista.

Baseados nestas observações - deformação dos pneus e distribuição do tráfego - e levando em conta que os dados sendo limitados, necessariamente precisariam ser suplementados por futuros ensaios e observações, foi decidido ser a curva A representativa de uma aeronave com 12.000 lb (5.443 kgf) por roda.

A curva B, com essa assimilação, passou a representar a carga de uma roda com 7.000 lb (3.175 kgf), que significava na época o tráfego mais leve dos aeroportos.

3.6 - EXTRAPOLAÇÃO PARA NOVAS CURVAS:

Estabelecidas as curvas básicas, tornava-se necessário uma extrapolação para determinação de novas curvas destinadas a aviões mais pesados.

De acordo com os ensaios conduzidos pelo Corpo de Engenheiros, um adequado dimensionamento deveria ser feito, levando-se em conta três fatores principais:

- a. deflexão do subleito
- b. compactação da base e revestimento
- c. deformação elástica

Pesquisas e dados mostraram que a deformação elástica predominava num extenso período de uso. Então, decidiu-se desenvolver a extrapolação das curvas empíricas, com base na Teoria da Elasticidade.

Como todas as provas de carga, inclusive o CBR, eram essencialmente de cisalhamento e ainda, a deformação cisalhante deveria ser eliminada num pavimento satisfatório, a tensão cisalhante, pela Teoria da Elasticidade, foi usada como padrão na extrapolação.

Uma revisão dos dados indicou ser de 60 lb/pol^2 ($4,2 \text{ kgf/cm}^2$) a pressão uniforme de contato dos pneus mais usados nos aviões.

Na época, a carga por roda das aeronaves variava entre 25.000 lb e 70.000 lb. Escolheu-se, então, os valores de 25.000, 40.000 e 70.000 lb para abranger na extrapolação, a variedade de carga por roda dos aviões mais pesados.

Embora a elíptica se assemelhasse mais à forma real das áreas de contato dos pneus, usou-se a forma circular, para maior simplicidade nos cálculos e também porque foi visto que a diferença de tensão cisalhante na base e subleito, não variava substancialmente, pela consideração da área elíptica para circular.

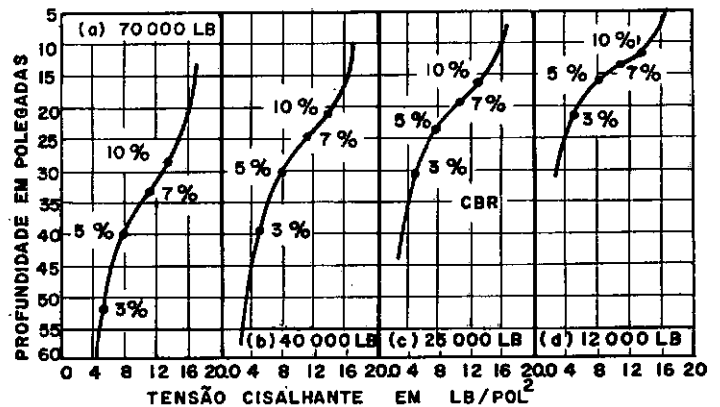


FIG. B.6 (REF. 5 PAG.469)

Roteiro da Extrapolação:

- Calculou-se as áreas de contato, supostas de forma circular, para cargas de 12.000, 25.000, 40.000 e 70.000 lb com pressão de contato 60 lb/pol^2 ($4,2 \text{ kgf/cm}^2$).

- Determinou-se, pela Teoria da Elasticidade, as tensões cisalhantes para várias profundidades e traçou-se, então, para cada carga, uma curva tensão de cisalhamento "versus" profundidade (espessura).

- Na curva de 12.000 lb foram marcados pontos relativos às espessuras correspondentes a CBR de 3, 5, 7 e 10 tiradas da curva A, e anotadas as tensões cisalhantes correspondentes a esses pontos (FIG. B.6)

- Considerando que os pontos de mesma tensão necessitariam de mesmo CBR, marcou-se, nas outras curvas, pontos que correspondiam às tensões relativas a CBR de 3, 5, 7 e 10 da curva A e com isso obteve-se as espessuras necessárias àquelas tensões ou valores de CBR (FIG. B.6).

Estas curvas foram apresentadas num encontro de consultores em Washington DC, presente os técnicos do Corpo de Engenheiros, O.J. Porter, que desenvolveu o método do CBR para pavimentos rodoviários e Arthur Casagrande.

Cada um tinha seu método próprio de extrapolação. O Engenheiro Porter baseou-se numa deformação tolerável para várias cargas, enquanto o Professor Casagrande baseou-se nas relações entre o tamanho relativo das áreas carregadas.

Todos os três métodos apresentaram aproximação substancial nos resultados. Decidiu-se então que a média das espessuras apresentadas pelos três métodos seria razoável para baixos valores de CBR, enquanto que, para valores altos de CBR, a maioria dos membros concordou na adoção das espessuras menos conservativas.

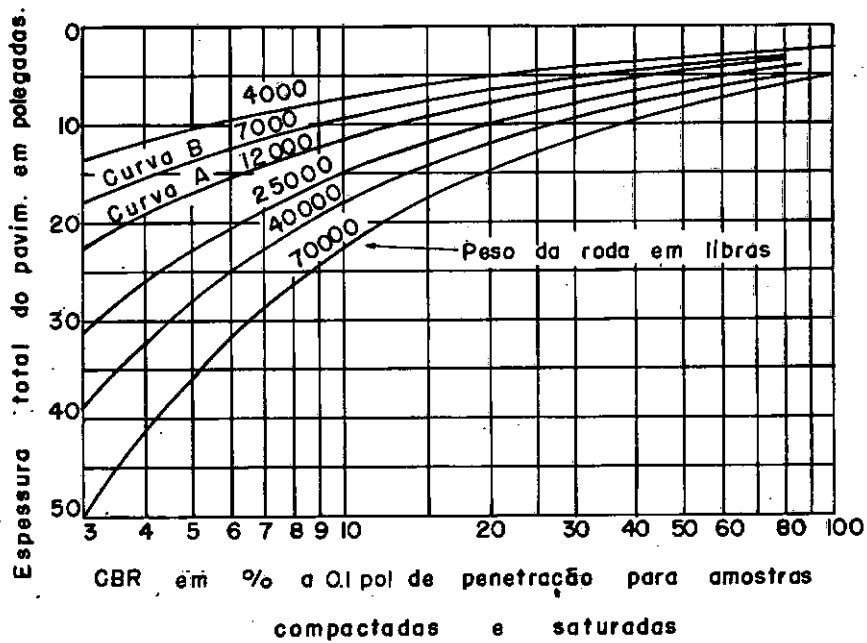


FIG. B.7 (REF. 5 PAG. 470)

De acordo com esses estudos e resoluções, apresentaram o primeiro grupo de curvas de dimensionamento (FIG. B.7).

Neste mesmo encontro, resolveu-se iniciar um programa de ensaios de campo e laboratório, para comprovar as curvas esboçadas, antes de colocá-las em uso no dimensionamento de aeroportos.

De um modo geral, os resultados confirmaram as curvas provisórias de dimensionamento e nenhuma mudança apreciável foi necessária.

Observou-se, porém, que o estudo teórico parecia fornecer espessuras excessivas para valores altos de CBR e espessuras insuficientes para cargas móveis mais elevadas e CBR baixos. Com isso, as curvas básicas sofreram um pequeno ajuste aos resultados das pesquisas experimentais.

4 - PRIMEIRA CONSIDERAÇÃO DA RODA EQUIVALENTE:

4.1 - NECESSIDADE:

Quando já próximo do fim da Segunda Guerra (6), entrou em ope

ração o Bombardeiro B-29, cujo trem de pouso contava, nas pernas principais, com rodas duplas espaçadas de 37,5 pol (95 cm).

O Corpo de Engenheiros foi então requisitado pela Força Aérea dos E.U.A. para iniciar um estudo que desenvolvesse curvas de dimensionamento de pavimentos flexíveis para o B-29, pois as existentes aplicavam-se somente a rodas simples.

4.2 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente fêz-se um diagrama esquemático da influência de uma das pernas principais do B-29 numa base de pequena espessura e numa base espessa (FIG. B.8). As distribuições mostradas não representavam nenhum caso particular, foram apenas usadas com o propósito de iniciar um estudo.

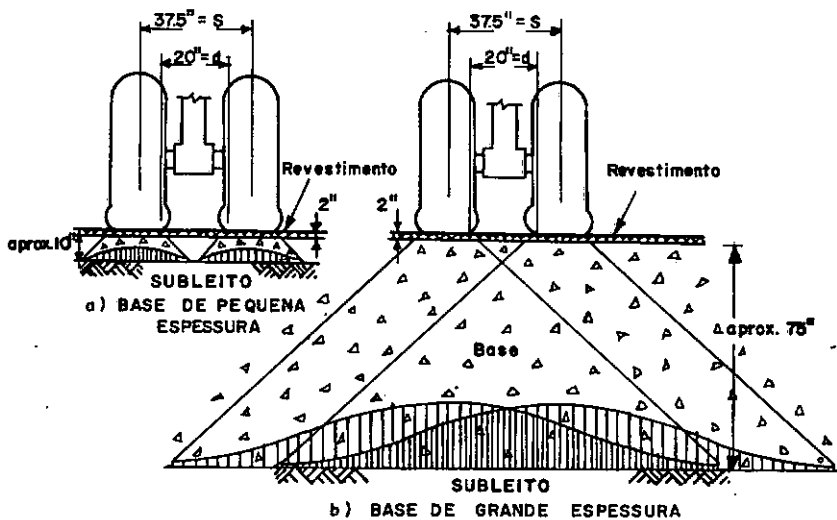


FIG. B.8 (REF. 6 PAG. 534)

No primeiro caso - base de pequena espessura - as duas rodas do conjunto determinam no subleito, pressões como se fossem independentes, não ocorrendo, praticamente, superposição de efeitos.

No segundo caso - base espessa - as tensões provocadas por cada roda, superpõem-se bastante, e praticamente equivalem às produzidas por uma roda única com o peso total das duas.

Cada conjunto de rodas do B-29 pesava 60.000 lb (30.000 lb por roda). Assim, seria razoável que as curvas de dimensionamento para o B-29 variassem entre as de 30.000 lb e 60.000 lb para roda simples.

Com essas considerações, o problema de determinação de curvas de dimensionamento de rodas duplas para o B-29, foi dirigido à pesquisa de:

- A espessura na qual cada roda atuaria no subleito como unidade independente;
- A espessura a partir da qual as duas rodas atuariam no subleito como se fossem uma única.

A busca destas duas espessuras, foi realizada teórica e praticamente por comparações de tensões verticais, tensões cisalhantes e deflexões.

No estudo teórico foram usadas fórmulas de Boussinesq, assumindo-se o material homogêneo, isótropo e linearmente elástico e os gráficos de tensões do Prof. Newmark. No empírico, foram realizadas experiências em Stockton e Marietta.

4.3 - PRIMEIROS ESTUDOS:

4.3.1 - Tensão Vertical:

Na FIG. B.9.a, as três curvas teóricas apresentadas, represen-

tam as tensões verticais máximas calculadas sob roda simples de 30.000 lb, roda dupla de 60.000 lb, e roda simples de 60.000 lb.

Também pontos estão marcados representando as tensões obtidas de medições em células de pressão colocadas no pavimento sob o B-29 (roda dupla de 60.000 lb) e sob o B-24 (roda simples de 30.000 lb)

A correlação entre os resultados teóricos e práticos foi considerada estar dentro de razoável aproximação.

Nota-se que até 17 pol aproximadamente, a curva do B-29 (roda dupla) coincide com a de roda simples de 30.000 lb. Da mesma forma, a curva do B-29, a partir de 80 pol, de profundidade, torna-se idêntica a da roda simples de 60.000 lb.

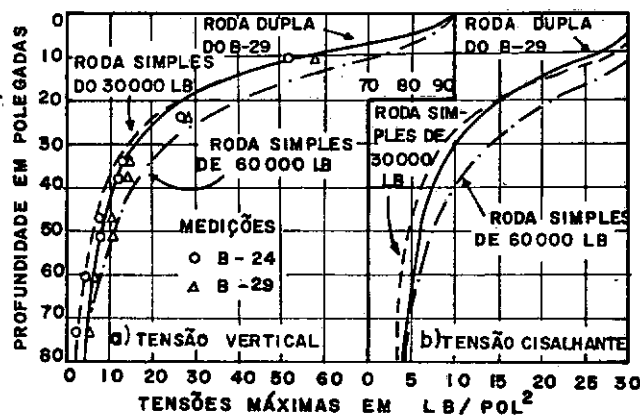


FIG. B-9 (REF. 6 PAG. 535)

Então, o estudo da tensão vertical máxima estabeleceu as espessuras desejadas em 17 e 80 pol, isto é, espessura em que cada roda atuaria como independente e a espessura em que atuariam juntas como uma só, respectivamente.

4.3.2 - TENSÃO CISALHANTE:

Na FIG. B.9.b são apresentadas três curvas de máxima tensão cisalhante para roda simples de 30.000 lb, roda dupla de 60.000 lb e roda simples de 60.000 lb.

Observa-se que a curva do B-29 coincide com a da roda sim -

ples de 30.000 lb em torno de 20 pol. O fato da curva representativa do B-29 mostrar tensões menores que a curva de 30.000 lb até esta profundidade é atribuído à hipótese de não se ter considerado o peso do solo no cálculo. Então, faz-se acreditar que as duas curvas mencionadas são idênticas até a profundidade de 20 pol.

Da mesma forma, observa-se que a partir de 70 polegadas, a curva do B-29 coincide com a da roda simples de 60.000 lb.

Assim, a análise teórica da tensão cisalhante máxima, limitou as espessuras procuradas em 20 e 70 pol.

4.3.3 - DEFLEXÃO DO SUBLEITO:

Este estudo foi feito usando o método gráfico; os dados experimentais para o método acima foram tirados de ensaios realizados em Stockton e Marietta.

Somente os dados de Marietta se relacionavam com rodas duplas. Havia também lá, dados de rodas simples, porém não chegavam à ordem de grandeza de 60.000 lb, peso máximo combinado nas rodas do B-29. Foi necessário uma extrapolação. Esta se fez com dados de Stockton onde as medidas de deflexão com rodas simples variavam de 5.000 lb a 53.500 lb.

a. Resultados de Stockton.

Marcando-se as deflexões do subleito "versus" espessuras de pavimento, para valores constantes de cargas (FIG. B.10.a) e marcando-se deflexões do subleito "versus" cargas para espessuras de pavimentos constantes (FIG. B.10.b), os dados de Stockton mostraram que ambos os gráficos poderiam ser ex-

pressos por retas, usando-se escalas logarítmicas, para a gama de espessuras (10 a 15 pol) e peso de roda (5.000 a 53.500 lb) estudados.

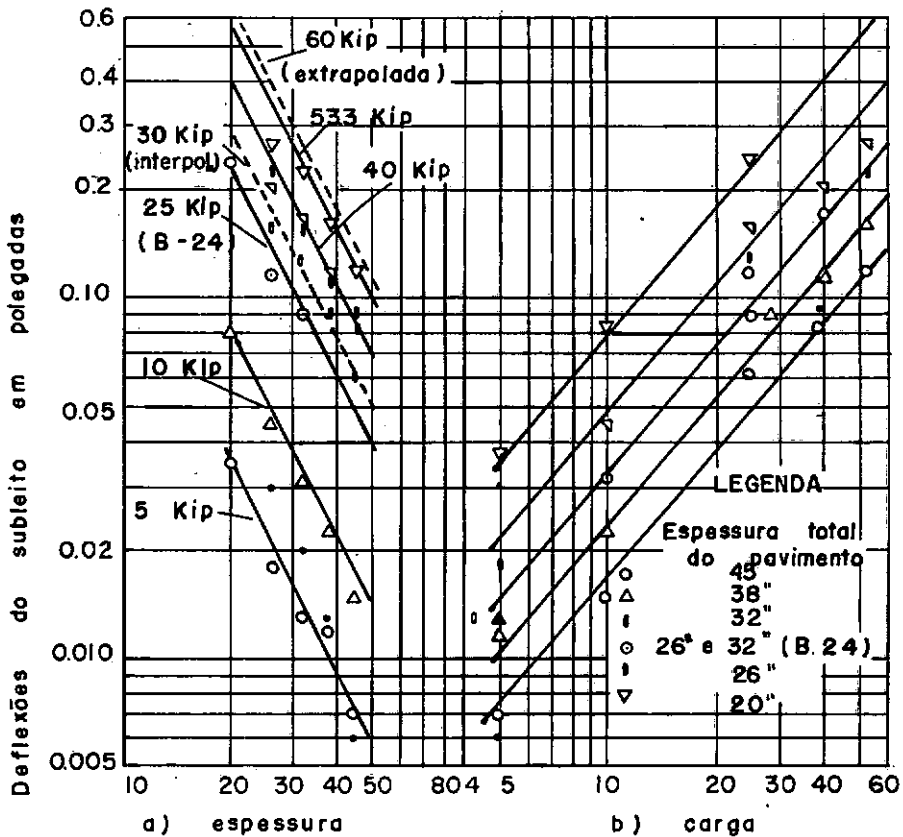


FIG B-10 (REF. 6 PAG. 536)

Com isso foram interpoladas e extrapoladas no mesmo gráfico (FIG. B.10.a), retas que representavam cargas de 30.000 e 60.000 lb, respectivamente, considerando-se que a extrapolação de 53.500 para 60.000 lb seria razoável por não se estender muito além da gama dos resultados obtidos.

Foram realizados ensaios com cargas móveis, sendo observado que a inclinação das retas era a mesma, o que variavam eram as deflexões, sendo menores para as cargas móveis.

b. Resultados de Marietta:

Estes resultados foram apresentados em dois gráficos: um pa

ra cargas estáticas e outro para cargas dinâmicas, representando ambos a média dos valores encontrados nas experiências.

Os ensaios foram divididos, como os de Stockton, em duas partes: deflexões do subleito "versus" espessuras de pavimento para cargas constantes, e deflexões do subleito "versus" carga, para espessuras de pavimento constantes.

Tanto as curvas de roda simples como as de duplas, foram representadas por retas paralelas, porém nos gráficos de deflexões do subleito "versus" espessuras de pavimento, a inclinação das retas de rodas duplas era menor que a de rodas simples. Isto indicava que, a espessura da base aumentando, as deflexões no subleito diminuíam a razões diferentes para roda simples e roda dupla. Porém, nos gráficos deflexão "versus" carga, para espessuras de pavimento constantes, as retas eram mutuamente paralelas. Isto significava que tanto a roda simples como a dupla crescem na mesma razão, quando são aumentadas as deflexões produzidas por ambas.

Extrapolações foram feitas para determinação da reta representativa da roda simples de 60.000 lb e para pontos de espessuras entre 10 e 80 pol .

Marcando-se retas (FIG. B.11) para cargas de roda de 30.000 lb simples, 60.000 lb duplas e 60.000 lb simples, observou-se que as rodas duplas do B-29 , para espessuras de pavimento iguais ou menores que 10 pol produziam deflexões no subleito iguais às de uma roda simples de 30.000 lb e para espessuras de pavimento maiores que 75 pol, o B-29 produzia defle -

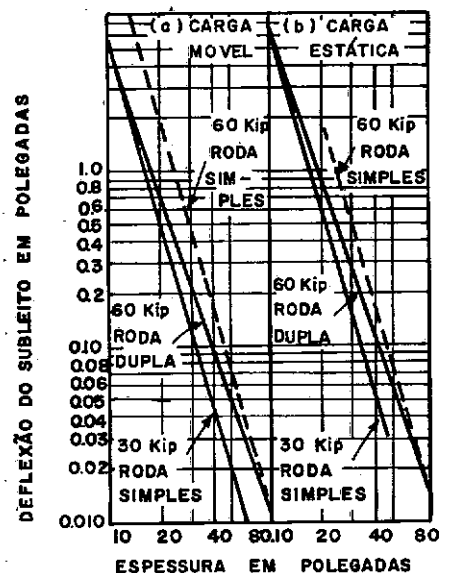


FIG.B11 (REF.6 PAG.539)

xões iguais às de uma roda simples de 60.000 lb.

4.4 - PRIMEIRAS CONCLUSÕES

Com base nas medidas de deflexão e análises teóricas de tensões, escolheu-se para a espessura em que a perna do B-29 passa a atuar como roda simples de 60.000 lb, o valor de 75 pol. Para o limite superior, até onde as pernas do B-29 atuam como roda simples de 30.000 lb, a escolha foi mais difícil, porém optou-se por 10 pol, o valor mais conservador, encontrado no critério de deflexão.

4.5 - VARIAÇÃO DA RODA EQUIVALENTE ENTRE OS LIMITES DETERMINADOS:

Determinada as espessuras limites, era necessária a determinação da variação da carga entre esses limites.

As curvas de dimensionamento existentes, relacionando numa escala semi-logarítmica espessura "versus" CBR, com cargas de roda constantes, foram dispostas para peso de roda "versus" espessura, para CBR constantes, porém, ambas com escalas logarítmicas (FIG. B.12).

Levando-se em consideração que as curvas deflexão "versus" peso ou espessura, comprovadas experimentalmente, variavam segundo retas em escalas logarítmicas, considerou-se que a roda equivalente variaria linearmente sobre o ábaco referido, nos limites encontrados.

PROCEDIMENTO ADOTADO:

Marcou-se um ponto de coordenadas 30.000 lb e 10 pol e outro de coordenadas 60.000 lb e 75 pol. Ligou-se os dois pontos por uma reta. Assim, as coordenadas do ponto de interseção entre a reta representativa do CBR do subleito e a reta traçada, indicaria a carga da roda simples equivalente e a espessura necessária ao pavimento (FIG. B.12).

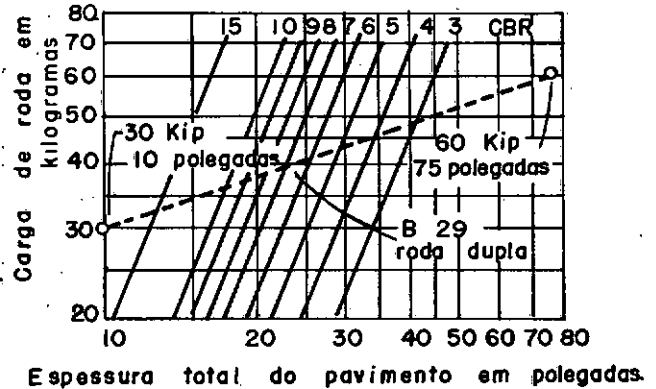


FIG. B.12 - (REF.6 PAG.543)

Com esse procedimento, assumia-se que a roda dupla que produzisse no subleito as mesmas tensões e deflexões que uma roda simples, requeria a mesma espessura necessária à roda simples que produzisse os mesmos efeitos.

Considerações teóricas mostraram todavia que a espessura para roda dupla, seria ligeiramente menor que para roda simples.

4.6 - CORRELAÇÃO DAS PROFUNDIDADES LÍMITES COM "d" E "S":

Para que esse método fosse estendido a outros tipos de trem de pouso, era necessário determinar, de um modo generalizado, essas duas espessuras especiais.

Pesquisando, percebeu-se que a profundidade até a qual as rodas atuavam como independentes, se relacionava com a distância entre as áreas

de contato dos pneus, denominada "d" (FIG. B.8). Fixou-se essa espessura em $d/2$.

A profundidade em que as rodas atuavam como uma única, notou-se ser governada pela distância entre centros das áreas de contato denominada "S". Fixou-se esta espessura em $2S$.

Para o trem de pouso que possui pernas em duplo tandem, de terminou-se o "d" como a distância entre as áreas de contato das rodas no mes mo eixo e "S" como sendo a distância entre os centros das áreas de contato das rodas em diagonal (FIG. B.13).

Determinadas as distâncias "d" e "S", o problema da roda equivalente poderia ser resolvido facilmente para qualquer aeronave, bastando que se fizessem curvas de dimensionamento similares à do B.29.

A título de exem plo, considerou-se uma aeronave fictícia com três disposições diferentes de rodas, nas pernas principais do seu trem de pouso triciclo: duas rodas simples, duas rodas duplas e dois duplo-tandem. Nos resultados teóricos, constatou-se:

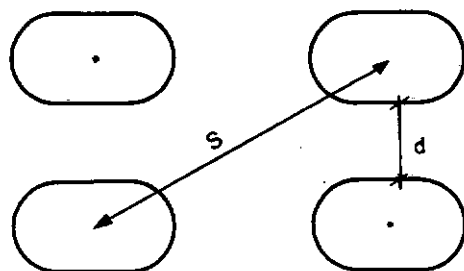


FIG. B.13

- para o duplo-tandem, as espessuras necessárias eram menores;
- um erro de 10% na determinação de "d" e "S" causaria uma variação de uma polegada na espessura, o que era pra ticamente desprezível.

Assim concluiu-se que na determinação da roda equivalente para vários conjuntos de rodas, este procedimento era razoável até que um método mais racional fosse desenvolvido.

5 - TRABALHOS PRINCIPAIS DO CORPO DE ENGENHEIROS:

5.1 - FINALIDADE:

O Corpo de Engenheiros havia adotado o método do CBR para dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos. Admitia-se ser o método do CBR essencialmente empírico.

A extensão das curvas de dimensionamento, além da gama dos dados experimentais, era feita por extrapolação e colocada em uso. Embora usando-se o bom senso, nessa extrapolação, procurava-se a confirmação através de novas experiências.

Isto não aconteceria com um método de conceitos teóricos comprovados, que ao ser aplicado a novas condições, se lhe pudesse atribuir um grau bem maior de precisão. Por isso, em 1942, logo após a adoção do método do CBR, o Corpo de Engenheiros iniciou estudos teóricos com determinações experimentais.

Medidas de tensões e deflexões sob várias rodas simples e múltiplas foram analisadas face a conceitos teóricos existentes. Percebeu-se que faltava um conhecimento teórico adequado que fornecesse soluções satisfatórias. A complexidade de tensões e deformações, resultantes das várias camadas e condições limites nas estruturas de pavimentos flexíveis, foi considerada impossível de resolver com base no conhecimento teórico então existente. Conclu-

iu-se ser necessário um conhecimento básico adicional antes que se pudesse formular uma solução adequada do problema.

O programa de pesquisas foi reorientado em 1946 com a finalidade de desenvolver um melhor entendimento básico do comportamento dos revestimentos, bases e subleitos, quando sujeitos a cargas de roda. Todos os objetivos do programa orientaram-se em direção à formulação de procedimentos práticos de dimensionamento, mas compatíveis com conceitos teóricos comprovados.

Decidiu-se iniciar o programa com investigações do caso mais simples possível: considerar o pavimento mais subleito como um meio homogêneo. Depois então, estudar casos mais complexos como duas camadas e em seguida três camadas.

O programa intitulou-se: "INVESTIGATIONS OF PRESSURES AND DEFLECTIONS FOR FLEXIBLE PAVEMENTS" e foi preparado pelo WES de Vicksburg, Mississippi.

5.2 - PRIMEIRO TRABALHO: "HOMOGENEOUS CLAYEY-SILT TEST SECTION" - Março/51 (7)

Apresenta resultados da investigação de tensões e deflexões produzidas dentro de uma massa de solo homogênea de argila siltosa, por carga de roda simples e dupla, com carregamento circular uniforme, aplicado em sua superfície. Apresenta, também, dados de tensões residuais na massa de solo. Os resultados foram obtidos entre julho de 1947 e abril de 1948 no WES.

5.2.1 - Objetivos:

Três linhas principais foram seguidas:

a) Determinar até onde seria possível estender a Teoria da

Elasticidade para aplicação a solos, ou obter dados sobre os quais os princípios de distribuição de tensões nos solos, pudessem ser desenvolvidos.

b) Determinar métodos de medida das propriedades do solo , de modo que a determinação descrita em "a" pudesse ser utilizada com base num dimensionamento racional.

c) Desenvolvimento de um método racional para o dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos, adaptando e incorporando partes do já existente.

De acordo com os objetivos, um programa de pesquisa foi assim dirigido:

- Medição de tensões e deflexões induzidas numa massa de solo homogêneo, por cargas simples e duplas, uniformes e circulares aplicadas na superfície. Obter um número suficiente de pontos nos planos de simetria para proporcionar perfis de tensões a várias profundidades.

- Determinação de erros prováveis das leituras obtidas das células de pressão e medidores de deflexão usados nos ensaios.

- Comparação dos valores de tensões obtidos nos ensaios com os determinados pela Teoria da Elasticidade.

- Comparação do desempenho de vários tipos de células de pressão e medidores de deflexão.

- Aquisição de possíveis informações sobre as tensões residuais.

5.2.2 - Cargas e Profundidades:

As cargas estáticas usadas foram de 15.000, 30.000, 45.000 e 60.000 lb, simulando efeitos de rodas simples e duplas de aeronaves.

As medidas tomadas chegaram à profundidade de 7 pés (2,13m) para tensões e 9 pés (2,74 m) para deflexões verticais.

5.2.3 - Acompanhamento Teórico:

As fórmulas matemáticas e os desenvolvimentos teóricos com põem um trabalho paralelo intitulado "ANÁLISES E COMPUTAÇÕES TEÓRICAS", onde as fórmulas, em sua maioria, provêm da Teoria da Elasticidade. Outros, dos gráficos de Newmark e algumas desenvolvidas pelo próprio WES.

O coeficiente de Poisson usado foi 0,5 e o índice de concentração de Griffith-Frohlich, que aparece em certas fórmulas, tomado igual a 3.

5.2.4 - Conclusões:

Além das que dizem respeito à aparelhagem usada, destacam-se:

a) A distribuição de tensões achada seguiu a mesma forma geral da Teoria da Elasticidade para um material homogêneo e isotrópico.

b) O uso do fator de concentração de Griffith não diminuiu a discrepância entre as tensões teóricas e as tensões medidas.

c) A aproximação entre as tensões e deflexões teóricas e as medidas não melhorou quando se fez variar o coeficiente de Poisson para 0 e 0,3, ao invés de 0,5.

d) Em todos os casos, a razão entre as deflexões medidas e a pressão de contato na superfície variou diretamente com a pressão de contato.

e) Em geral, as curvas tensão "versus" deformação traçadas com os dados obtidos, seguiram formas similares àquelas resultantes de triaxial rápido feito com amostras indeformadas.

f) A relação tensão "versus" deformação do solo ensaiado, não foi uma função linear como num material perfeitamente elástico, mas variou com a tensão.

g) A deflexão total num ponto do solo pôde ser medida aproximadamente, pela soma dos valores para a deformação abaixo do ponto.

Quanto aos objetivos do trabalho, muitos foram conseguidos. Contribuiu para importantes relações necessárias a um método de dimensionamento completamente teórico, porém não eram ainda suficientes para justificar uma alteração do método existente.

5.3 - SEGUNDO TRABALHO: "PILOT TESTS ON NEW FOUR-GAGE CELL" - Outubro/51

A finalidade deste trabalho foi o aperfeiçoamento dos aparelhos utilizados nas medições, a fim de se conseguir melhores resultados. Este aspecto não é do nosso interesse direto nesta tese.

5.4 - TERCEIRO TRABALHO: "THEORETICAL STRESS INDUCED BY UNIFORM CIRCULAR LOAD"

Setembro / 53 (8)

É um trabalho estritamente teórico que apresenta um desenvolvimento do trabalho de Love.

Seu principal objetivo foi conseguir fórmulas derivadas das de Love, nas quais as tensões, deflexões e deformações produzidas por uma carga circular uniforme, pudessem ser calculadas de um modo mais acessível aos engenheiros. Esses valores eram anteriormente calculados por meio de gráficos do Prof. Newmark.

O interesse pelo trabalho de Love, baseou-se na ajuda que ele poderia ter nas modificações e ajustamentos teóricos que o Corpo de Engenheiros desejava dar ao critério empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, principalmente na extrapolação para cargas mais pesadas, pressões de contato elevadas e novos modelos de disposição de rodas.

Acrescentou-se ao trabalho de Love:

- Desenvolvimento de $\partial\chi/\partial z$, depois confirmado pela teoria de Terazawa;
- Substituição das expressões contendo constantes de Lamé, por outras em função de ν e E_m ;
- Fórmulas especiais derivadas de Love para condições particulares de fronteira;
- Dedução de fórmulas especiais para $\nu = 0,5$;
- Uso de fórmulas da Teoria da Elasticidade.

5.5 - QUARTO TRABALHO: "HOMOGENEOUS SAND TEST SECTION" - Dezembro/54 (9)

Apresenta os resultados de uma investigação de tensões, deformações e deflexões produzidas dentro de uma massa de areia seca homogênea, por carga estática circular uniforme, simples e dupla.

5.5.1 - Objetivos.

O principal deles, seguindo a linha dos trabalhos anterior-

res, foi o desenvolvimento do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Foram medidas tensões, deformações e deflexões na massa de solo e comparadas com os resultados teóricos, quase que exclusivamente da Teoria da Elasticidade.

Do roteiro constaram as mesmas etapas do primeiro trabalho (Homogeneous Clayey-Silt Test Section). A razão deste trabalho foi aumentar o conhecimento básico da ação do material homogêneo sob aplicação de cargas, para comparar o comportamento de materiais que diferem grandemente em textura, quando lhes são aplicadas cargas.

Também células de pressão mais aperfeiçoadas foram usadas para melhor determinação das tensões residuais dentro da massa de solo, o que no primeiro trabalho não foi satisfatório por deficiência da aparelhagem.

5.5.2 - Estudos Paralelos:

a) Análise Teórica: Continuou a fim de desenvolver fórmulas matemáticas e métodos para o uso no estudo da distribuição de tensões. O trabalho constou de um apêndice onde se apresenta uma sequência de cálculo para computação de tensões, deformações e deflexões. (Sequência esta usada na programação automática desta tese) .

b) Laboratório: De maneira a desenvolver procedimentos para determinação de tensões características de materiais com ênfase em reproduzir em laboratório, condições de protótipos tão bem quanto possível.

c) Instrumentação: Os instrumentos de medição de tensões , deformações e deslocamentos continuaram a ser testados, estudados e desenvolvidos.

5.5.3 - Conclusões:

a) Tanto grandes tensões verticais como pequenas tensões laterais foram medidas na região da carga, e os resultados mostraram grande exatidão comparados aos da Teoria da Elasticidade.

b) As medidas obtidas com células de pressão pouco profundas, deram resultados maiores que o valor da carga aplicada. Isto foi devido a alguma interação do instrumento com o solo.

c) As medidas das deflexões mostraram-se bem diferentes daquelas achadas pela Teoria da Elasticidade, com um módulo de deformação constante. As maiores deflexões medidas corresponderam a um valor muito menor do módulo de deformação do que no caso das deflexões menores.

d) Ainda que as medidas de deflexões não coincidissem com aquelas previstas pela Teoria da Elasticidade, mostraram-se capazes de se sobrepor dentro de razoável limite de exatidão.

e) Curvas de tensão "versus" deformação foram traçadas para cada intensidade de carga usada. Todas elas, na origem das coordenadas, apresentaram um módulo próximo a 28.000 lb/pol^2 , mas distante da origem, os módulos tangentes foram da ordem de 17.000 , 12.000 e 8.000 lb/pol^2 para as cargas de 60.000 , 30.000 e 15.000 lb respectivamente. Uma curva geral, representando todos os dados, é aproximadamente uma linha reta tendo um módulo de 22.000 lb/pol^2 .

f) Uma curva tensão "versus" deformação mostrando boa aproximação com a dos ensaios, pôde ser reproduzida em laboratório pela consolidação de uma amostra do material da seção do ensaio, variando-se a pressão lateral durante o ensaio, tal como variava na seção ensaiada.

g) Em geral, o desempenho da instrumentação foi satisfatório .

h) As células de pressão não deram resultados completamente compreensivos de tensão residual.

6 - NOVO CRITÉRIO DA RODA EQUIVALENTE:

Com os trabalho teóricos e experimentais do WES, um novo critério da roda equivalente foi apresentado em 1958 por Ahlvin e Foster (10) , critério este usado atualmente.

Após o estabelecimento do método lógico semi-racional em 1950 por Boyd e Foster (6), onde se considerou que próximo à superfície o efeito da roda múltipla era o mesmo de cada roda individualmente, enquanto para grandes profundidades, o efeito do grupo de rodas era o mesmo de uma roda simples com o peso total do grupo, pesquisas foram logo iniciadas pelo WES.

Os resultados indicaram que o primeiro critério, desenvolvido para grupos de roda, era ligeiramente não-conservativo. Tornava-se necessário um critério de dimensionamento mais realístico.

Uma revisão completa de todos os dados já obtidos foi feita pelo WES. As experiências de Marietta, Georgia e Stockton na Califórnia, foram reexaminadas; os desenvolvimentos teóricos estudados e os resultados dos ensaios da roda equivalente, cuidadosamente revistos. Esta re-análise resultou num método revisto para a determinação da roda equivalente.

Bases Fixadas no Novo Método:

1 - A rutura de um pavimento é associada à deformação ou de flexão, sendo razoável que cargas produzindo deflexões iguais, sejam consideradas equivalentes.

2 - As inclinações das curvas de deformações "versus" afastamentos ("offsets"), para roda simples, são sem excessão, iguais ou maiores que as de roda dupla, a igual profundidade.

3 - Como a roda simples equivalente ao conjunto de rodas , produz deformações iguais ou mais severas, na base ou subleito, a roda simples poderá então, para critério de dimensionamento, ser considerada equivalente ao conjunto.

4 - As curvas teóricas são em geral similares às experimentais.

Com isso estabeleceu-se que: a roda simples que produz, numa dada profundidade, uma deflexão igual à máxima produzida por um certo conjunto de rodas, na mesma profundidade, será a roda equivalente desse conjunto, nesta profundidade.

Verificações experimentais foram feitas, e esse critério apresentou melhores resultados que o anterior.

Hipóteses do Método:

1. Área de Contato Circular

Já era aplicada anteriormente, pois estudos demonstraram que a consideração da área elíptica (mais próxima da real), ao invés de circular , tornaria os cálculos bem mais trabalhosos sem melhorar apreciavelmente a preci-

são desejada.

2. Princípio da Superposição de Efeitos

Cada roda do conjunto contribui em parte, para a deflexão máxima causada pelo conjunto. As deflexões podem ser determinadas em qualquer ponto, considerando-se cada roda como simples e aplicando-se o princípio da superposição.

3. Equivalência de Áreas

A área de contato da roda simples equivalente é considerada igual à de uma roda do conjunto.

4. Igualdade de Pressões

A pressão de contato é considerada igual à pressão de inflação, embora estudos provem alguma diferença entre elas, devido à rigidez do pneu (FIG. B.14).

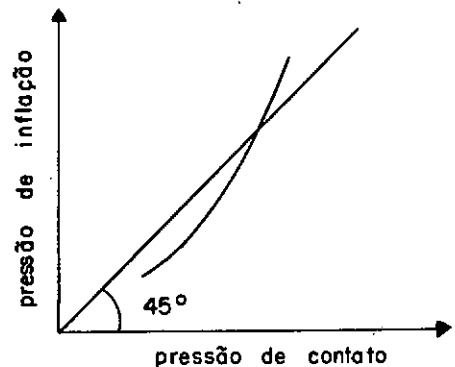


FIG. B-14

Sequência do Método:

Conhecidos:

- Configuração geométrica do trem de pouso;
- P : peso total de cada perna principal do trem de pouso;
- A : área de contato do pneu (ou p =pressão de contato)
- z : profundidade na qual se deseja a roda equivalente.

Determinar: a) Raio:

s) Caso seja conhecida a área A:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

- Caso seja conhecida a pressão de contato p:

$$A = \frac{P}{p} \quad \text{daí,} \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

b) Ponto mais Solicitado do Trem de Pouso:

Por meio de gráficos profundidade "versus" afastamento ("offset"), e usando-se o princípio da superposição de efeitos, determina-se o fator de influência F para vários pontos sob o trem de pouso, achando-se então o fator de deflexão máximo.

c) Roda Equivalente

Considerando:

s : índice relativo à roda simples

c : índice relativo às rodas do conjunto

Teremos:

$$\text{Deflexão da roda simples : } \omega_s = \frac{r_s}{E_m} p_s F_s$$

$$\text{Deflexão do conjunto : } \omega_c = \frac{r_c}{E_m} p_c F_c$$

onde:

ω = deflexão

F_s = fator de influência sob o centro da área carregada na profundidade z .

F_c = fator de influência máximo determinado na profundidade z .

Igualando as deflexões (uma das bases fixadas pelo método) :

$$\frac{r_s}{E_m} p_s F_s = \frac{r_c}{E_m} p_c F_c$$

Simplificações:

- " E_m " iguais (meio homogêneo)
- $A_s = A_c$ pela hipótese do método, então: $r_s = r_c$

Assim:

$$p_s F_s = p_c F_c$$

Como $P = pA$,

$$P_s F_s = P_c F_c$$

Finalmente:

$$P_s = \frac{F_c}{F_s} P_c$$

" A roda simples equivalente ao conjunto de rodas (trem de pouso), numa profundidade z , é igual ao produto do peso de uma das rodas do conjunto e a razão entre o fator de influência máximo do conjunto e o fator de influência sob o centro da área de contato da roda simples, ambos à profundidade z ".

7 - EXPRESSÃO MATEMÁTICA DAS CURVAS DE DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO CBR :

Em 1957, Turnbull e Ahlvin (11) apresentaram no Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Fundações de Londres, a expressão matemática da espessura de um pavimento flexível em função da Carga P , da pressão de contato p e do CBR do subleito, sendo a expressão válida para valores de CBR até 12.

Fergus (21) estabeleceu em 1950 uma relação entre a espessura de dimensionamento (h_t), a carga (P) e uma constante dependente do CBR (K), para roda simples, considerando constante a pressão de contato. Chegou a essa expressão partindo de que para dois pontos homólogos (FIG. B.15), as tensões seriam as mesmas, pois por Boussinesq:

$$\sigma_z = p \left\{ 1 - \frac{1}{1 + (a/z)^2} \right\}^{3/2} \quad (B.28)$$

Como:

$$a/z = a'/z' = C,$$

teremos:

$$\sigma_A = \sigma_{A'},$$

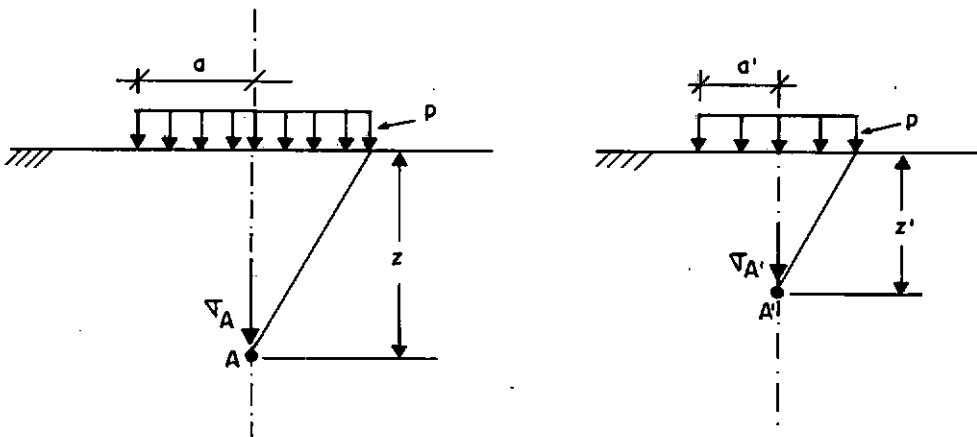


FIG. B.15

Para carregamento circular:

$$P = p\pi a^2, \text{ ou}$$

$$a = \sqrt{P} \frac{1}{\sqrt{p\pi}} \quad (\text{B.29})$$

Assim:

$$z = h_t = \frac{C}{\sqrt{p\pi}} \sqrt{P}$$

Como p é constante, $\frac{C}{\sqrt{p\pi}} = K$ também o será, e teremos:

$$h_t = K \sqrt{P} \quad (\text{B.30})$$

A equação B.29 é a relação apresentada por Fergus e com - provada experimentalmente, sendo K uma constante função do CBR e válida para valores de CBR até 15.

Essa relação permitiu o desenvolvimento de curvas de CBR pa ra cargas maiores, porém mantendo-se constante a pressão de contato.

Inicialmente, as pressões usadas eram da ordem de 60 a 100 lb/pol² (4,2 a 7,0 kgf/cm²). Porém com o aumento das aeronaves, passaram a 200 lb/pol² (14,0 kgf/cm²), tornando-se então necessário uma extrapolação para novas curvas.

A simples relação de igual tensão em pontos homólogos, não foi satisfatória para a extrapolação nas curvas de 100 para 200 lb/pol², segundo pesquisas feitas. Todavia, percebeu-se que as relações da Teoria da Elasticida- de para deflexões, em qualquer ponto sob o centro da carga circular uniforme, po deriam ser usadas (WES, 1951). A equação B.31 nos dá a relação:

$$\rho = 1,5 \frac{p}{E_m} \frac{a^2}{\sqrt{a^2 + h_t^2}} \quad (B.31)$$

onde:

ρ = deflexão

Esta relação foi testada pelo WES em 1953 e de fato comprovou-se que a extrapolação para maiores pressões poderia ser desenvolvida.

Relacionando-se as equações B.29 e B.31 :

$$\rho = \frac{1,5 P}{\pi E_m} \frac{1}{(a^2 + h_t^2)^{1/2}} \quad (B.32)$$

ou

$$a^2 + h_t^2 = \left[\frac{1,5 P}{\rho \pi E_m} \right]^2 \quad (B.33)$$

Para um dado material " E_m " é constante. E, se considerarmos que a carga total permanece constante, variando apenas a pressão, o termo da direita da equação B.33 é constante:

$$a^2 + h_t^2 = C_1 \quad (B.34)$$

Com a equação B.34 que permite determinarmos espessuras, permanecendo a carga constante e variando a pressão, e com a equação B.30 que permite a mesma determinação mas permanecendo a pressão constante e variando a carga, chega-se à seguinte relação:

$$\frac{h_t^2}{P} + \frac{1}{p \pi} = D \quad (B.35)$$

sendo D constante.

Combinando as equações B.30 e B.35, teremos a relação entre as constantes D e K :

$$D = K^2 + \frac{1}{p \pi} \quad (B.36)$$

Usando os valores de K determinados por Fergus em 1950, desenvolveu-se os valores de D para diversos valores de CBR. O resultado mostrou que o produto $D \times \text{CBR}$, para CBR até 12, é constante, cuja média dos valores é 0,1236.

Assim:

$$D \times \text{CBR} = 0,1236$$

ou

$$D = \frac{1}{8,1 \text{ CBR}} \text{ em lb/pol}^2 \quad (B.37)$$

Substituindo-se na equação B.35 o valor de D em B.37:

$$h_t^n = \sqrt{P \left\{ \frac{1}{8,1 \text{ CBR}} - \frac{1}{p \pi} \right\}} \quad (B.38)$$

Esta expressão dá a espessura total de dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método do CBR, para roda simples, em função da carga da roda P , da pressão de contato p e do CBR do subleito, nas seguintes unidades:

P - libras (lb)

p - libras por polegadas ao quadrado (lb/pol²)

h_t - polegadas (pol)

A mesma expressão, em unidades usuais entre nós pode ser expressa da seguinte forma:

$$h_t = \sqrt{P \left\{ \frac{1}{0,57 \text{ CBR}} - \frac{1}{p\pi} \right\}} \quad (\text{B.39})$$

onde:

h_t - cm

P - kgf

p - kgf/cm²

8 - CONSOLIDAÇÃO DO CRITÉRIO DO CBR PARA PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:

Desde o início do desenvolvimento do Método do CBR para pavimentos flexíveis de aeroportos, pelo Corpo de Engenheiros, muitos esforços foram realizados para exprimir matematicamente as curvas de dimensionamento, por dois motivos principais:

1 - Permitir interpolações e extrapolações na determinação de curvas de dimensionamento para novas condições, sempre necessárias devido ao contínuo desenvolvimento das aeronaves.

2 - Permitir comparação fácil com os dados estudados e com as curvas determinadas anteriormente, de modo exclusivamente empírico.

Assim, com o trabalho de Turnbull e Ahlvin - "Mathematical Expression of the CBR Relations" - e o critério da roda equivalente apresentado por Foster e Ahlvin em 1958, o Corpo de Engenheiros (12)e (13) pôde fazer um es

tudo para confirmar a expressão teórica das curvas de dimensionamento, comparando-a com ensaios em seções reais, pistas experimentais e as curvas de dimensionamento já existentes.

EXTENSÃO DA FÓRMULA MATEMÁTICA:

A expressão apresentada por Turnbull e Ahlvin, foi colocada em função de dois parâmetros $h_t/\sqrt{A}$ e CBR/p (Eq. B.40)..

$$\frac{h_t}{\sqrt{A}} = \sqrt{\frac{1}{8,1 \frac{CBR}{p}} - \frac{1}{\pi}} \quad (B.40)$$

onde:

h_t = espessura total do pavimento (revestimento, base e sub-base)

A = área de contato da roda

Esta equação foi então representada por uma única curva relacionando os dois parâmetros (FIG. B.16)

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS:

Colocando-se mais de duzentos dados existentes na forma dos parâmetros $h_t/\sqrt{A}$ e CBR/p , estes foram marcados num gráfico de coordenadas $h_t/\sqrt{A}$ e CBR/p .

A maioria dos dados foram de aviões cujos trens de pouso eram compostos de rodas múltiplas. Então, para a determinação da roda equivalente, usou-se o critério apresentado por Foster e Ahlvin.

O resultado é o gráfico mostrado na FIG. B.17.

Nota-se facilmente, que os pontos com rutura e os sem rutura, com raras exceções, estão nitidamente separados pela curva teórica de dimensionamento do Método CBR.

COMPARAÇÃO DA EXPRESSÃO TEÓRICA COM AS CURVAS DE DIMENSIONAMENTO EXISTENTES:

Várias famílias de curvas de dimensionamento já existentes, relacionando espessura com carga, pressão de contato e CBR, foram combinadas e reduzidas aos parâmetros $ht/\sqrt{A}$ e $CBR/\bar{p}$. Colocados num gráfico similar ao teórico, resultou na FIG. B.18, que, para comparação, contém a curva teórica de dimensionamento.

Nota-se grande aproximação com a curva teórica para valores de CBR menores que 12. Para valores maiores que 12, o critério existente (empírico) dá maiores espessuras que o teórico.

Assim confirmou-se a relação teórica, para valores de CBR menores ou iguais a 12.

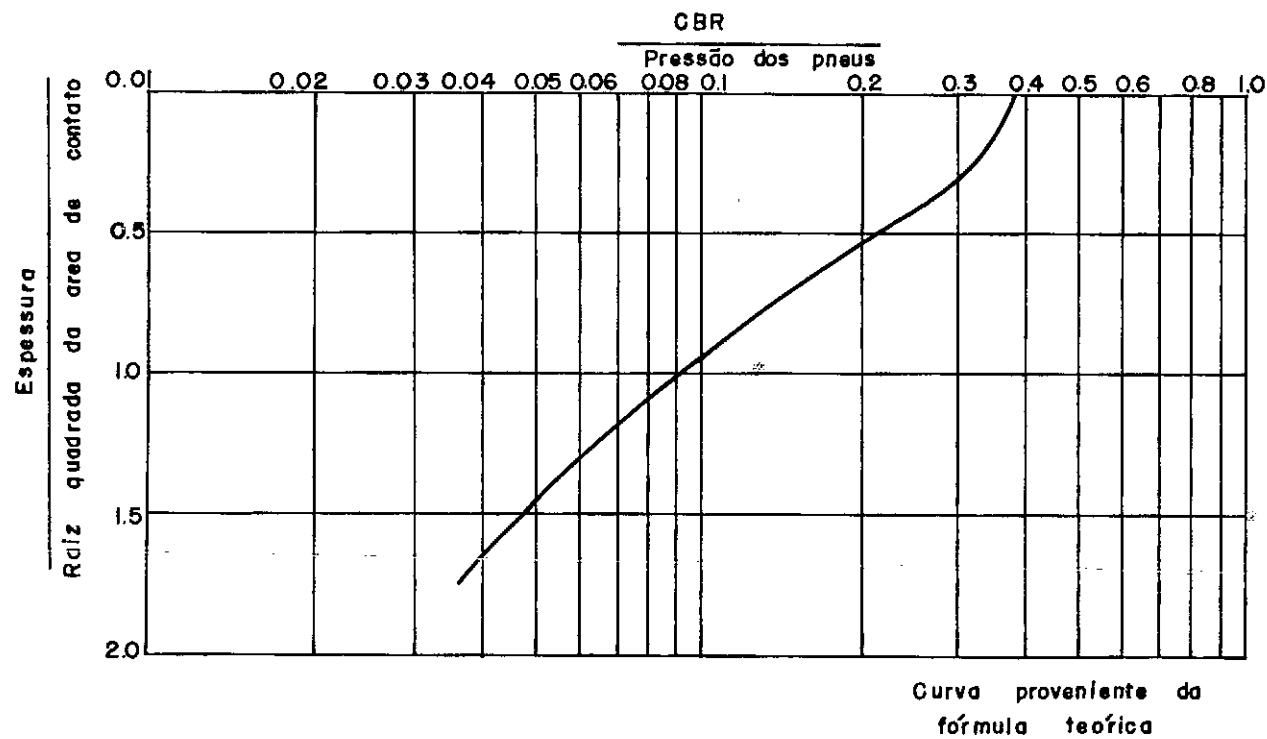


FIG B.16 (REF. 12 PAG 1825 - 3)

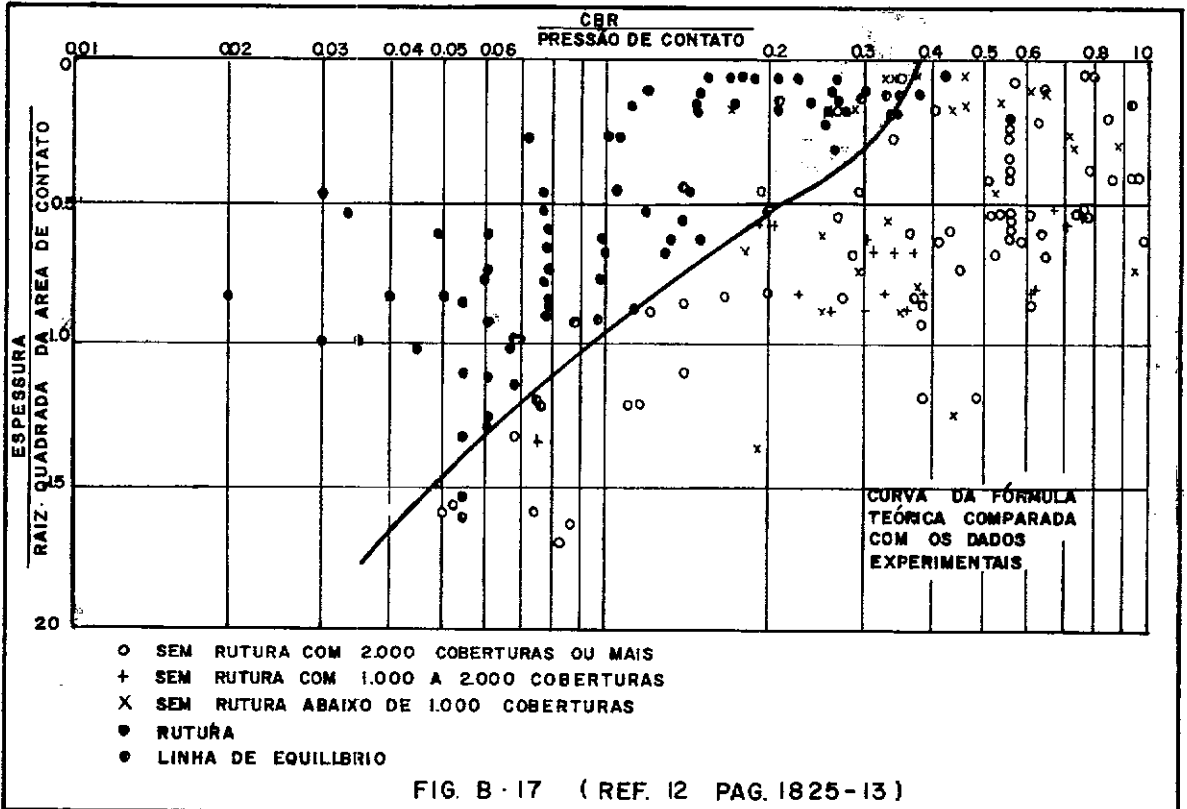
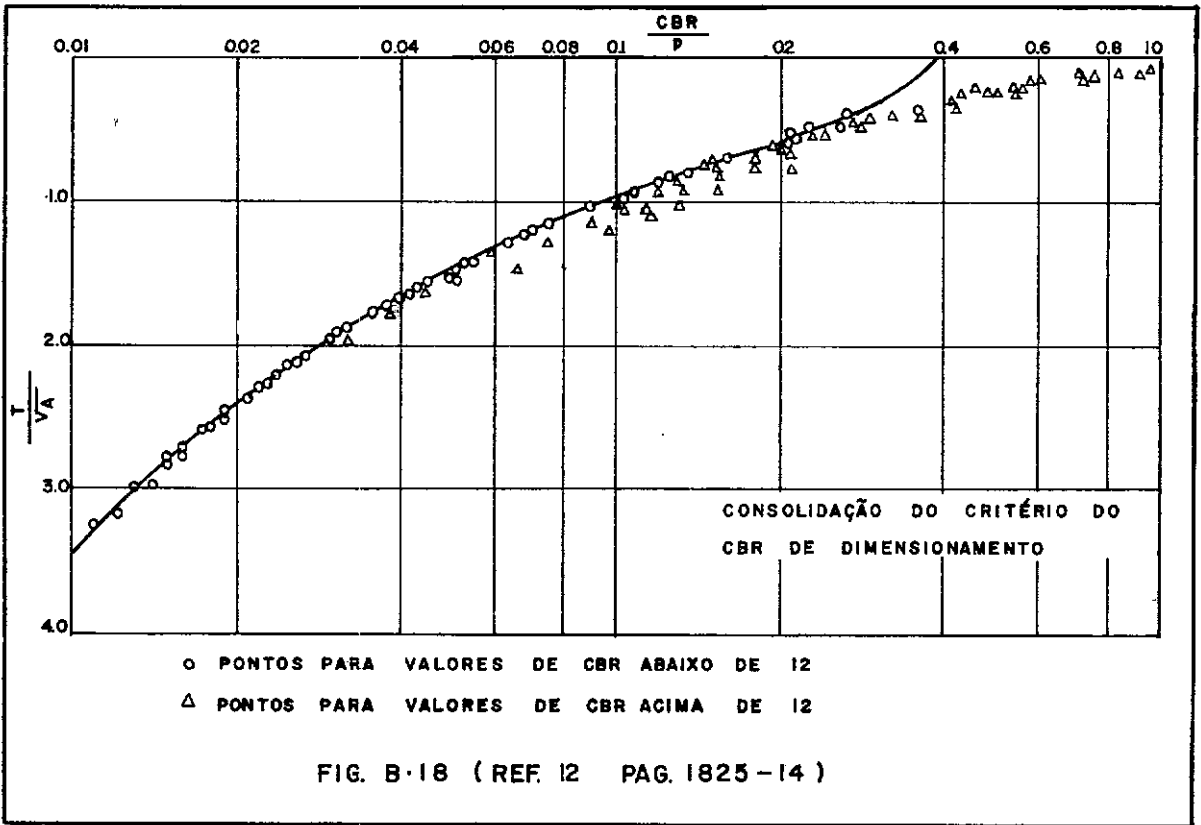


FIG. B-17 (REF. 12 PAG. 1825-13)



C. ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE COMPUTAÇÃO AUTOMÁTICA

1 - TEORIA USADA NA PROGRAMAÇÃO:

1.1 - PARA O CÁLCULO DA RODA EQUIVALENTE :

Pela fórmula da roda equivalente:

$$P_s = P_c \frac{F_c}{F_s} ,$$

os fatores a determinar são :

P_c = carga de cada roda da perna principal do trem de pouso

F_s = fator de deflexão sob o centro da área de contato

F_c = somatório dos fatores de deflexão de cada roda em relação ao ponto de maior deflexão.

DETERMINAÇÕES :

1.1.1 - P_c : peso total da perna dividido pelo número de rodas da mesma

1.1.2 - F_s : pela fórmula simplificada ($r = 0$) :

$$F_s = (1+z^2)^{1/2} (2-2v^2) - \frac{(1+v)z^2}{(1+z^2)^{1/2}} + (v+2v^2-1) z$$

sendo z a profundidade em raios.

1.1.3 - F_c : seguindo-se a teoria do APÊNDICE A do 4º Trabalho do Corpo de Engenheiros (8), chega-se à fórmula final:

$$F_c = (1+v) \{ (1-v)H + z A \}$$

onde:

$$H = \frac{V}{\pi} = \frac{\partial \chi}{\partial z} / \pi$$

$$A = - \frac{Vz}{2\pi} = - \frac{\partial V}{\partial z} / 2\pi$$

z = profundidade em raios

O cálculo de V e V_z , segundo a mesma teoria, é determinado pela sequência seguinte:

a) Parâmetros Iniciais (FIG. C.1)

$$\rho = d/r$$

$$z = e/r$$

$$R_1 = \sqrt{z^2 + (\rho - 1)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{z^2 + (\rho + 1)^2}$$

$$k = R_1/R_2$$

$$m_0 = k^2$$

$$m_1 = 1 - k^2$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}$$

$$a = (z^2 + 1 - \rho^2) / R_1 \cdot R_2$$

$$b = (z^2 + 1 + \rho^2) / R_1 \cdot R_2$$

$$c = (z^2 - 1 + \rho^2) / R_1 \cdot R_2$$

$$\text{sen } \phi = z/R_1$$

$$\text{sen } \alpha = k$$

$$\phi = \text{arc sen } (z/R_1)$$

$$\alpha = \text{arc sen } k$$

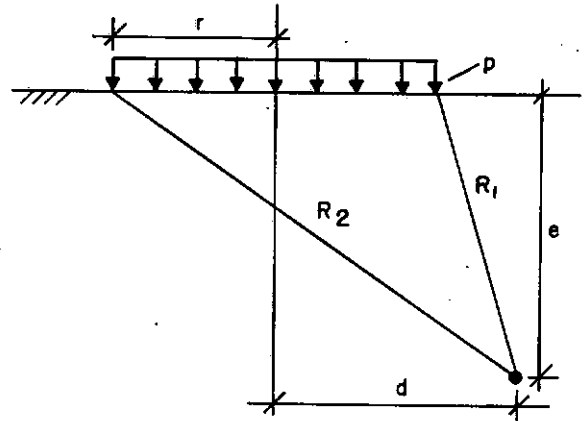


FIG. C.1

b) Integrais Elípticas :

$$F(\phi, \alpha) : \text{incompleta de primeira espécie} \quad \int_0^\phi \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \text{sen}^2 \theta}}$$

$$E(\phi, \alpha) : \text{incompleta de segunda espécie} \quad \int_0^\phi \sqrt{1 - k^2 \text{sen}^2 \theta} d\theta$$

$$K' = F(\phi, \alpha) \text{ para } \phi = \pi/2 : \text{completa de primeira espécie}$$

$$\int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k'^2 \text{sen}^2 \theta}}$$

$E' = E(\phi, \alpha)$ para $\phi = \pi/2$: completa de segunda espécie

$$\int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k'^2 \sin^2 \theta}}$$

K = completa de primeira espécie $\int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}}$

E = completa de segunda espécie $\int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta$

Nota: Os métodos usados no programa para a determinação dessas integrais, estão detalhados logo após esta sequência (item 1.2).

c) Parâmetros Dependentes das Integrais Elípticas :

D :

$$= 1 \rightarrow D = \pi/2$$

$$> 1 \rightarrow D = K' \cdot E(\phi, \alpha) - (K' - E') \cdot F(\phi, \alpha)$$

$$< 1 \rightarrow D = \pi - \{K' \cdot E(\phi, \alpha) - (K' - E') \cdot F(\phi, \alpha)\}$$

$$m = R_2 \cdot E'$$

$$n = R_1 \cdot K'$$

d) Diferenciais :

$$V = \partial \chi / \partial z = 2m - 2zD - n(c-a)$$

$$V_z = \partial V / \partial z = \{z \cdot n(b-a) - 2\rho^2 D\} / \rho^2$$

1.2 - DETERMINAÇÃO DAS INTEGRAIS ELÍPTICAS :

Precisávamos de um método de cálculo de integrais elípticas

que fosse bem rápido, pois essa parte do programa seria usada dezenas de vezes, devendo também, ser bastante preciso, embora não necessariamente de uma precisão exagerada.

Após várias pesquisas e tentativas, escolhemos dois métodos: o primeiro resolve a integral completa de primeira espécie (K'), por meio de uma subrotina da IBM (14) e o segundo, por meio da transformação descendente de Landen e séries trigonométricas (15), resolve quatro delas. A última é obtida de uma relação entre elas (Relação de Legendre).

1.2.1 - Subrotina da IBM (cálculo de K') :

$$K'(k) = \frac{d \cdot t}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}} \quad \text{onde } 0 \leq k < 1$$

$K'(k)$ também pode ser definida como:

$$K'(k) = \frac{d \cdot x}{\sqrt{(1+x^2)(1+k_c^2 x^2)}} \quad \text{onde } k_c \text{ é o módulo complementar:}$$

$$k_c^2 + k^2 = 1 \quad ; \quad 0 < k_c^2 \leq 1$$

O cálculo de $K'(k)$ na subrotina é baseado no processo do meio aritmético-geométrico.

Começando pelo par de números $a=2$ e $g=2k_c$, a sequência dos a_N e g_N é generalizada pelas definições:

$$a_N = (a_{N-1} + g_{N-1}) \quad \text{e} \quad g_N = \sqrt{a_{N-1} \cdot g_{N-1}}$$

O processo iterativo termina quando $a_N = g_N$.

Como no computador essa igualdade deve ser dada conforme a

precisão desejada, a iteração pára quando $a_N - g_N \leq a_N \cdot 10^{-D}$, onde D é um número que indica a casa decimal até onde se deseja a precisão.

O valor da integral é determinado nessa etapa sob a seguinte expressão:

$$K'(k) = \frac{2^N \pi}{a_N}$$

1.2.2 - Transformação Descendente de Landen :

Sendo α_n e α_{n+1} , dois ângulos modulares em que:

$(1 + \sin \alpha_{n+1})(1 + \cos \alpha_n) = 2 \rightarrow (\alpha_{n+1} < \alpha_n)$ e ϕ_n e ϕ_{n+1} duas amplitudes correspondentes, de modo que:

$$\tan(\phi_{n+1} - \phi_n) = \cos \alpha_n \cdot \tan \phi_n \rightarrow (\phi_{n+1} > \phi_n)$$

numa passagem de n para $n+1$, o ângulo modular decresce enquanto a amplitude cresce. Por um processo iterativo, onde $\alpha_0 = \alpha$ e $\phi_0 = \phi$, podemos dar ao ângulo modular uma magnitude negligenciável, aí se aplicando os valores das integrais desejadas.

a) Incompleta de Primeira Espécie :

$$F(\phi, \alpha) = \phi \prod_{s=1}^{\infty} (1 + \sin \alpha_s)$$

onde

$$\phi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n} F(\phi_n, \alpha_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\phi_n}{2^n}$$

b) Completa de Primeira Espécie .

$$K = F(\pi/2, \alpha) = \frac{\pi}{2} \prod_{s=1}^{\infty} (1 + \sin \alpha_s)$$

ou

$$K = \frac{F(\phi, \alpha) \pi}{2 \phi}$$

c) Completa de Segunda Espécie :

$$E = K \left\{ 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \left(1 + \frac{1}{2} \sin \alpha_1 + \frac{1}{2^2} \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 + \frac{1}{2^3} \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \alpha_3 + \dots \right) \right\}$$

d) Incompleta de Segunda Espécie :

$$E(\phi, \alpha) = F(\phi, \alpha) \left\{ 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \left(1 + \frac{1}{2} \sin \alpha_1 + \frac{1}{2^2} \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 + \dots \right) \right\} + \sin \alpha \left\{ \frac{1}{2} (\sin \alpha_1)^{1/2} \sin \phi_1 + \frac{1}{2^2} (\sin \alpha_1 \sin \alpha_2)^{1/2} \sin \phi_2 + \dots \right\}$$

1.2.3 - Relação de Legendre :

$$E K' + E' K - K K' = \frac{1}{2} \pi$$

Completa de Segunda Espécie :

$$E' = \left(\frac{1}{2} \pi + K K' - E K' \right) / K$$

1.3 - PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA NECESSÁRIA :

Determinada a roda equivalente, aplica-se a fórmula de Turnbull e Ahlvin (Eq. B.39) para a determinação da espessura necessária.

$$h_t = \sqrt{P \left(\frac{1}{0,57 \text{ CBR}} - \frac{1}{p\pi} \right)}$$

2 - O PROGRAMA :

2.1 - ESTRUTURAÇÃO :

Em síntese, o programa é estruturado da seguinte forma:

1 - Arbitra-se uma profundidade (espessura), na qual se vai calcular a roda equivalente.

2 - Determina-se o fator de deflexão máximo para aquela profundidade após pesquisar o fator de deflexão de vários pontos.

3 - Acha-se o fator de deflexão para roda simples (sob o centro da área de contato) naquela profundidade.

4 - Em seguida, calcula-se a roda equivalente para a profundidade arbitrada.

5 - Com o valor da roda equivalente, entra-se na equação do CBR e determina-se a espessura (profundidade) de pavimento, necessária para aquela carga de roda equivalente, entrando também com o CBR do subleito e a pressão dos pneus.

6 - Se a espessura calculada, coincidir com a profundidade arbitrada, essa será a espessura final. Caso contrário, arbitra-se outra profundidade, recalcula-se tudo e determina-se a nova espessura, repetindo-se a sequência, até que a coincidência se dê.

Com mais detalhes, essas etapas são programadas usando os seguintes critérios:

1. Profundidade Arbitrada :

A primeira profundidade arbitrada é sempre 50 cm.

A partir desta, o programa prossegue, acrescentando à anterior 50 cm (50, 100, 150, 200, etc), até que a espessura encontrada seja menor que a profundidade arbitrada. Neste ponto ele muda a sequência, arbitrando sempre a nova profundidade como sendo a média aritmética entre as duas profundidades mais próximas; a inferior e a superior.

Assim, se a profundidade arbitrada foi 150 cm e a espessura necessária encontrada de 143 cm, a próxima profundidade a arbitrar será $(150 + 100) / 2 = 125$ cm . Caso a nova espessura achada seja, por exemplo, 139 cm, a nova profundidade a arbitrar será $(150 + 125) / 2 = 137,5$ cm. Isto prossegue até que a diferença entre a profundidade arbitrada e a espessura necessária seja menor ou igual a um valor escolhido, chamado no programa de PAR2, que é um dado de entrada fornecido pelo usuário.

2. Fator de Deflexão Máximo :

Como veremos a seguir, na parte de dados de entrada, a região a pesquisar o ponto de deflexão máxima, está sempre no quadrante positivo dos eixos que se escolhem, para se fixar as coordenadas dos centros das áreas de contato das rodas.

Determina-se primeiramente os pontos relativos aos centros das áreas de contato, de coordenadas máximas nesse quadrante, de modo que os outros nele contidos, fiquem inscritos num retângulo (FIG. C.2), no qual se vai procurar o ponto de maior deflexão (fator de deflexão máximo).

Determinado o retângulo, pesquisa-se o ponto de maior deflexão por intermédio de uma grade quadrada com 9 pontos (FIG. C.3) , que percorre esta superfície com reduções e translações da seguinte forma:

a) Partindo-se de um ponto inicial (ponto 5), ela dispõe os outros 8 pontos, como mostra a FIG. C.3, distanciados de um valor "L", horizontal e verticalmente.

b) Calcula-se o fator de deflexão de cada ponto da grade.

c) Compara-se o valor do fator de deflexão de cada ponto com o do ponto inicial (ponto 5). Caso o fator maior seja de outro ponto que não o inicial, a malha se translada tornando central este ponto de maior deflexão (FIG. C.4). Caso o fator de deflexão máximo continue sendo o do ponto inicial, a malha se reduz (de L para $L/2$), permanecendo central o ponto 5 (FIG C.5).

Essa operação se repete, com reduções e translações da grade, até que a distância "L" entre os pontos se torne menor que um valor arbitrado, chamado no programa de PAR1, que é também um dado de entrada fornecido pelo usuário (vide pag. 72).

ESCOLHA DO PONTO INICIAL DA GRADE :

Apenas explicamos o procedimento da grade, porém como iniciá-la?

Um critério teria que ser escolhido. Levamos em consideração que para reduzir o tempo dessa procura, deveríamos iniciar de um ponto em que de fato, estivesse próximo ao mais solicitado. Porém deveríamos ter bastante certeza dessa hipótese a fim de não cometermos erro.

Usamos o seguinte critério;

a) Determinam-se os fatores de deflexão para a profundidade já arbitrada, de todos os pontos relativos aos centros das áreas de contato, pois para pequenas profundidades, o fator máximo, geralmente, se encontra abaixo de um dos centros das áreas.

b) Escolhem-se sobre o retângulo, 9 pontos dispostos conforme indica a figura C.6, a fim de que com esses pontos, embora distantes, mas abrangendo toda a área, possa-se ter uma noção da zona de maior deflexão.

c) Comparam-se todos esses fatores de deflexão determinados em a e b, e escolhe-se o máximo. O ponto relativo a esse fator máximo, será o ponto inicial da grade.

ESCOLHA DA DISTÂNCIA INICIAL (L) DA GRADE :

Escolhemos duas alternativas :

a) Se o ponto inicial da grade estiver sob o centro de uma das áreas de contato, determina-se a distância desse ponto ao centro da área de contato mais próxima dele. O valor "L" será a metade dessa distância (FIG. C.7, supondo a roda nº V, a de maior deflexão).

b) Se o ponto inicial da grade não for um dos inscritos no retângulo, o valor de "L" será a quarta parte do lado maior do retângulo ($y_{\max}/4$ ou $x_{\max}/4$). A FIG. C.8 exemplifica o caso.

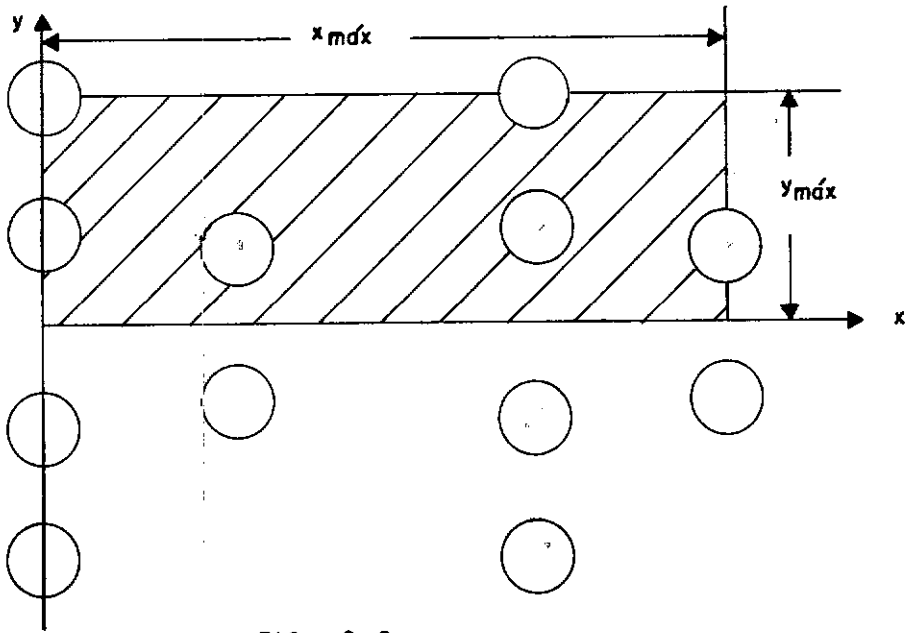


FIG C. 2

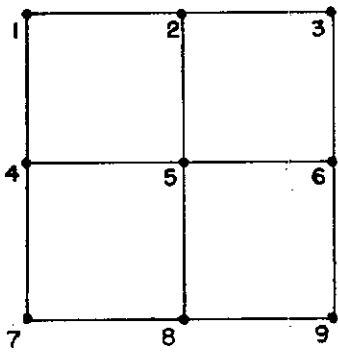


FIG C. 3

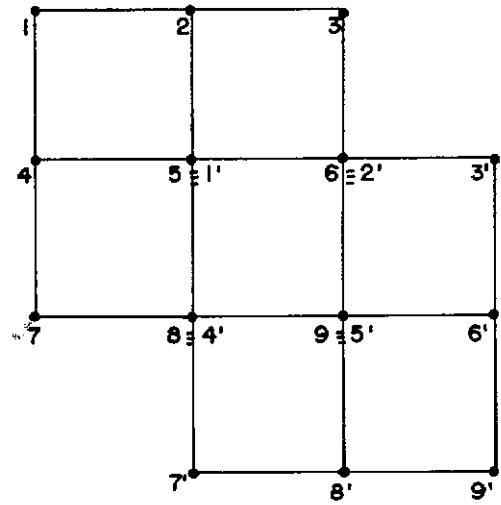


FIG C. 4

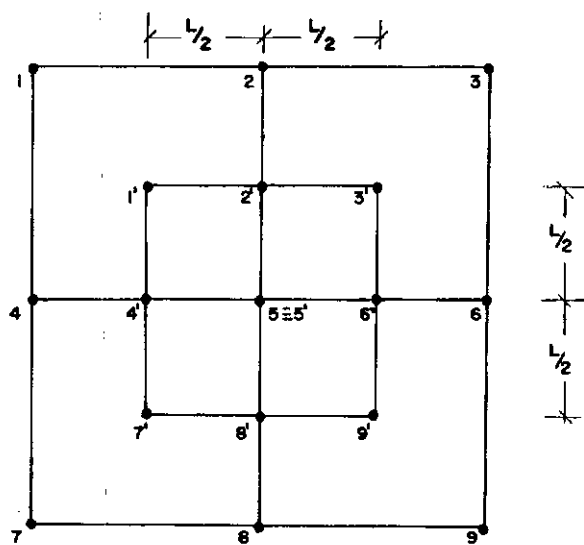


FIG. C-5

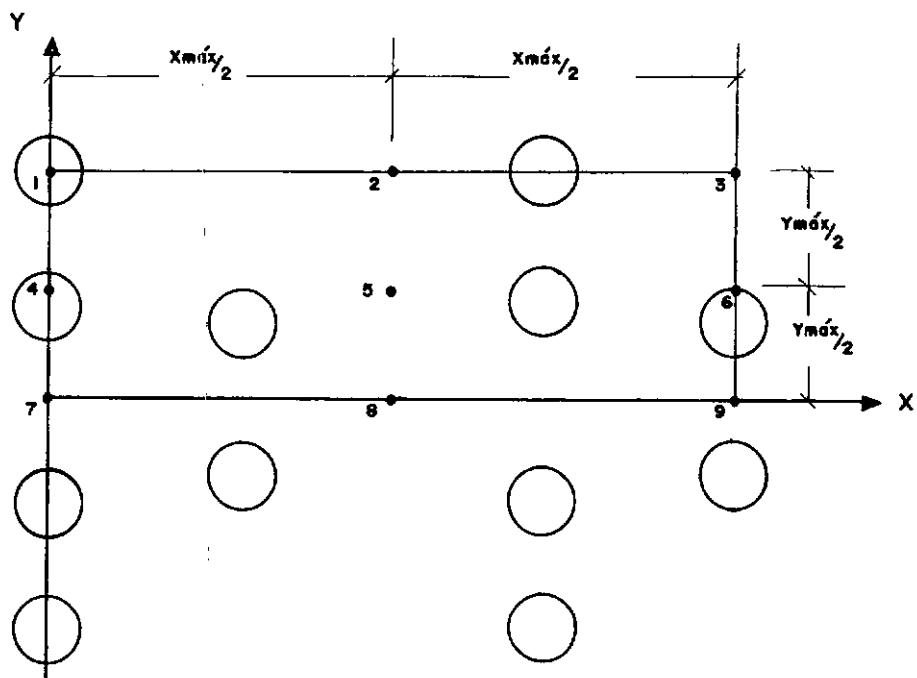
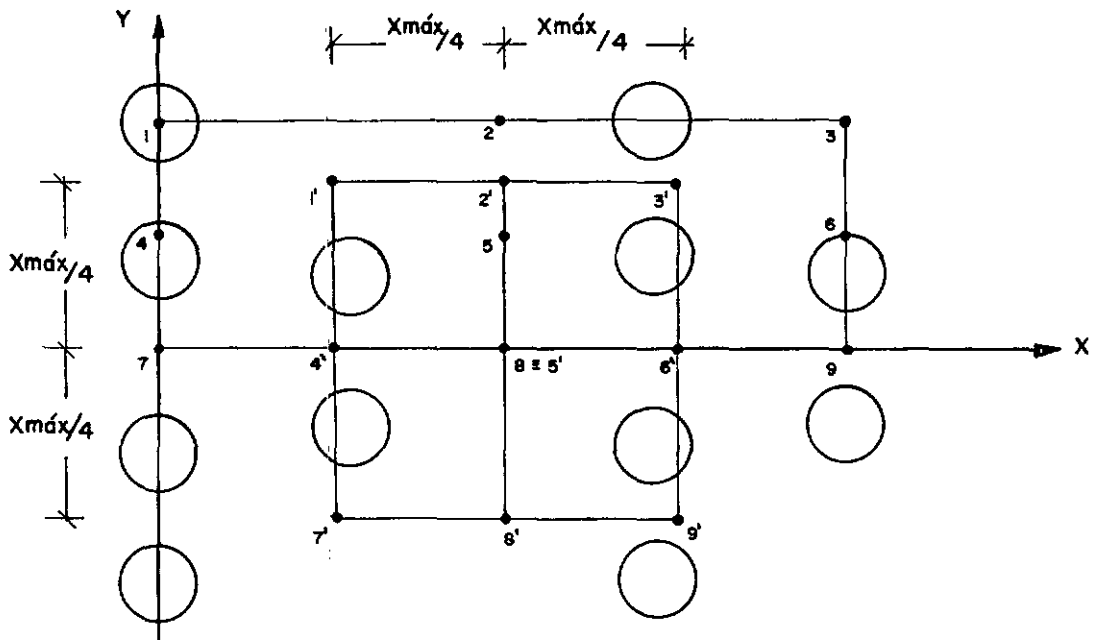
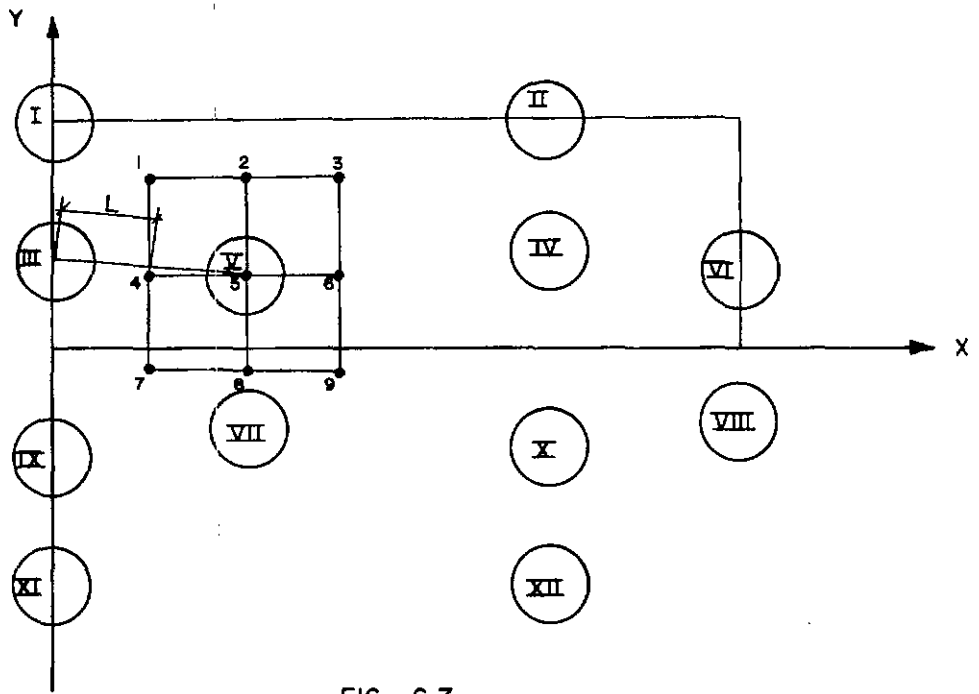


FIG. C-6



2.2 - OBSERVAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES DO PROGRAMA :

1 - Se a primeira tentativa, com a profundidade 50 cm, der uma espessura menor que 50 cm, o programa toma como valor imediatamente inferior, a profundidade 0. Neste caso, a segunda profundidade arbitrada será de 25,0 cm.

2 - O programa não calcula fatores de deflexão para pontos da grade, quando situados fora do retângulo onde se encontrará o ponto de deflexão máxima.

3 - Caso as áreas de contato se encontrem sobre um dos eixos, a grade se transforma num segmento entre a origem e o centro da área mais afastada e os pontos pesquisados ficam sobre esse segmento.

4 - Quando apenas uma área de contato se encontra no primeiro quadrante, e o ponto inicial da iteração é sob a roda, a distância "L" da grade, é tomada como sendo o valor da coordenada máxima, do ponto relativo ao centro da mesma área.

5 - Havendo dupla simetria na disposição das áreas de contato, o programa testa a partir da segunda iteração, se o ponto de máxima deflexão alcançou o centro de simetria (origem das coordenadas). Se isto ocorre, ele não usa mais a grade para os próximos pontos, mantendo o ponto de máxima deflexão, a origem das coordenadas. Isto porque, pela teoria, comprovada por experiência nossa, depois de uma certa profundidade, o conjunto de rodas se comporta como uma carga concentrada, com o peso total da perna, atuando no centro de simetria desta disposição.

6 - O programa só contém uma subrotina denominada FENE, cuja função é calcular, para um determinado ponto, o fator de deflexão relativo às várias cargas de rodas existentes na disposição.

2.3 - LIMITAÇÕES DO PROGRAMA :

1 - Só é válido para valores de CBR menores ou iguais a 12, devido à limitação da teoria (vide pag. 50)

2 - Não considera a variável "cobertura", por ser esta, referida como percentagem da espessura determinada e, se a incluíssemos, teríamos que entrar com um dado referente à largura do aeroporto a dimensionar, o que tiraria o sentido de generalidade do programa. A influência dessa variável é detalhada no APÊNDICE I.

3 - O número máximo de rodas de uma perna ou outra disposição de rodas a calcular, permitido no programa, é de 50. De fato, já é um número exagerado, para a quantidade de rodas das pernas principais dos trens de pouso existentes. Porém, caso se queira pesquisar uma disposição especial, po de-se ampliar esse número permitido, mudando apenas no programa, as dimensões das variáveis: X, Y, W, U, F e RO no programa principal; X, Y, W, U, F, RO e FLIN na subrotina, para a dimensão desejada.

2.4 - CARTÕES DE ENTRADA :

A entrada é simples, consistindo de um cartão onde se colocam as diversas variáveis, e um du mais, relativos às coordenadas dos centros das áreas de contato das rodas.

1º CARTÃO :

1 - MRODA : Número de rodas de uma das pernas principais ,

ou de parte do trem de pouso ou do trem de pouso completo.

Embora na grande totalidade dos casos determina-se a roda equivalente do conjunto de rodas, contidas numa das pernas principais, mencionamos também parte do trem de pouso e trem de pouso completo, para um conhecimento maior.

a) Parte do Trem de Pouso :

Às vezes, como na FIG. C.9, duas (ou mais) pernas principais estão muito próximas, podendo haver interação entre elas. Dependendo das distâncias D e H , pode-se optar por considerar uma só ou as duas. Na dúvida, usa-se o programa para o caso de uma perna e para o caso de duas em conjunto. Se os resultados forem próximos, é porque basta resolver para uma perna somente. Caso contrário, há necessidade de se considerar o conjunto.

b) Trem de Pouso Completo :

Isto nunca é necessário num dimensionamento. Porém, caso se queira pesquisar a diferença que há, considerando o trem de pouso completo e apenas uma perna principal (ou pernas principais), pode-se fazê-lo. Evidentemente que para o trem de pouso completo, a espessura calculada deverá ser ligeiramente maior, pois teoricamente, uma carga bem distante da outra, provoca ainda alguma deflexão sob esta; todavia isso na prática não se dá. Logo esse exagero de precisão é falso e o cálculo correto é com uma perna apenas, excetuando-se o caso explicado no item anterior.

2 - ISIM : Variável na qual se informa ao programa se a disposição das rodas considerada é de dupla simetria, de uma única simetria, ou de nenhuma simetria. Esta informação é dada por meio de variáveis inteiras :

- dupla simetria $\rightarrow$ ISIM = qualquer número positivo diferente de zero.
- uma ou nenhuma simetria $\rightarrow$ ISIM = zero

Nota: Quanto à disposição dos eixos, esclareceremos adiante.

3 - PESO : É a carga total atuante no conjunto de rodas da disposição escolhida. A distribuição exata do peso total da aeronave sobre as pernas principais e secundária, vem especificada em cada tipo de avião (16 e 17) . Exemplos FIG. C.10 . Unidade : kgf .

De um modo geral, os trens de pouso são triciclos - duas pernas principais sob as asas e uma sob o nariz - sendo a carga distribuída em 85% a 95% sobre as pernas principais e 15% a 5% respectivamente, sobre o nariz, havendo casos em que se considera toda a carga atuando nas pernas principais.

4 - PRESS : É a pressão de inflação dos pneus. Também um dado fornecido para os diversos tipos de avião.

As primeiras aeronaves usavam pressões de 4,2 a 7,0 kgf / cm^2 . Na década de 60, as pressões usuais tiveram valores em torno de 10 kgf / cm^2 . Atualmente os grandes aviões operam na faixa de 10,0 a 18,0 kgf/ cm^2 .
Unidade kgf/ cm^2 .

5 - CBR : É o valor do CBR do subleito.

6 - NI : É o coeficiente de Poisson do subleito. Como seu ensaio é trabalhoso e sua influência pequena, no resultado final, aconselhamos, caso não seja determinado experimentalmente, um valor entre 0,3 e 0,5, não po-

dendo ser maior que 0,5 , devido à teoria usada, que considera o solo como elástico.

7 - PAR1 : Parâmetro que determina a precisão desejada na determinação do ponto de maior deflexão. Conforme estudo apresentado em E (Análise da influência dos parâmetros de dimensionamento com auxílio do programa desenvolvido), aconselhamos este fator entre 10,0 a 20,0 cm para casos normais. Em casos especiais, deve-se usar o bom senso, porém não é preciso se preocupar tanto, pois sua influência não é grande no resultado.

8 - PAR2 : Parâmetro que determina a precisão desejada entre a profundidade arbitrada e a espessura encontrada na iteração (vide pag.62). Depende da necessidade de cada usuário. Usamos nos nossos exemplos, o valor 1,0 cm, tido como boa a ótima aproximação para o problema.

CARTÕES (ÃO) DE COORDENADAS :

Primeiramente precisa-se colocar os eixos, obedecendo a um critério, em função de haver simetria ou não na disposição das áreas de contato das rodas.

a) Nenhuma Simetria : Colocam-se todas as áreas de contato das rodas no quadrante positivo (FIG. C.11), de preferência o centro das extremas da esquerda e as inferiores, sobre os eixos.

b) Uma Simetria : Coloca-se um eixo coincidindo com o eixo de simetria e o outro, passando pelo centro da (s) última (s) da esquerda (FIG. C.12).

c) Duas Simetrias : Faz-se os dois eixos coincidirem com os de simetria (FIG. C.13).

Nota : A numeração das áreas de contato, embora não obrigatório, deve ser da direita para a esquerda e de cima para baixo.

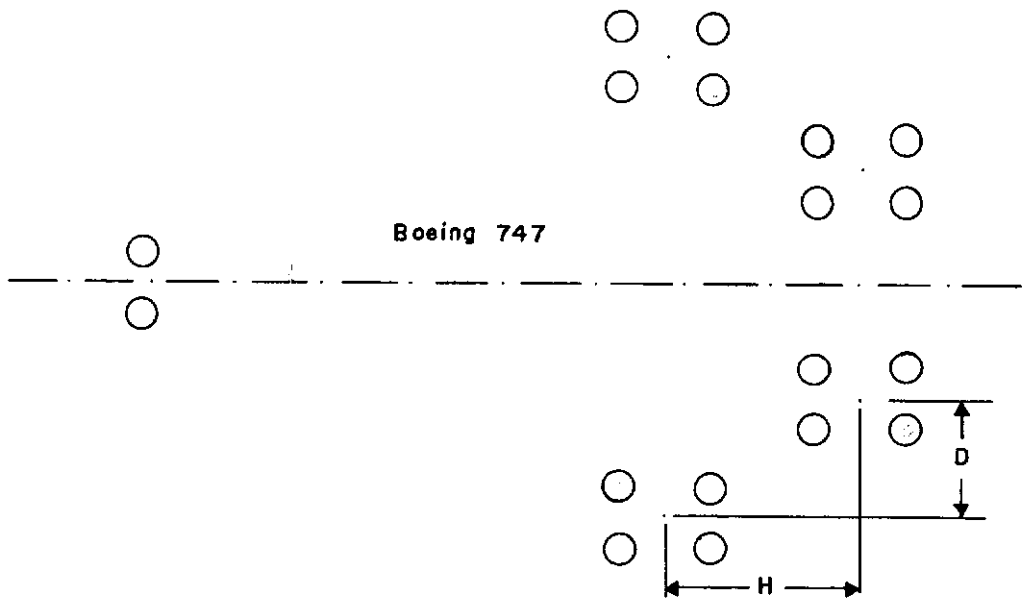


FIG C. 9

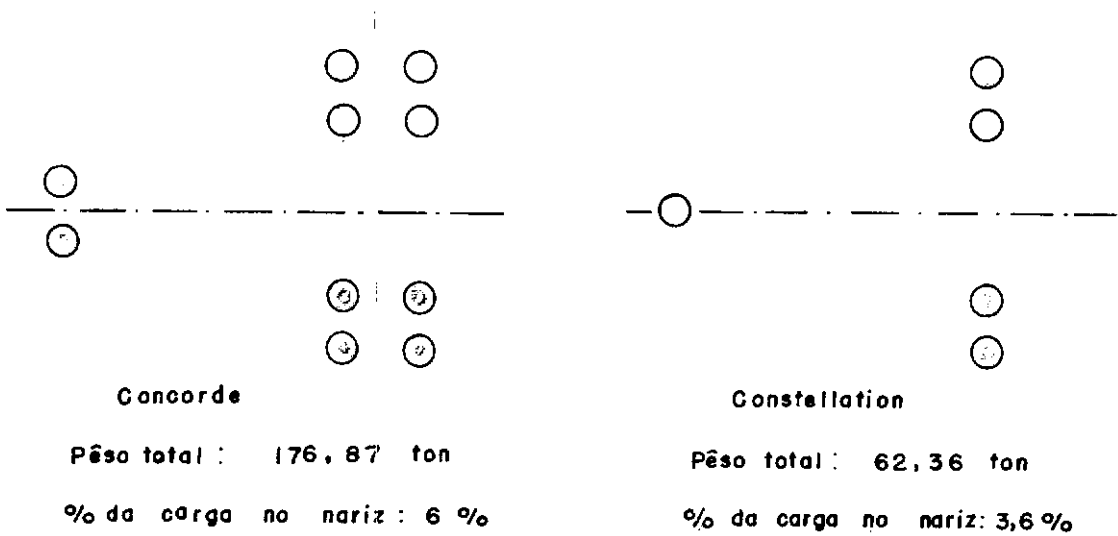
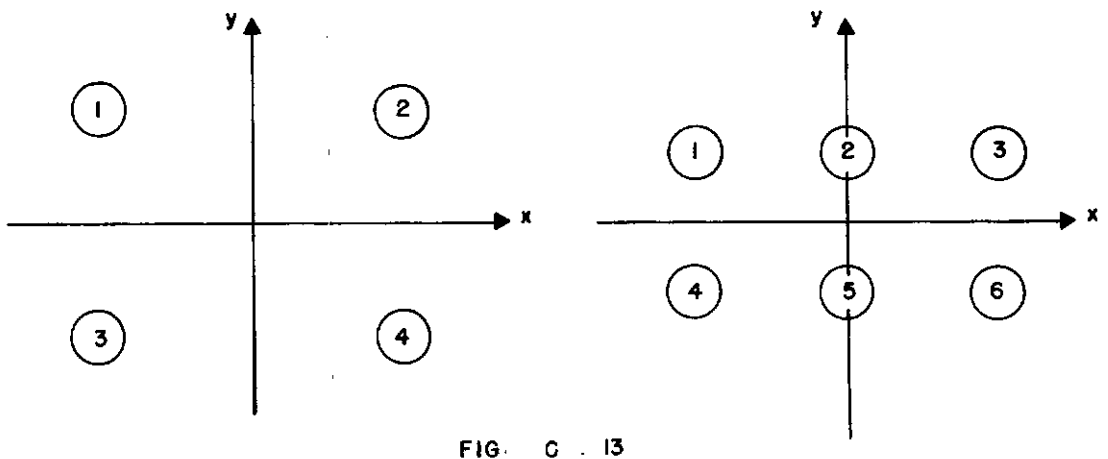
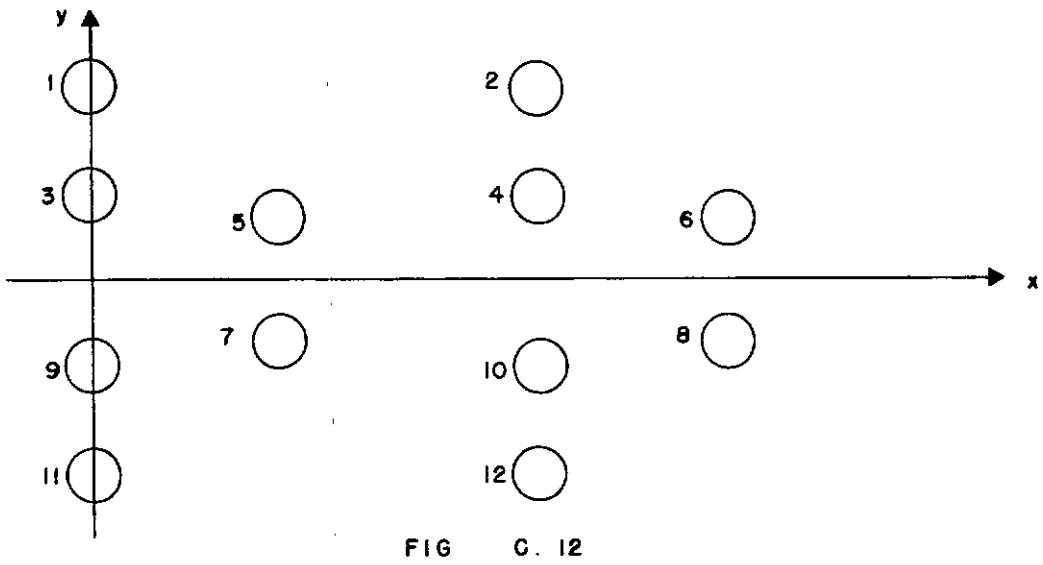
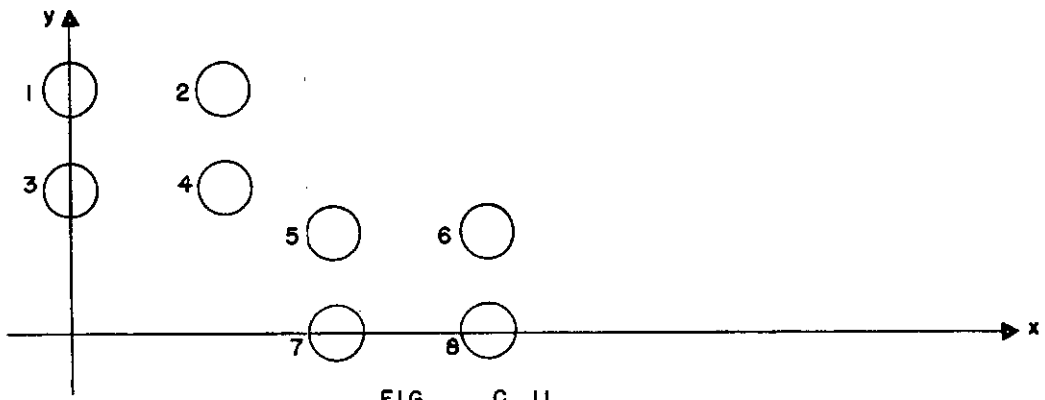


FIG. C. 10



2.5 RESUMO E FORMAT :1º CARTÃO :

1. MRODA : Número de rodas da disposição escolhida

FORMAT: I3 (colunas 1 a 3)

2. ISIM : Indica o tipo de simetria na disposição das rodas:

- uma ou nenhuma simetria → zero

- duas simetrias → qualquer nº positivo diferente de zero.

FORMAT: I2 (coluna 4 e 5)

3. PESO : Carga total atuante na disposição escolhida de rodas(kgf)

FORMAT: F10.3 (colunas 6 a 15)

4. PRESS : Pressão dos pneus (kgf/cm²)

FORMAT: F10.3 (colunas 16 a 25)

5. CBR : CBR do subleito

FORMAT: F10.3 (colunas 26 a 35)

6. NI : Coeficiente de Poisson do subleito

FORMAT: F10.3 (colunas 36 a 45)

7. PAR1 : Parâmetro de precisão na determinação do ponto máximo de deflexão (10.0 a 20.0 cm)

FORMAT: F10.3 (colunas 46 a 55)

8. PAR2 : Parâmetro de precisão que fixa a diferença máxima permitida entre a profundidade arbitrada e a espessura necessária.

FORMAT: F10.3 (colunas 56 a 65)

CARTÕES SEGUINTE (COORDENADAS) :

As coordenadas são colocadas no cartão, aos pares X e Y , no format F.10.3, ficando então, em cada cartão, 8 coordenadas relativas a 4 pontos que representam o centro da área de contato de cada roda da disposição escolhida.

2.6 - TEMPO DE COMPUTAÇÃO :

Tratando-se de um cálculo em iterações, não existe um tempo fixo. Para o problema, o tempo depende quase que unicamente do número de rodas e das características de simetria da disposição.

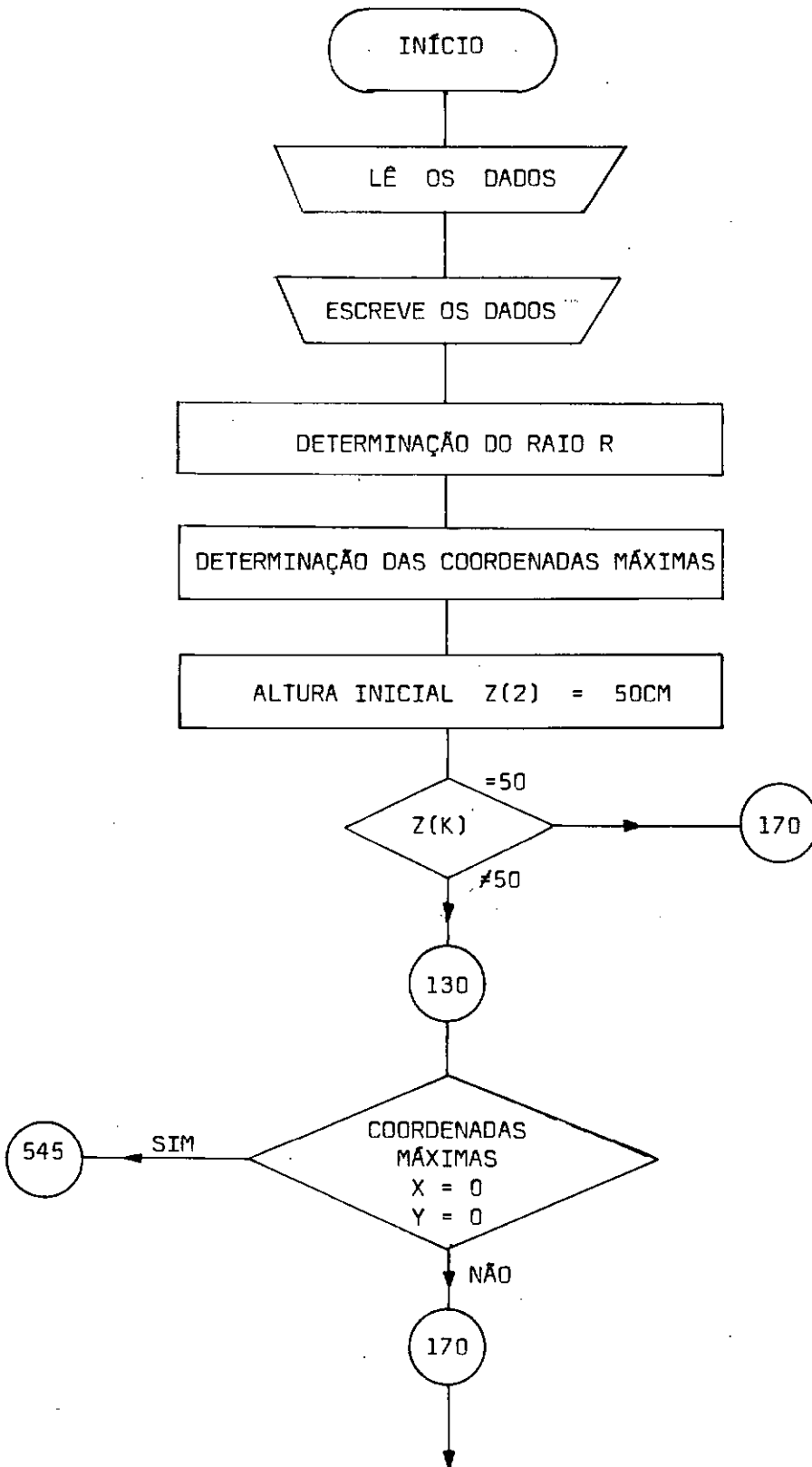
Apresentamos valores aproximados observados nos exemplos feitos, a fim de se ter uma noção deste tempo.

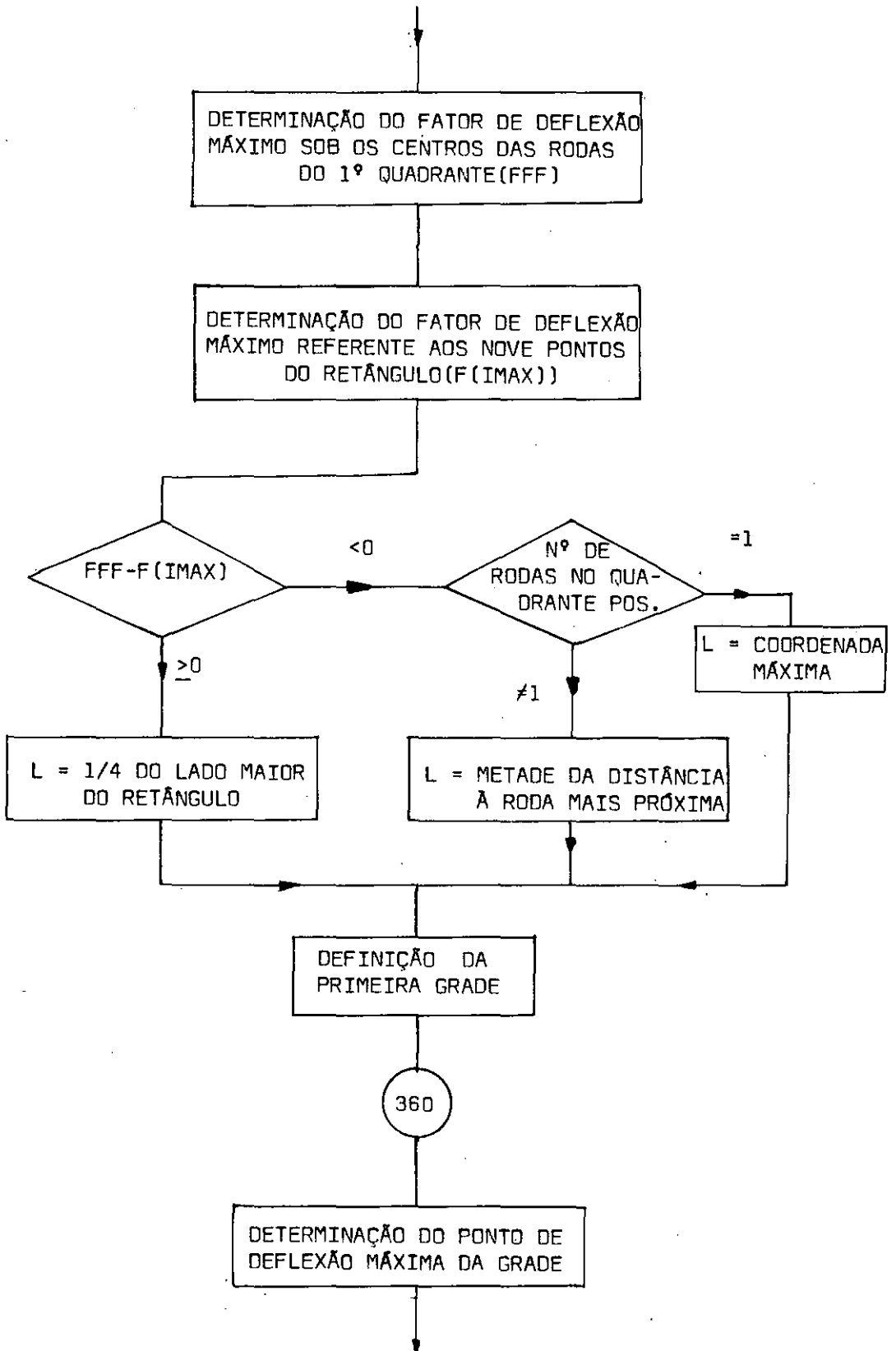
Computadores Usados:

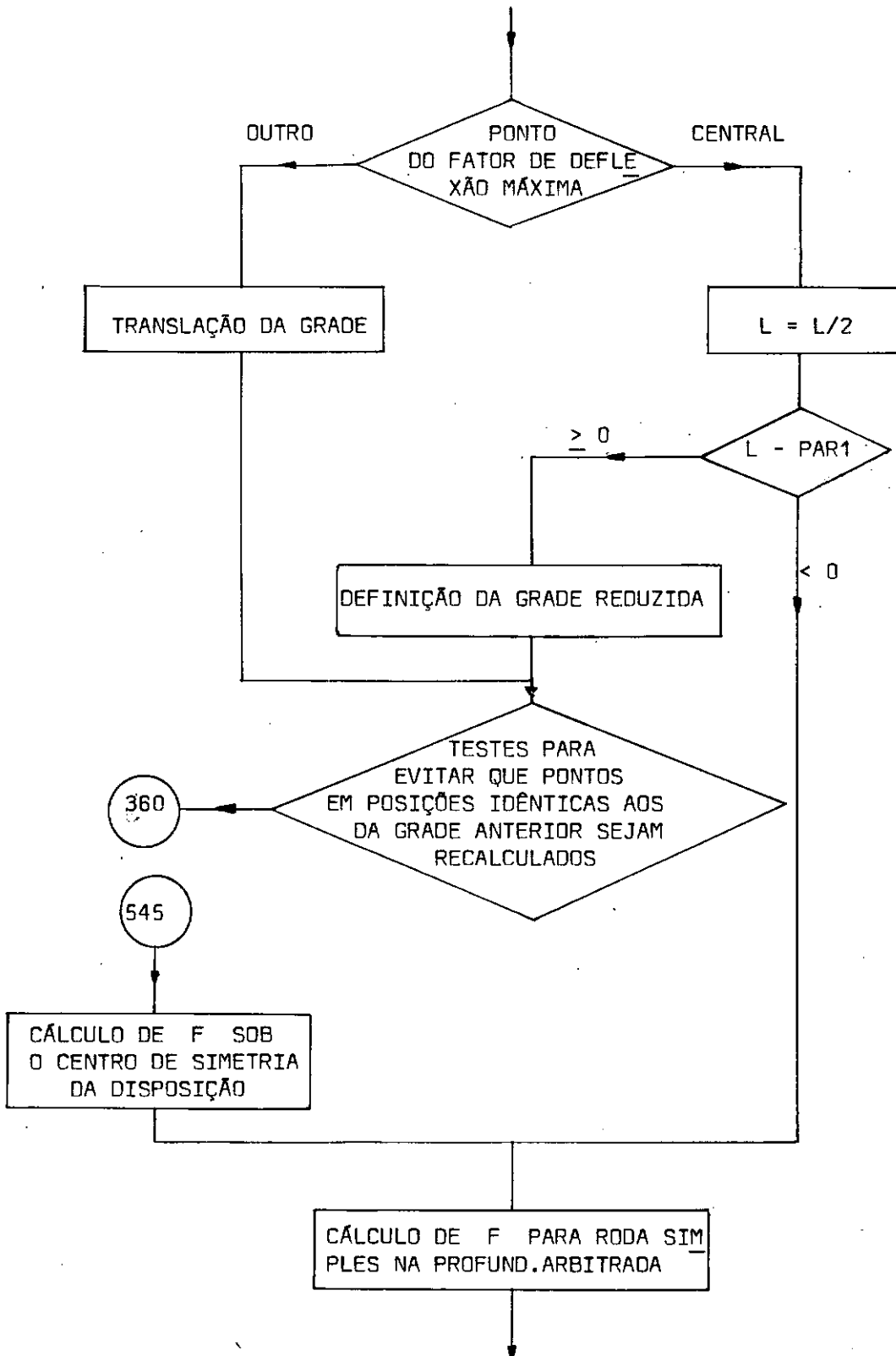
- IBM-1130 → 32 k
- IBM-360/40 → 170 k

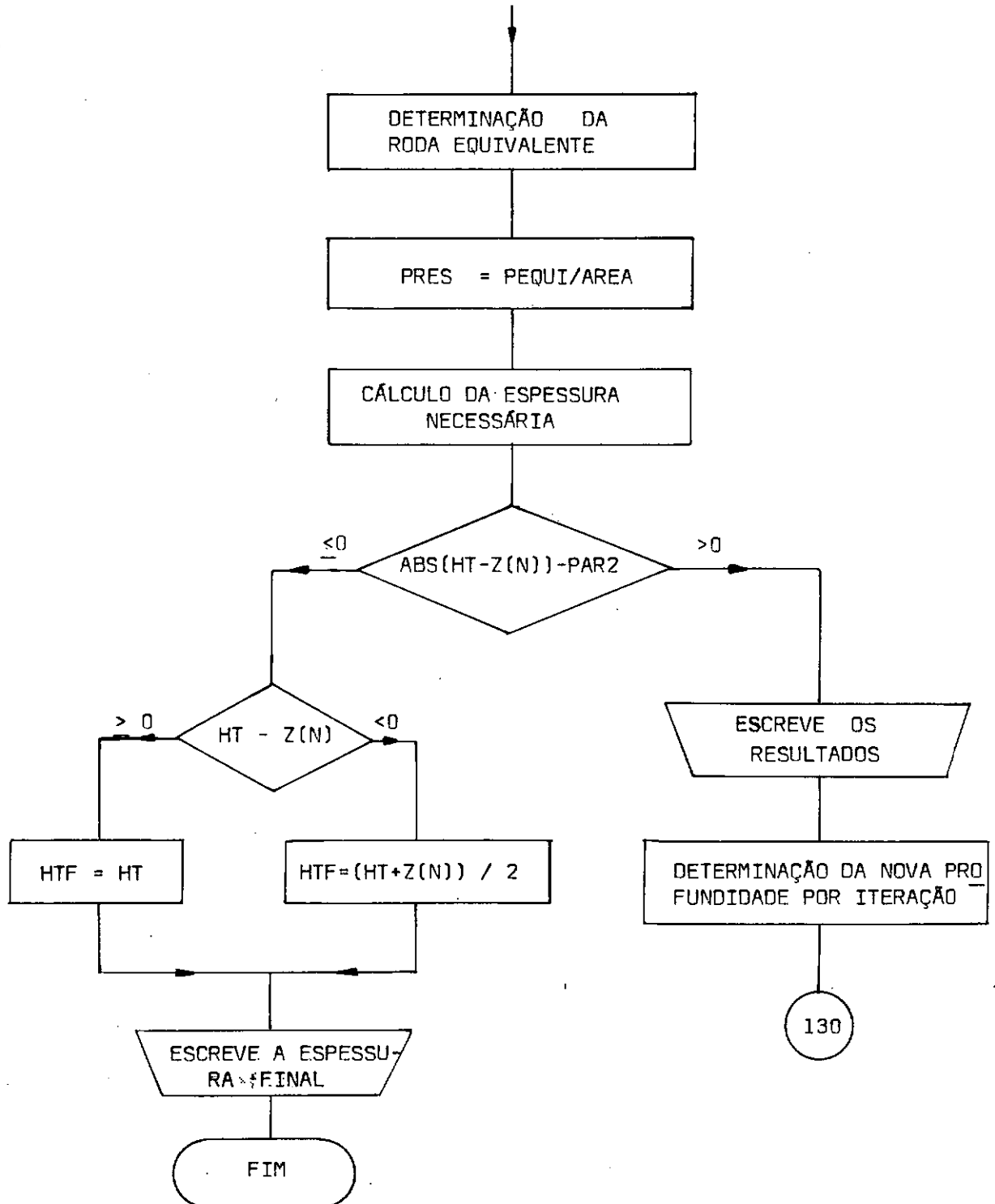
A quase totalidade dos exemplos foi feita no computador 1130, por isso, na TABELA C.1, colocamos o tempo no 1130 por iteração sem simplificação, isto é, tempo máximo por iteração, e no 360, o tempo total de programa.

NUMERO DE RODAS DA DISPOSIÇÃO	NUMERO DE SIMETRIAS	TEMPO (SEG.)	
		1130.(por iteração)	360/40 (total)
2	2	10	160
4 (duplo tandem)	2	60	180
6	2	80	190
8	assimétrica	240	510
12	1	180	420

2.7 - DIAGRAMA DE BLOCOS








```

// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
SUBROUTINE FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)
C
C .....
C . SUBROTINA PARA CALCULO DO FATOR DE DEFLEXAO DE QUALQUER .
C . PONTO DE UM ESPACO SEMI-INFINITO, COM MEIO HOMOGENEO .
C . ISOTROPO E LINEARMENTE ELASTICO .
C .....
C
REAL KSO,KTAN,KLIN,KALIN,NI,MPEQ,NPEQ
DIMENSION RO(50),FLIN(50),F(50),Z(50),FI(20),ALFA(20),SEN(2
*0),SER1(20),SER2(20),SERIE(20),RESTO(20),FATI(20),FATOR(20)
*,W(50),U(50),X(50),Y(50)
F(N)=0
C
C .....
C . TESTE INICIAL PARA EVITAR CALCULO DE PONTOS NAO CONTI- .
C . DOS NA AREA ONDE SE ENCONTRARA O PONTO MAIS SOLICITADO .
C .....
C
IF(W(N)+0.001)580,100,100
100 IF(U(N)+0.001)580,110,110
110 IF(W(N)-DXMAX-0.001)120,120,580
120 IF(U(N)-DYMAX-0.001)130,130,580
C
C .....
C . CALCULO DAS DISTANCIAS DOS CENTROS DAS RODAS AO PONTO .
C . CONSIDERADO .
C .....
C
130 DO 570 I=1,MRODA
WXQUA=(W(N)-X(I))**2
UYQUA=(U(N)-Y(I))**2
RO(I)=SQRT(WXQUA+UYQUA)/R
C
C .....
C . VALORES DO FATOR DE DEFLEXAO PARA PONTOS ESPECIAIS .
C . 1) RO=0 .
C . 2) RO=1 E Z=0 .
C .....
C
IF(RO(I)-0.01)140,140,150
140 FO=SQRT(1+Z(K)*Z(K))
F1=(2-2*NI*NI)*FO
F2=((1+NI)*Z(K)*Z(K))/FO
F3=(NI+2*NI*NI-1)*Z(K)
FLIN(I)=F1-F2+F3

```

```

      GO TO 560
150  IF(Z(K)-0.01)160,160,180
160  IF(ABS(RO(I)-1.)-0.01)170,170,180
170  FLIN(I)=(1+NI)*((1-NI)*4.0/PI)
      GO TO 560

```

C
C
C
C
C
C

```

.....
.      DETERMINACAO DOS PARAMETROS INICAIS AO CALCULO      .
.....

```

```

..... R1 E R2 .....
180  ZQUA=Z(K)*Z(K)
      ROQUA=RO(I)*RO(I)
      ROMEN=(RO(I)-1)**2
      ROMAS=(RO(I)+1)**2
      R1=SQRT(ZQUA+ROMEN)
      R2=SQRT(ZQUA+ROMAS)

```

C
C

```

..... APEQ, BPEQ E CPEQ .....
R1R2=R1*R2
APEQ=(ZQUA-ROQUA+1)/R1R2
BPEQ=(ZQUA+ROQUA+1)/R1R2
CPEQ=(ZQUA+ROQUA-1)/R1R2

```

C
C

```

..... KPEQ E KPEQ' .....
KSO=R1/R2
EME=KSO*KSO
EME1=1.0-EME
KLIN=SQRT(EME1)
KTAN=KSO/KLIN

```

C
C

```

..... ANGULOS ALFA E FI .....
ALFA1=ATAN(KTAN)
SENF1=Z(K)/R1
SENQU=SENF1*SENF1
COSFI=SQRT(1-SENQU)
IF(ABS(COSFI-0.0003))190,200,200
190  AFI=1.570796
      GO TO 210
200  TANFI=SENF1/COSFI
      AFI=ATAN(TANFI)

```

C
C
C
C
C
C
C
C

```

.....
.      CALCULO DAS INTEGRAIS ELIPTICAS NECESSARIAS AO CALCULO      .
.....

```

```

.....
..... COMPLETA DE PRIMEIRA ESPECIE ( K'(ALFA) ) .....

```

```

210  ARI=2.

```

```

      GEO=(0.5-KLIN)+0.5
      GEO=GEO+GEO*KLIN
      KALIN=0.5
      IF(GEO)220,240,270
220  WRITE(5,230)
230  FORMAT(///,10X,'O VALOR DE K E NEGATIVO')
      STOP
240  WRITE(5,250)
250  FORMAT(///,10X,'O VALOR DE K E INFINITO')
      STOP
260  GEO=GEO*AARI
270  GEO=SQRT(GEO)
      GEO=GEO+GEO
      AARI=ARI
      ARI=ARI+GEO
      KALIN=KALIN+KALIN
      IF(GEO/AARI-0.99999)260,280,280
280  KALIN=KALIN/ARI*6.2831851
C
C  .....
C  ..... INCOMPLETA DE PRIMEIRA ESPECIE ( F(FI,ALFA) ) .....
C
      FI(1)=AFI
      ALFA(1)=ALFA1
C
C  ITERACAO DO ALFA
C
      PRODU=1
      M=1
290  SEN(M)=(2.0/(1+COS(ALFA(M))))
      SEN0=SEN(M)-1
      PRODU=PRODU*SEN(M)
      COSEN=SQRT(1-SEN0*SEN0)
      IF(ABS(COSEN-0.0003))300,310,310
300  ALFA(M+1)=1.570796
      GO TO 320
310  TANGE=SEN0/COSEN
      ALFA(M+1)=ATAN(TANGE)
C
C  ITERACAO DO FI
C
320  IF(ABS(COS(FI(M)))-0.0003)330,340,340
330  TAG=3437.
      GO TO 350
340  TAG=SIN(FI(M))/COS(FI(M))
350  TAFI=TAG*COS(ALFA(M))
      ANG = ATAN( TAFI )
      IF(M-2)430,360,360
360  IF(ANG)400,370,370
370  IF(ANG-FI(M)-0.0001)380,430,390

```

```

380 ANG=ANG+PI
GO TO 370
390 FI(M+1)=ANG-PI+FI(M)
GO TO 440
400 ANG=ANG+PI
410 IF(ANG-FI(M)+.0001)420,430,430
420 ANG=ANG+PI
GO TO 410
430 FI(M+1)=ANG+FI(M)
440 IF(SENO-0.00002)460,460,450
450 M=M+1
GO TO 290
460 OMEGA=FI(M+1)/(2.**M)
EFE=OMEGA*PRODU

```

```

C
C .....
C ..... INCOMPLETA DE SEGUNDA ESPECIE ( E(FI,ALFA) ) .....
C

```

CALCULO DA SERIE

```

C
C SER1(1)=1+0.5*SIN(ALFA(2))
C SER2(1)=0.5*SQRT(SIN(ALFA(2)))*SIN(FI(2))
C SERIE(1)=1-0.5*(SIN(ALFA(1)))*2*SER1(1)
C RESTO(1)=SIN(ALFA(1))*SER2(1)
C IF(M-1)480,470,480
470 E=EFE*SERIE(1)+RESTO(1)
GO TO 500
480 FATI(1)=0.5*SIN(ALFA(2))
FATOR(1)=0.5*SQRT(SIN(ALFA(2)))
K2=M-1
DO 490 L=2,K2
FATI(L)=FATI(L-1)*0.5*SIN(ALFA(L+1))
FATOR(L)=FATOR(L-1)*0.5*SQRT(SIN(ALFA(L+1)))
SER1(L)=SER1(L-1)+FATI(L)
SER2(L)=SER2(L-1)+FATOR(L)*SIN(FI(L+1))
SERIE(L)=1-0.5*(SIN(ALFA(1)))*2*SER1(L)
RESTO(L)=SIN(ALFA(1))*SER2(L)
490 CONTINUE
E=EFE*SERIE(K2)+RESTO(K2)

```

```

C
C .....
C ..... COMPLETA DE PRIMEIRA ESPECIE ( K(ALFA) ) .....
C

```

```

500 AKA=PRODU*PI/2.

```

```

C
C .....
C ..... COMPLETA DE SEGUNDA ESPECIE ( E(ALFA) ) .....
C

```

```

AE=AKA*SERIE(K2)

```

```

C

```



```

C .....
C ..... COMPLETA DE SEGUNDA ESPECIE ( E*(ALFA) ) .....
C
C ELIN=(PI/2.+KALIN*AKA-AE*KALIN)/AKA
C
C .....
C ..... DETERMINACAO DOS PARAMETROS RESTANTES NECESSARIOS .....
C .....
C ..... D .....
C
C IF(ABS(RO(I)-1.)-0.01)510,510,520
510 D=PI/2.0
GO TO 550
520 IF(RO(I)-1.)540,530,530
530 D=KALIN*E-(KALIN-ELIN)*EFE
GO TO 550
540 D=PI-(KALIN*E-(KALIN-ELIN)*EFE)
C
C ..... MPEQ E NPEQ .....
C
550 MPEQ=R2*ELIN
NPEQ=R1*KALIN
C
C ..... V, H, VZ E A .....
C
V=2*MPEQ-2*Z(K)*D-NPEQ*(CPEQ-APEQ)
H=V/PI
VZ=(Z(K)*NPEQ*(BPEQ-APEQ)-2*ROQUA*D)/ROQUA
A=-(VZ)/(2.*PI)
C
C .....
C ..... FATOR DE DEFLEXAO RELATIVO A UMA RODA ( FLIN(I) ) .....
C .....
C
C FLIN(I)=(1+NI)*((1-NI)*H+Z(K)*A)
C
C .....
C ..... VALOR DO FATOR DE DEFLEXAO ACUMULADO, CUJO ULTIMO VALOR .....
C ..... E O FATOR DE DEFLEXAO TOTAL DO PONTO CONSIDERADO COM A .....
C ..... INFLUENCIA DE TODAS AS RODAS .....
C
560 F(N)=F(N)+FLIN(I)
570 CONTINUE
580 RETURN
END
// DUP
*DELETE FENE
*STORE WS UA FENE

```

```

// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
*IOCS (2501 READER,1403 PRINTER )
C
C
C .....
C . PROGRAMA PARA CALCULO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS FLEXI- .
C . VEIS DE AEROPORTOS(APLICAVEL TAMBEM A RODOVIAS), SEGUN- .
C . DO METODO DO CORPO DE ENGENHEIROS DO EXERCITO AMERICANO .
C .....
C
C
C REAL NI
C DIMENSION X(50),Y(50),Z(50),W(50),U(50),F(50),RO(50),XX(20)
C *,YY(20),M(10),X0(10),Y0(10),ZZ(50),XMAX(20),YMAX(20),KA(9),
C *KB(9),KC(9),KD(9),KIO1(12),KIO2(12),KF1(8),KM1(4),KF2(12),K
C *F3(8),KM3(4),KF4(12),KM4(6),KF6(12),KM6(6),KF7(8),KM7(4),KF
C *9(8),KM9(4)
C DATA KA/0,1,2,0,1,2,0,1,2/,KB/2,2,2,1,1,1,0,0,0/,KC/-1,0,1,
C *-1,0,1,-1,0,1/,KD/1,1,1,0,0,0,-1,-1,-1/,KIO1/1,3,4,6,7,9,2,
C *2,5,5,8,8/,KIO2/4,7,5,8,6,9,1,1,2,2,3,3/
C DATA KF1/6,8,9,5,2,4,5,1/,KM1/5,6,8,9/,KF2/7,8,9,4,5,6,4,5,
C *6,1,2,3/,KF3/7,8,4,5,5,6,2,3/,KM3/4,5,7,8/,KF4/9,8,6,5,3,2,
C *8,7,5,4,2,1/,KM4/2,3,5,6,8,9/,KF6/1,2,4,5,7,8,2,3,5,6,8,9/,
C *KM6/1,2,4,5,7,8/,KF7/2,3,5,6,4,5,7,8/,KM7/2,3,5,6/
C DATA KF9/1,2,4,5,5,6,8,9/,KM9/1,2,4,5/
C
C .....
C . LEITURA DOS DADOS .
C .....
C . MRODA = NUMERO DE RODAS DA DISPOSICAO ESCOLHIDA .
C . PESO = PESO TOTAL ATUANTE NA DISPOSICAO ( KG ) .
C . PRESS = PRESSAO DOS PNEUS ( KG/CM2 ) .
C . CBR = CBR DO SUBLEITO .
C . NI = COEFICIENTE DE POISSON DO SUBLEITO .
C . X , Y = COORDENADAS DO CENTRO DE CADA AREA ( CM ) .
C . PAR1 = PRECISAO DESEJADA NA DETERMINACAO DO PONTO .
C . DE MAXIMA DEFLEXAO ( CM ) .
C . PAR2 = PRECISAO DESEJADA NA DETERMINACAO DA .
C . ESPESSURA NECESSARIA ( CM ) .
C .....
C
C READ(8,605)MRODA,ISIM,PESO,PRESS,CBR,NI,PAR1,PAR2
C READ(8,610)(X(JJ),Y(JJ)),JJ=1,MRODA)
C
C .....
C . ESCREVE OS DADOS .
C .....
C
C WRITE(5,615)

```

```

WRITE(5,620)
WRITE(5,625)
WRITE(5,630)MRODA
DO 100 JJ=1,MRODA
WRITE(5,635)JJ,X(JJ),Y(JJ)
100 CONTINUE
WRITE(5,640)PESO,PRESS
WRITE(5,645)
WRITE(5,650)CBR,NI
WRITE(5,655)PAR1,PAR2

```

C
C
C
C
C

```

.....
.                DETERMINACAO DO RAO R                .
.....

```

```

PI=3.1415926
AREAT=PESO/PRESS
AREA=AREAT/MRODA
R=SQRT(AREA/PI)

```

C
C
C
C
C

```

.....
.                CALCULO DAS COORDENADAS MAXIMAS        .
.....

```

```

MAXI=1
MAX=1
DO 120 L1=1,MRODA
IF(ABS(Y(L1))-ABS(Y(MAX)))110,110,105
105 MAX=L1
110 IF(ABS(X(L1))-ABS(X(MAXI)))120,120,115
115 MAXI=L1
120 CONTINUE
DXMAX=ABS(X(MAXI))
DYMAX=ABS(Y(MAXI))
DX=DXMAX/2.
DY=DYMAX/2.
WRITE(5,660)
WRITE(5,665)

```

C
C
C
C
C
C

```

.....
. DEFINICAO DAS COORDENADAS DOS PONTOS SOBRE OS LADOS DO .
. RETANGULO EM QUE SE ENCONTRARA O PONTO MAIS SOLICITADO .
.....

```

```

DO 125 NX=1,9
XO(NX)=KA(NX)*DX
YO(NX)=KB(NX)*DY
125 CONTINUE

```

C
C

```

C .....
C .           ALTURAS INICIAIS PARA ITERACAO           .
C .....
ZZ(1)=0.0
Z(1)=0.0
XMAX(1)=20.0
YMAX(1)=20.0
K=2
ZZ(K)=50.0
130 Z(K)=ZZ(K)/R
LLL=K-1
IF(ISIM)170,170,131

C .....
C . TESTE PARA VERIFICAR SE O PONTO MAIS SOLICITADO  ALCAN- .
C .           COU O CENTRO DE SIMETRIA DA DISPOSICAO      .
C .....
131 IF(Z(K)-Z(K-1))150,150,135
135 IF(K-2)170,170,140
140 IF(ABS(XMAX(K-1))-0.002)145,145,170
145 IF(ABS(YMAX(K-1))-0.002)545,545,170
150 DO 165 KM=1,K
    KN=K+1-KM
    IF(Z(K)-Z(KN-1))165,165,155
155 IF(ABS(XMAX(KN-1))-0.002)160,160,170
160 IF(ABS(YMAX(KN-1))-0.002)545,545,170
165 CONTINUE

C .....
C . DETERMINACAO DO FATOR DE DEFLEXAO PARA OS PONTOS  RELA- .
C . TIVOS AOS CENTROS DAS AREAS DE CONTATO DE CADA RODA .
C . CONTIDOS NO RETANGULO ONDE SE ENCONTRARA O PONTO  MAIS .
C .           SOLICITADO                                   .
C .....
170 DO 190 N=1,MRODA
    IF(X(N))175,180,180
175 F(N)=0.
    GO TO 190
180 IF(Y(N))175,185,185
185 W(N)=X(N)
    U(N)=Y(N)
    CALL FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)
190 CONTINUE

C .....
C . ESCOLHA DO FATOR DE DEFLEXAO MAXIMO PARA OS PONTOS SOB .
C . OS CENTROS DAS AREAS DE CONTATO DE CADA RODA          .
C .....

```

```

JMAX=1
DO 200 J=2,MRODA
IF(F(JMAX)-F(J))195,195,200

```

```

195 JMAX=J
200 CONTINUE
FFF=F(JMAX)

```

C
C
C
C
C
C
C

```

.....
. DETERMINACAO DO FATOR DE DEFLEXAO PARA NOVE PONTOS SI- .
. TUADOS NOS LADOS E CENTRO DO RETANGULO ONDE SE ENCONTRA .
. RA O PONTO MAIS SOLICITADO .
.....

```

```

IF(DX-0.0002)205,205,220
205 DO 210 N=2,8,3
W(N)=X0(N)
U(N)=Y0(N)
CALL FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)

```

```

210 CONTINUE
DO 215 I01=1,6
KKI01=KI01(I01)
LKI01=KI01(I01+6)
F(KKI01)=F(LKI01)

```

```

215 CONTINUE
GO TO 250

```

```

220 IF(DY-0.0002)225,225,240

```

```

225 DO 230 N=1,3
W(N)=X0(N)
U(N)=Y0(N)
CALL FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)

```

```

230 CONTINUE
DO 235 I02=1,6
KKI02=KI02(I02)
LKI02=KI02(I02+6)
F(KKI02)=F(LKI02)

```

```

235 CONTINUE
GO TO 250

```

```

240 DO 245 N=1,9
W(N)=X0(N)
U(N)=Y0(N)
CALL FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)

```

```

245 CONTINUE

```

```

250 IMAX=1
DO 260 M1=2,9
IF(F(M1)-F(IMAX))260,260,255

```

```

255 IMAX=M1
260 CONTINUE

```

C
C
C

```

C .....
C . TESTE PARA VERIFICAR SE O PONTO MAIS SOLICITADO ESTA .
C . SOB O CENTRO DAS AREAS DE CONTATO DAS RODAS OU NUM DOS .
C . PONTOS DA GRADE CONTIDA NOS LADOS DO RETANGULO CITADO .
C .....
C
C IF(FFF-F(IMAX))265,280,280
C
C .....
C . DETERMINACAO DA DISTANCIA ENTRE OS PONTOS DA GRADE CASO .
C . O PONTO INICIAL MAIS SOLICITADO SEJA UM DOS DA GRADE .
C . CONTIDA NOS LADOS DO RETANGULO .
C .....
C
265 XX0=X0(IMAX)
    YY0=Y0(IMAX)
    IF(DX-DY)270,270,275
270 DIST=DY/2.
    GO TO 350
275 DIST=DX/2.
    GO TO 350
C
C .....
C . DETERMINACAO DA DISTANCIA ENTRE OS PONTOS DA GRADE CASO .
C . O PONTO INICIAL MAIS SOLICITADO ESTEJA SOB O CENTRO DE .
C . UMA DAS AREAS DE CONTATO DAS RODAS .
C .....
C
280 XX0=X(JMAX)
    YY0=Y(JMAX)
    DO 315 L=1,MRODA
    IF(X(L))285,290,290
285 RO(L)=1000.
    GO TO 315
290 IF(Y(L))295,300,300
295 GO TO 285
300 IF(L-JMAX)310,305,310
305 RO(JMAX)=1000.
    GO TO 315
310 RO(L)=SQRT((X(JMAX)-X(L))**2+(Y(JMAX)-Y(L))**2)
315 CONTINUE
    MIN=1
    DO 325 IK=2,MRODA
    IF(RO(IK)-RO(MIN))320,325,325
320 MIN=IK
325 CONTINUE
    IF(RO(MIN)-1000+0.02)345,330,330
330 IF(DXMAX-DYMAX)335,335,340
335 RO(MIN)=DYMAX
    GO TO 345

```

```

340 RO(MIN)=DXMAX
345 ALARG=RO(MIN)
    DIST=ALARG/2.

```

```

C
C
C
C
C

```

```

350 DO 355 NXX=1,9
    XX(NXX)=XX0+KC(NXX)*DIST
    YY(NXX)=YY0+KD(NXX)*DIST
355 CONTINUE
    KK=1

```

```

C
C
C
C
C
C

```

```

.....
. DETERMINACAO DOS FATORES DE DEFLEXAO PARA OS NOVE PON- .
. TOS DA GRADE DEFINITIVA .
.....

```

```

360 DO 385 N=1,9
    IF(KK-1)365,380,365
365 DO 375 I=1,KK
    IF(N-M(I))370,385,370
370 IF(N-M(I))380,375,375
375 CONTINUE
380 W(N)=XX(N)
    U(N)=YY(N)
    CALL FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)
385 CONTINUE

```

```

C
C
C
C
C

```

```

.....
. DETERMINACAO DO FATOR DE DEFLEXAO MAXIMO RELATIVO AOS .
. PONTOS DESSA GRADE .
.....

```

```

JMAX=1
DO 395 J=1,9
    IF(F(JMAX)-F(J))390,390,395
390 JMAX=J
395 CONTINUE

```

```

C
C
C
C
C

```

```

.....
. TESTE PARA VERIFICAR SE O PONTO MAIS SOLICITADO MUDOU .
.....

```

```

IF(JMAX-5)405,400,405

```

```

C
C
C
C
C

```

```

.....
. CASO MUDOU, REDEFINICAO DA DISTANCIA ENTRE OS PONTOS DA .
. GRADE .
.....

```

400 DIST=DIST/2.

C
C
C . TESTE PARA VERIFICAR SE A DISTANCIA ENTRE OS PONTOS DA .
C . GRADE, APOS VARIOS MOVIMENTOS E REDUCOES DA GRADE, AL- .
C . CANCOU O VALOR MINIMO DESEJADO (PAR1) .
C
C

IF(DIST-PAR1/2.)550,405,405

C
C
C . REDEFINICAO DAS COORDENADAS DOS PONTOS DA NOVA GRADE .
C
C

405 XXX=XX(JMAX)
YYY=YY(JMAX)
DO 410 NY=1,9
XX(NY)=XXX+KC(NY)*DIST
YY(NY)=YYY+KD(NY)*DIST
410 CONTINUE

C
C
C . TESTES DESTINADOS A EVITAR QUE FATORES DE DEFLEXAO DE .
C . PONTOS CONTIDOS NA NOVA GRADE, PERTENCENTES A ANTERIOR, .
C . SEJAM RECALCULADOS .
C
C

IF(JMAX-5)420,415,420

415 KK=1
GO TO 360
420 IF(JMAX-1)435,425,435
425 DO 430 I1=1,4
KKF1=KF1(I1)
LKFI=KF1(I1+4)
F(KKF1)=F(LKF1)
M(I1)=KM1(I1)

430 CONTINUE

KK=4

GO TO 360

435 IF(JMAX-2)450,440,450

440 DO 445 I2=1,6
KKF2=KF2(I2)
LKFI=KF2(I2+6)
F(KKF2)=F(LKF2)
M(I2)=I2+3

445 CONTINUE

KK=6

GO TO 360

450 IF(JMAX-3)465,455,465

455 DO 460 I3=1,4


```
      KKF3=KF3(I3)
      LKF3=KF3(I3+4)
      F(KKF3)=F(LKF3)
      M(I3)=KM3(I3)
460  CONTINUE
      KK=4
      GO TO 360
465  IF(JMAX-4)480,470,480
470  DO 475 I4=1,6
      KKF4=KF4(I4)
      LKF4=KF4(I4+6)
      F(KKF4)=F(LKF4)
      M(I4)=KM4(I4)
475  CONTINUE
      KK=6
      GO TO 360
480  IF(JMAX-6)495,485,495
485  DO 490 I6=1,6
      KKF6=KF6(I6)
      LKF6=KF6(I6+6)
      F(KKF6)=F(LKF6)
      M(I6)=KM6(I6)
490  CONTINUE
      KK=6
      GO TO 360
495  IF(JMAX-7)510,500,510
500  DO 505 I7=1,4
      KKF7=KF7(I7)
      LKF7=KF7(I7+4)
      F(KKF7)=F(LKF7)
      M(I7)=KM7(I7)
505  CONTINUE
      KK=4
      GO TO 360
510  IF(JMAX-8)525,515,525
515  DO 520 I8=1,6
      F(I8)=F(I8+3)
      M(I8)=I8
520  CONTINUE
      KK=6
      GO TO 360
525  IF(JMAX-9)540,530,540
530  DO 535 I9=1,4
      KKF9=KF9(I9)
      LKF9=KF9(I9+4)
      F(KKF9)=F(LKF9)
      M(I9)=KM9(I9)
535  CONTINUE
      KK=4
      GO TO 360
```

```

540 WRITE(5,690)
GO TO 695

```

```

.....
. CALCULO DO FATOR DE DEFLEXAO DO PONTO RELATIVO AO CEN- .
. TRO DE SIMETRIA DA DISPOSICAO .
.....

```

```

545 N=JMAX
W(N)=XX(N)
U(N)=YY(N)
CALL FENE(MRODA,W,U,X,Y,R,Z,PI,NI,N,K,DXMAX,DYMAX,F)

```

```

.....
. CALCULO DO FATOR DE DEFLEXAO RELATIVO A RODA SIMPLES .
.....

```

```

550 F0=SQRT(1+Z(K)*Z(K))
F1=(2-2*NI*NI)*F0
F2=((1+NI)*Z(K)*Z(K))/F0
F3=(NI+2*NI*NI-1)*Z(K)
FS=F1-F2+F3

```

```

.....
. CALCULO DA RODA EQUIVALENTE .
.....

```

```

P2=PESO/MRODA
PEQUI=P2*F(JMAX)/FS

```

```

.....
. DEFINICAO DAS COORDENADAS DO PONTO DE DEFLEXAO MAXIMA .
.....

```

```

XMAX(K)=XXX
YMAX(K)=YYY

```

```

.....
. CALCULO DA ESPESSURA NECESSARIA PARA O VALOR DA RODA E- .
. QUIVALENTE ACHADA .
.....

```

```

PRES=PEQUI/AREA
HT=SQRT(PEQUI*(1./(0.57*CBR)-1./(PRES*PI)))

```

```

.....
. ESCRIVE OS RESULTADOS .
.....

```

```

WRITE(5,670)LLL,F(JMAX),XMAX(K),YMAX(K),PEQUI,ZZ(K),HT

```

```
C . TESTE PARA VERIFICAR SE A ESPESSURA NECESSARIA COINCI-  
C . DE COM A PROFUNDIDADE PARA A QUAL FOI CALCULADA A RODA  
C . EQUIVALENTE  
C .....  
C IF(ABS(HT-ZZ(K))-PAR2)600,600,555  
  
C .....  
C . DETERMINACAO DE NOVA ALTURA PARA A ITERACAO  
C .....  
C  
555 IF(HT-ZZ(K))560,600,575  
560 K=K+1  
IF(ZZ(K-1)-ZZ(K-2))565,565,570  
565 ZZ(K)=ZZ(K-1)-(ZZ(K-2)-ZZ(K-1))/2.0  
GO TO 130  
570 ZZ(K)=ZZ(K-2)+(ZZ(K-1)-ZZ(K-2))/2.0  
GO TO 130  
575 K=K+1  
IF(ZZ(K-1)-ZZ(K-2))580,580,585  
580 ZZ(K)=ZZ(K-1)+(ZZ(K-2)-ZZ(K-1))/2.0  
GO TO 130  
585 IF((ZZ(K-1)-ZZ(K-2)+0.5)-50.0)595,590,590  
590 ZZ(K)=2*ZZ(K-1)-ZZ(K-2)  
GO TO 130  
595 ZZ(K)=(ZZ(K-1)-ZZ(K-2))/2.0+ZZ(K-1)  
GO TO 130  
600 IF(HT-ZZ(K))602,601,601  
601 HTF=HT  
GO TO 603  
602 HTF=(ZZ(K)+HT)/2.0  
603 WRITE(5,675)  
WRITE(5,680)  
WRITE(5,685)HTF  
  
C .....  
C . FORMATS  
C .....  
C  
605 FORMAT(I3,I2,6F10.3)  
610 FORMAT(8F10.3)  
615 FORMAT(1H1,/////,1X,64(' '),/,1X,' ',5X,'COPPE - UFRJ',10X,  
*'ABRIL/73',10X,' TESE (M.SC.)',5X,' ',/,1X,' ',5X,'PROGRAMA'  
*, '=CIVIL',15X,'AREA=MECANICA DOS SOLOS',5X,' ',/,1X,' ',5X,  
*'ORIENTADOR = PROF. JACQUES DE MEDINA',21X,' ',/,1X,' ',5X,  
*'ALUNO = PAULO ROBERTO VERBICARIO CARIM',14X,' ',/,1X,  
*64(' '),/)  
620 FORMAT(1X,64('*'),/,1X,'*',3X,'PROGRAMA PARA CALCULO DA ES'  
*, 'PESSURA DE PAVIMENTOS FLEXI-',3X,'*',/,1X,'*',3X,'VEIS '
```

```

*, 'DE AEROPORTOS (APLICAVEL TAMBEM A RODOVIAS), SEGUNDO', 3X,
*, '*', '/', 1X, '*', 3X, 'O METODO DO CORPO DE ENGENHEIROS DO EXE'
*, 'RCITO AMERICANO', 3X, '*', '/', 1X, 64('*', '/')
625 FORMAT(1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 17X, 'CARACTERISTICAS DA AERONAV'
*, 'E', 18X, '.', '/', 1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 62X, '.')
630 FORMAT(1X, '.', 5X, 'NUMERO DE RODAS ', 13, 36X, '.', '/', 1X, '.', 6
*, 2X, '.', '/', 1X, '.', 5X, 'COORDENADAS DOS CENTROS DAS RODAS(CM)',
*, 20X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 5X, 'RODA', 6X, 'X', 11X, 'Y',
*, 34X, '.')
635 FORMAT(1X, '.', 5X, I2, 2(5X, F7.2), 31X, '.')
640 FORMAT(1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 5X, 'PESO ATUANTE NA DISPOS',
*, 'ICAO', 2X, F8.0, 2X, 'KG', 17X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 5X
*, 'PRESSAO DOS PNEUS', 12X, F8.1, 1X, 'KG/CM2', 13X, '.', '/', 1X, '.',
*, 62X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.')
645 FORMAT(1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 17X, 'CARACTERISTICAS DO SUBLEIT'
*, 'O', 18X, '.', '/', 1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 62X, '.')
650 FORMAT(1X, '.', 5X, 'CBR', 22X, F5.2, 27X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/',
*, 1X, '.', 5X, 'COEFICIENTE DE POISSON', 3X, F5.2, 27X, '.', '/', 1X, '.',
*, 62X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, 64('.'))
655 FORMAT(1X, '.', 14X, 'PARAMETROS DE PRECISAO ESCOLHIDOS', 15X,
*, '.', '/', 1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 5X, 'PARA O PONT'
*, 'O MAIS SOLICITADO', F7.2, 1X, 'CM', 19X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.',
*, '/', 1X, '.', 5X, 'PARA A ESPESSURA NECESSARIA', F8.2, 1X, 'CM', 19X,
*, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, 64('.'))
660 FORMAT(1H1, //, 1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 27X,
*, 'ITERACOES', 26X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, 64('.'), '/')
665 FORMAT(1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 1X, 'IT', 1X, '.', 3X, 'F', 3X, '.', 4X,
*, 'X', 4X, '.', 4X, 'Y', 4X, '.', 4X, 'P', 4X, '.', 4X, 'Z', 4X, '.', 4X, 'H'
*, 4X, '.', '/', 1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 4X, '.', 7X, 5('.', 9X), '.')
670 FORMAT(1X, '.', I3, 1X, '.', F6.3, 1X, '.', 2( F8.2, 1X, '.'), F8.0, 1X
*, '.', 2(F8.2, 1X, '.'), '/', 1X, '.', 4X, '.', 7X, '.', 5(9X, '.))
675 FORMAT(1X, 64('.'), '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 10X, 'IT = ITER'
*, 'ACAO', 39X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 10X, 'F = FATOR D'
*, 'E DEFLEXAO MAXIMO', 24X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 10X,
*, 'X, Y = COORDENADAS DO PONTO MAIS SOLICITADO (CM)', 5X, '.', '/',
*, 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 10X, 'P = RODA EQUIVALENTE (KG)', 27X
*, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.')
680 FORMAT(1X, '.', 10X, 'Z = PROFUNDIDADE ARBITRADA (CM)', 21X, '.'
*, '/', 1X, '.', 62X, '.', '/', 1X, '.', 10X, 'H = ESPESSURA NECESSARIA ('
*, 'CM)', 23X, '.', '/', 1X, '.', 62X, '.')
685 FORMAT(1X, 64('.'), //, 1X, 64('*'), '/', 1X, '*', 62X, '*', '/', 1X, '*',
*, 14X, 'ESPESSURA FINAL', F10.2, 2X, 'CM', 19X, '*', '/', 1X, '*', 62X,
*, '*', '/', 1X, 64('*'))
690 FORMAT(///, 'HA ALGO ERRADO')
C
695 CALL EXIT
END

```

D. APLICAÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

Como aplicação do programa, apresentamos um exemplo em que consideramos o avião CONCORDE (FIG. C.10).

Na primeira folha estão os dados fornecidos e na segunda, as diversas iterações efetuadas pelo programa, até a determinação da espessura necessária (final).

COPPE - UFRJ ABRIL/73 TESE (M.SC.)
PROGRAMA=CIVIL AREA=MECANICA DOS SOLOS
ORIENTADOR = PROF. JACQUES DE MEDINA
ALUNO = PAULO ROBERTO VERBICARIO CARIM

```
*****
*   PROGRAMA PARA CALCULO DA ESPESSURA DE PAVIMENTOS FLEXI-   *
*   VEIS DE AEROPORTOS (APLICAVEL TAMBEM A RODOVIAS),SEGUNDO   *
*   O METODO DO CORPO DE ENGENHEIROS DO EXERCITO AMERICANO     *
*****
```

CARACTERÍSTICAS DA AERONAVE

NUMERO DE RODAS 4

COORDENADAS DOS CENTROS DAS RODAS (CM)

RODA	X	Y
1	-83.50	33.50
2	83.50	33.50
3	-83.50	-33.50
4	83.50	-33.50

PESO ATUANTE NA DISPOSICAO 176870. KG

PRESSAO DOS PNEUS 13.2 KG/CM2

CARACTERISTICAS DO SUBLEITO

CBR	10.00
-----	-------

COEFICIENTE DE POISSON 0.30

PARAMETROS DE PRECISAO ESCOLHIDOS

PARA O PONTO MAIS SOLICITADO 10.00 CM

PARA A ESPESSURA NECESSARIA 1.00 CM

ITERACOES

IT	F	X	Y	P	Z	H
1	1.762	78.28	0.00	90039.	50.00	121.36
2	1.272	62.62	0.00	115745.	100.00	138.70
3	1.029	0.00	0.00	136947.	150.00	151.52
4	0.858	0.00	0.00	150874.	200.00	159.38
5	0.939	0.00	0.00	144908.	175.00	156.06
6	0.983	0.00	0.00	141218.	162.50	153.97
7	1.006	0.00	0.00	139164.	156.25	152.80
8	1.017	0.00	0.00	138075.	153.12	152.17

IT = ITERACAO

F = FATOR DE DEFLEXAO MAXIMO

X,Y = COORDENADAS DO PONTO MAIS SOLICITADO (CM)

P = RODA EQUIVALENTE (KG)

Z = PROFUNDIDADE ARBITRADA (CM)

H = ESPESSURA NECESSARIA (CM)

 *
 * ESPESSURA FINAL 152.65 CM *
 *

E. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DI-
MENSIONAMENTO COM AUXÍLIO DO PROGRAMA DESEN-
VOLVIDO.

Com o propósito de observar a influência de cada variável que entra no cálculo da espessura determinada no programa, escolhemos três tipos de pernas principais de trens de pouso (FIG. E.1) e estudamos a variação de cada uma delas, nestas disposições.

São quatro variáveis: peso da aeronave, pressão dos pneus, CBR e coeficiente de Poisson do subleito. Mantendo-se fixas três delas, variamos a quarta e assim pudemos observar sua influência na determinação da espessura, em aproximadamente 130 casos distintos.

As variações do peso, pressão e coeficiente de Poisson, fizemos para dois valores fixos de CBR : 3 ou 4 e 12, isto é, um valor baixo e outro alto de CBR, para termos mais uma informação neste estudo.

Observamos também a influência, no valor da espessura, da variação de PAR1, parâmetro de entrada no programa, que fixa a precisão desejada na determinação do ponto de maior deflexão.

PESO :

Apresentamos os resultados em percentagem da alteração total da variável e a respectiva variação da espessura.

CBR = 3

PERNA I : 118% (peso) → 57% (espessura)

PERNA II : 100% → 51%

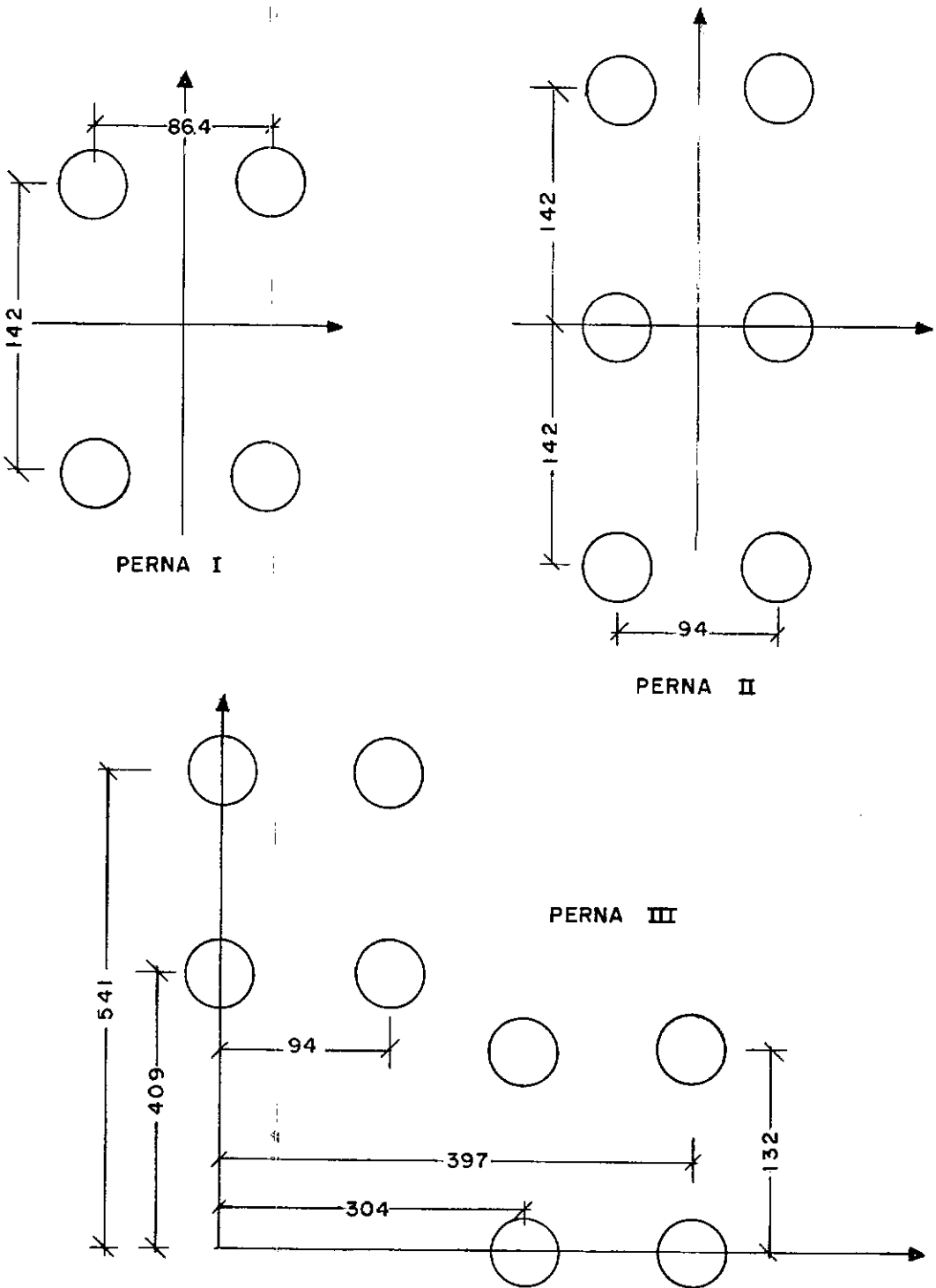


FIG. E-1

UNID: cm

CBR = 12

PERNA I : 118% → 72%

PERNA II : 100% → 68%

Logo, o peso tem grande influência no resultado, e essa influência é maior para CBR maiores.

Os gráficos E.1 e E.2 representam os dados obtidos. Observa-se que são quase retas, apresentando pouca curvatura.

PRESSÃO DE CONTATO :

Variamos a pressão em 50% a mais e 50% a menos do valor real, logo, num intervalo de 100%, para três valores distintos de peso.

Observamos que para CBR baixo (3,0), praticamente não houve alteração no resultado, para os três diferentes pesos. Para CBR alto, (12,0), houve um aumento pequeno da espessura com a pressão (aproximadamente 5%), notando-se aí maior influência, embora pequena, dos pesos baixos.

COEFICIENTE DE POISSON DO SUBLEITO :

Variando o coeficiente de Poisson de 0,10 a 0,50 , para valores de CBR iguais a 4 e 12, observamos pouca alteração na espessura. A variação maior chegou a 7% para CBR=12.

CBR DO SUBLEITO :

Variamos os valores de CBR, a partir de 3, tomando sêmpre, valores inteiros, até 12 (valor limite), para $v=0,3$ e $v=0,5$.

Notamos grande influência do CBR na determinação da espessura. Dentro deste intervalo de variação, a espessura chegou a variar 160%.

Para confirmação, a adoção de $v=0,3$ ou $v=0,5$, pouco alterou os resultados.

O gráfico E.3 reproduz os resultados. Nota-se que a variação de espessura é maior para valores de CBR menores.

PAR1 :

Com o intuito de determinarmos um valor ótimo para esse parâmetro que é um dado de entrada do programa, escolhemos duas pernas principais: uma simétrica, outra assimétrica, fazendo PAR1 variar de 2,0 cm a 50,0 cm, permanecendo todos os outros dados fixos.

Os resultados estão na TABELA E.1.

Para o simétrico, a espessura não se alterou. Isto porque, já esperado, numa distribuição simétrica, o ponto de deflexão máxima alcança o centro de simetria da disposição com mais rapidez. Atingindo este ponto, ele permanece aí para as profundidades maiores. Isto acontecendo, o ponto de máxima deflexão será sempre o mesmo (origem das coordenadas), e o próprio programa calcula diretamente, o fator de deflexão desse ponto sem recorrer à grade onde PAR1 é a distância entre pontos.

Para o assimétrico, isto não acontece logo, fazendo com que a grade se mova para determinar o ponto de deflexão máxima. Então o parâmetro PAR1 tem influência nos resultados, contudo, essa influência é pequena.

GRÁFICO E. I

CBR = 12

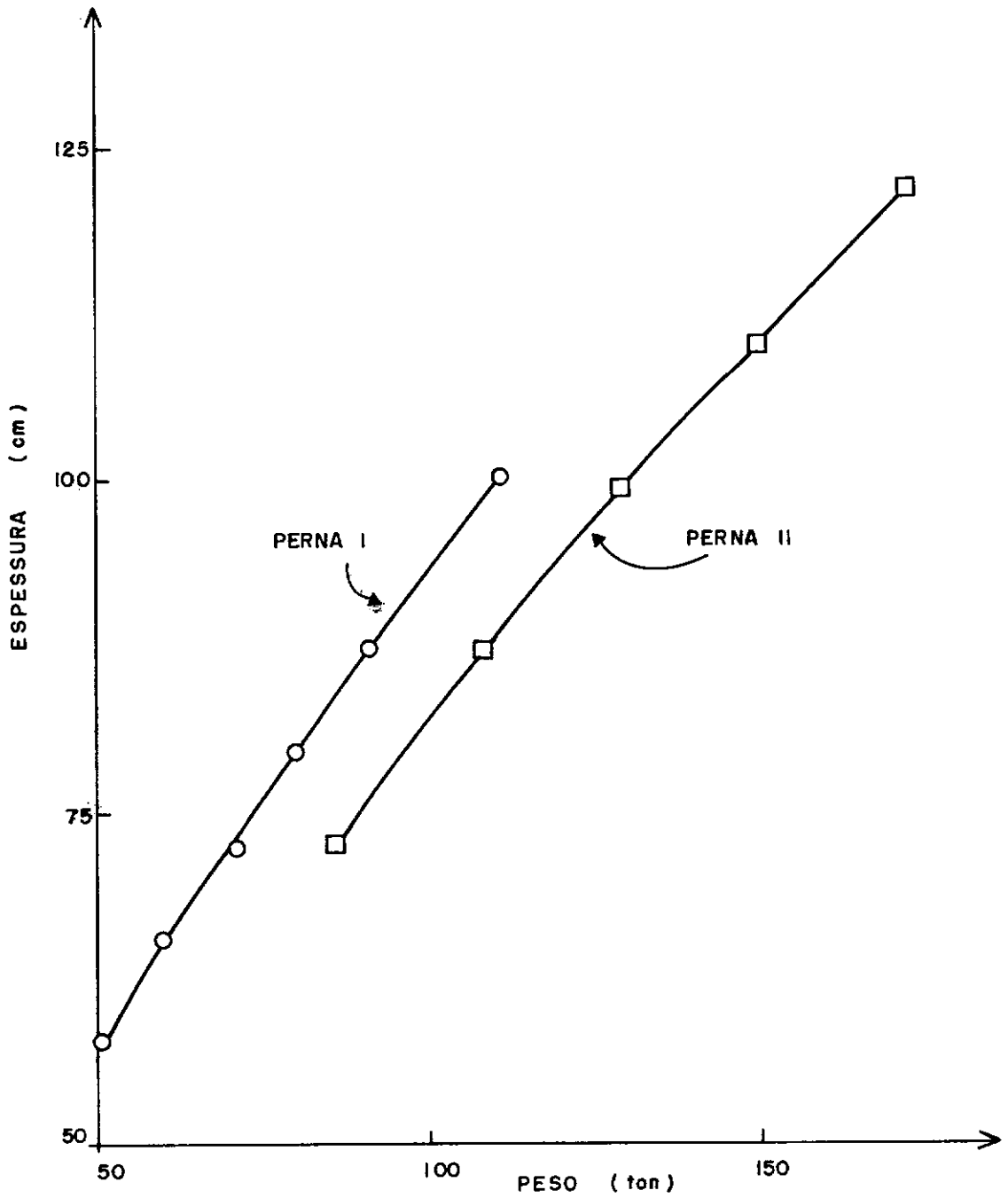


GRAFICO E.2

CBR = 3

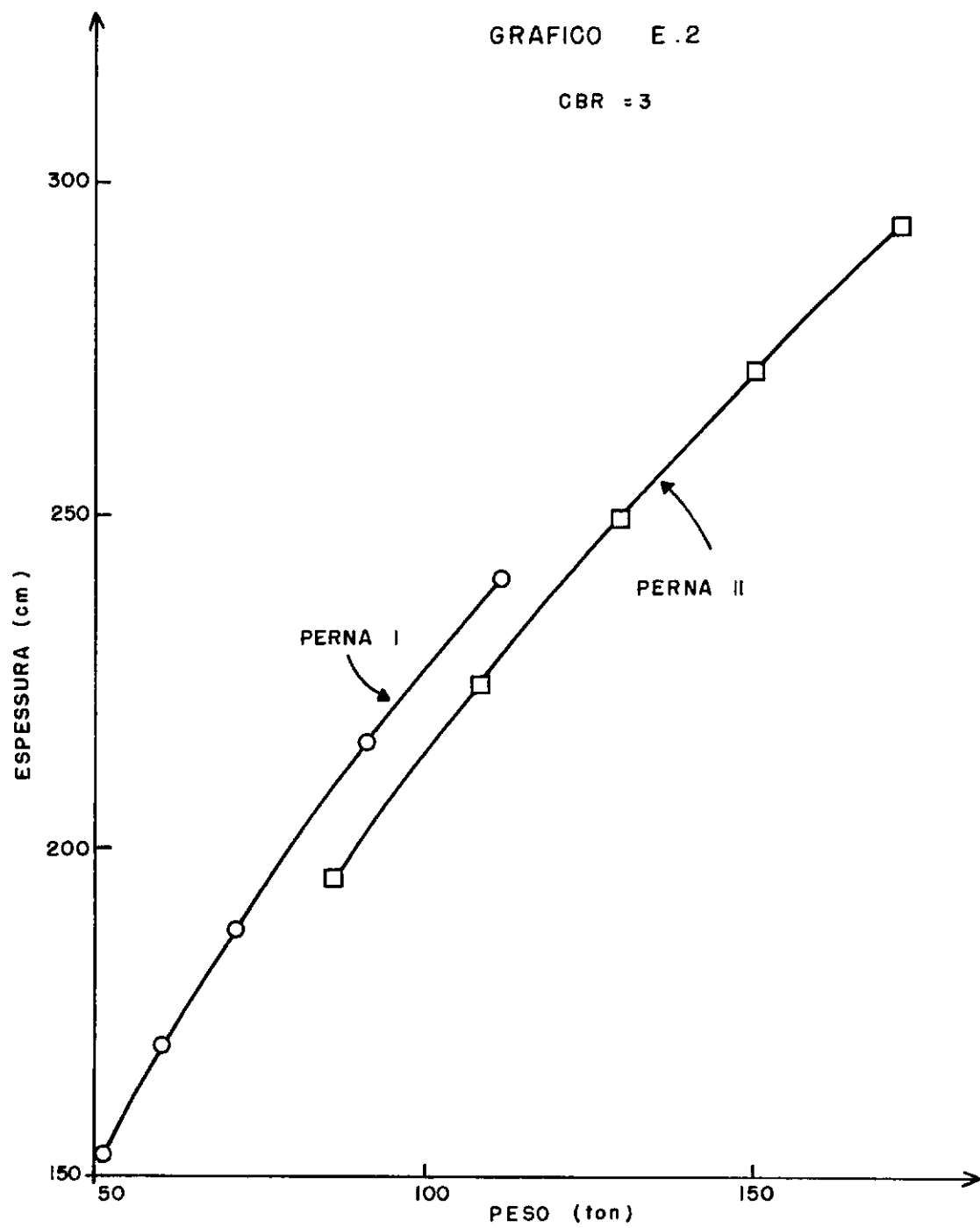
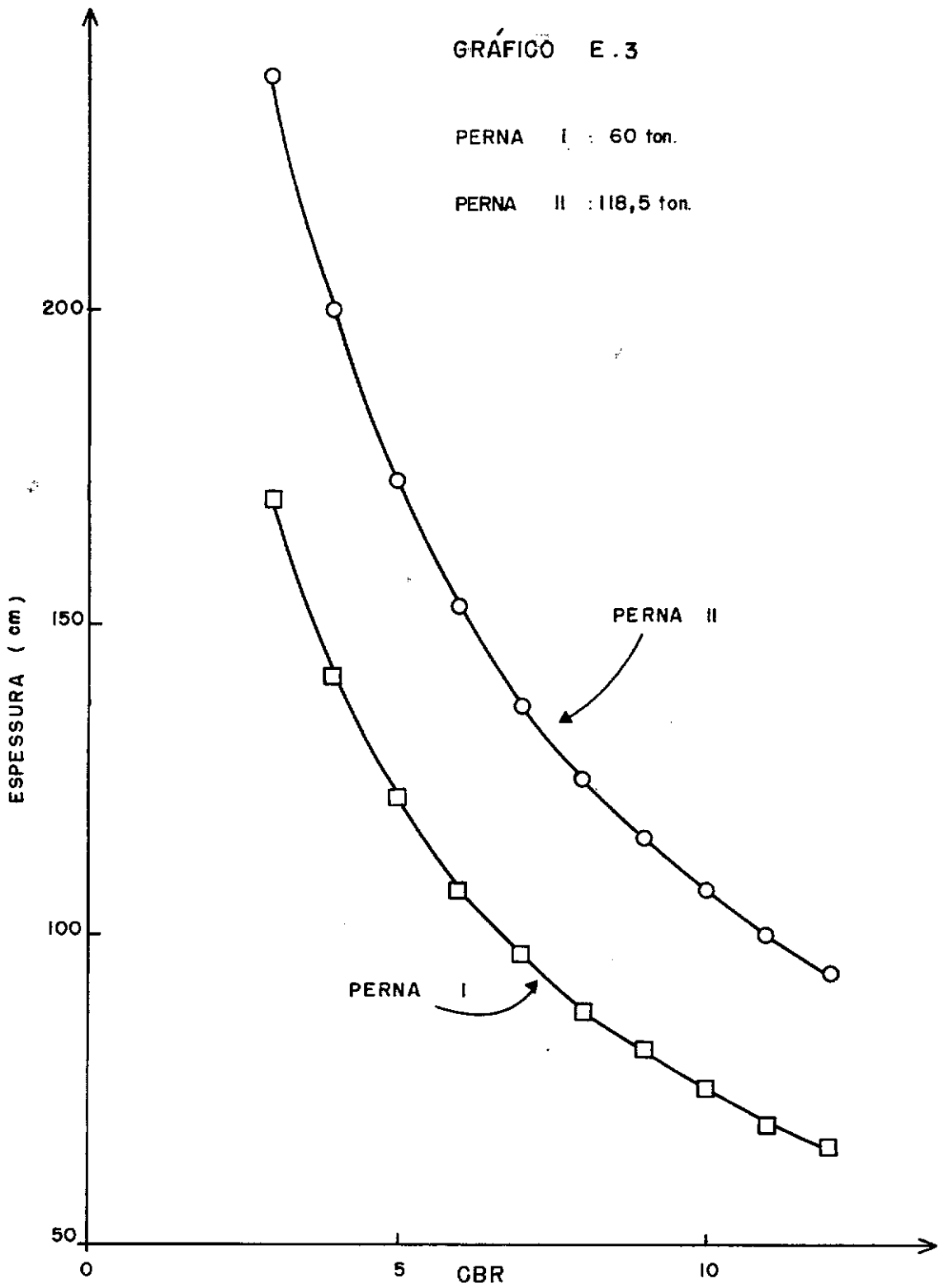


GRÁFICO E.3

PERNA I : 60 ton.

PERNA II : 118,5 ton.



PAR1 (cm)	PERNA II		PERNA III	
	Fator de Deflexão (F)	Espessura (cm)	Fator de Deflexão (F)	Espessura (cm)
2,0	1,058	90,27	0,989	87,39
8,0	1,058	90,27	0,988	87,39
15,0	1,058	90,27	0,988	87,38
25,0	1,058	90,27	0,988	87,37
35,0	1,058	90,27	0,988	87,37
50,0	1,058	90,27	0,977	87,11

$\nu = 0,5$

CBR = 12

TABELA E.1

Sugerimos para pernas menores, 10 cm e pernas maiores, 20 cm, ficando porém a critério do usuário.

RESUMO :

- 1 - PESO - Tem influência grande no dimensionamento.
- 2 - PRESSÃO - Influencia pouco no resultado. Confirma hipótese do método em considerar a pressão de contato = pressão de inflação, pois sua influência é mínima e uma consideração dessas é desnecessária.
- 3 - COEFICIENTE DE POISSON - Podemos, com tranquilidade, arbitrar um valor coerente, evitando assim de o determinarmos através do ensaio, o que geralmente é difícil, pois sua influência é pequena no dimensionamento.
- 4 - CBR - Sua influência é grande. Como seu valor é escolhido dentro de uma faixa de valores, devemos escolhê-lo com cuidado.

REPETIÇÃO DE CARGAS EM AEROPORTOS :

1 - CONCEITO DE COBERTURA :

Uma cobertura pode ser definida como sendo um número suficiente de passadas de pneus, em trilhas contínuas, necessárias para cobrir uma certa faixa da largura do pavimento uma vez.

2 - SEQUÊNCIA DO ESTUDO DA REPETIÇÃO DE CARGAS EM PAVIMENTOS :

McFadden e outros (18), em 1950, agruparam vários dados de pavimentos de aeroportos que apresentaram rutura, levando em consideração a espessura e a repetição de cargas até a rutura.

Calcularam as espessuras de projeto, pelo método do CBR., que deveriam ter esses pavimentos, determinando a percentagem da espessura do pavimento existente em relação à determinada por meio das curvas de dimensionamento. Marcaram num gráfico semi-logarítmico esses dados, em coberturas "versus" a percentagem encontrada (FIG. I.1).

Independentemente, nesta mesma época, A.Casagrande, P.C. Rutledge, e T.A.Middlebrooks, engenheiros do Laboratório de Pavimentos Flexíveis e o Engenheiro Chefe do Setor de Aeroportos, pesquisavam o mesmo assunto.

Comparando-se os resultados com os dados de McFadden, observou-se grande aproximação. Traçou-se então a reta da FIG. I.1, que representa a média das cinco análises independentes. Sua equação é:

$$\alpha = 0,23 \log C + 0,15$$

onde C é o número de coberturas.

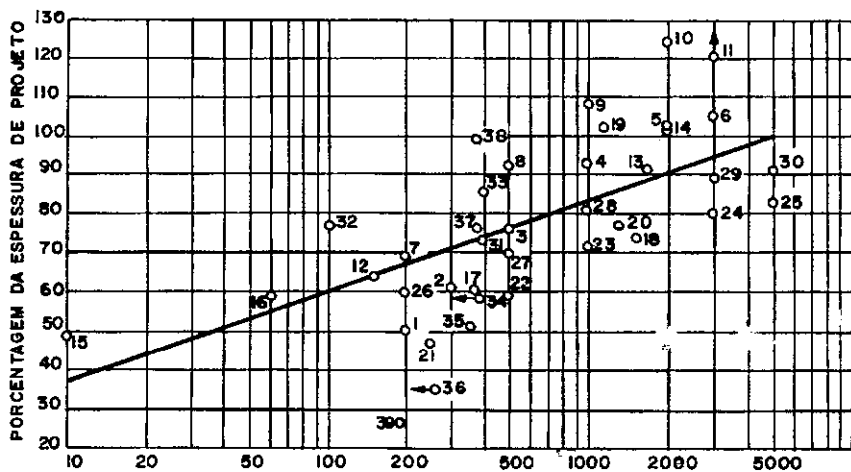


FIG. I-1 (REF. 18 PAG. 578)

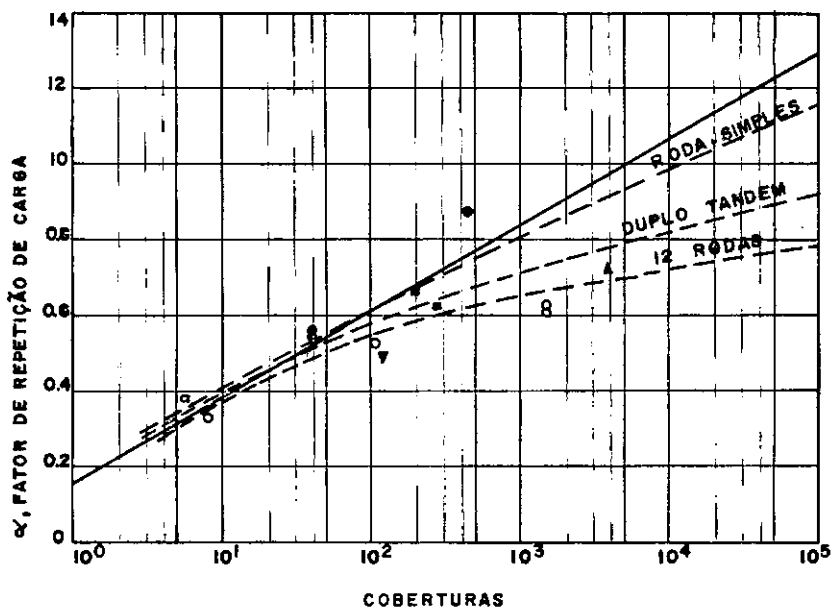


FIG. I-2 (REF. 19 PAG. 902)

Esta relação vigora atualmente. Entretanto, na última Conferência de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos, realizada em Londres, em setembro de 1972, Ledbetter, Ulery e Ahlvin (19), apresentaram um trabalho em que verificaram experimentalmente, pernas de trens de pouso com uma, quatro e doze rodas, concluindo que para um número grande de coberturas, a reta de McFadden dá resultados muito conservativos.

O gráfico da FIG. I.2 expressa a influência citada. Verifica-se que com o aumento do número de rodas da perna, a influência da repetição de cargas diminui.

Embora não se tenha uma curva para cada tipo de perna, podemos, usando o bom senso, interpolar nossos casos entre a curva (reta) original de McFadden e a de 12 rodas, que é o número máximo de rodas de uma perna principal, dos aviões conhecidos até o momento.

3 - DETERMINAÇÃO DA COBERTURA :

Esta determinação é ainda muito discutida. Isto porque vários fatores como configuração do trem de pouso (biciclo, triciclo, duplo tandem, etc.), variação da pressão de contato com a profundidade, cada um com uma série de suposições, devem influenciar no seu cálculo, porém ainda não se determinou uma fórmula para relacioná-los.

Exporemos o método de determinação de cobertura apresentado por Ahlvin e Brown (20) em 1965, por ser o mais recente que temos conhecimento, que apresenta o cálculo detalhado, da determinação do número de operações para uma cobertura. Usa-se um tratamento estatístico e exemplificam-se dois casos: eixo simples, roda simples e eixo duplo, roda dupla. Muitos dados foram

extraídos das experiências da WASHO ROAD TEST.

O MÉTODO :

Considera-se como parte crítica da faixa de tráfego, uma linha localizada em pontos na faixa de tráfego, onde as repetições de carga são maiores.

Para roda simples, essa linha passa no centro da área de contato do pneu; para roda dupla, no meio, entre as duas áreas de contato, ambos os casos quando o veículo está centrado na faixa de tráfego.

Uma carga é aplicada na linha crítica, todas as vezes que a área de contato do pneu desviar menos que uma distância "X", igual à metade da largura da área de contato, desta posição centrada.

Para duas rodas, o valor de "X" é igual à distância entre o meio das áreas de contato e o bordo externo de uma das áreas. Usa-se também o valor "X" - metade da distância entre as duas áreas de contato - onde não há aplicação de carga na linha crítica.

Baseando-se em dados existentes sobre a distribuição de tráfego em auto-estradas (podendo ser também considerada em aeroportos), considera-se a distribuição de tráfego representada pela curva de distribuição normal, onde 85 a 90% deste tráfego é aplicado dentro da faixa de tráfego (dados da WASHO ROAD TEST).

Assim, a área sob a curva normal, correspondente a uma abscissa X, representa a percentagem das operações que aplicam carga na linha crítica.

Então, o número de operações por cobertura é igual ao inverso do produto do número de eixos pela percentagem da área sob a curva de possibilidades, correspondente à abscissa X (reduzida de X' para roda dupla).

Para entrada na curva normal, encontrada em qualquer manual ou Livro de Estatística, precisa-se colocar X e X' em termos do desvio padrão.

Necessita-se também definir a faixa de possibilidades de desvio. Baseando-se na hipótese de 85 a 90% do tráfego ser aplicado dentro dos limites laterais da faixa de tráfego, essa faixa de possibilidade de desvio é tomada como sendo a diferença entre a largura da faixa de tráfego (P_w) e a distância entre os eixos externos das áreas de contato dos pneus. Em termos de desvio padrão (σ), seu valor assumido é $\pm 1,5 \sigma$.

Para maior esclarecimento, exporemos os dois exemplos apresentados no trabalho de Ahlvin e Brown (20), colocando no final deles uma notação dos parâmetros usados.

EXEMPLO I :

Eixo Simples, Roda Simples (FIG. I.3)

DADOS :

$$P = 0 \text{ a } 2270 \text{ kgf}$$

$$P_w = 335 \text{ cm}$$

TABELA I.1 :

$$T_w = 19,1 \text{ cm}$$

$$W_s = 158 \text{ cm}$$

CÁLCULO :

$$C_w = 0,75 T_w = 14,2 \text{ cm} \dots\dots\dots (\text{vide notação})$$

$$B_w = 1,5 \sigma \dots\dots\dots (\text{hipótese})$$

$$B_w = P_w - (W_s + C_w) \dots\dots\dots (\text{FIG. I.3})$$

$$B_w = 335 - (158 + 14,2)$$

$$B_w = 162,8 \text{ cm}$$

$$\sigma = B_w / 3 = 162,8/3 = 54,2 \text{ (vide notação)}$$

$$n = \frac{C_w / 2}{\sigma} = \frac{14,2}{2(54,2)} = 0,131 \text{ (vide notação)}$$

Entrando com o valor de n - abscissa X em termos do desvio padrão - na tabela de áreas da curva normal, encontra-se o valor 0,052. Como essa probabilidade é nos dois sentidos, em relação ao eixo, tem-se $A_n = 10,4\%$. Este valor exprime que somente 10,4% das operações aplicam carga na linha crítica da faixa de tráfego.

O número de operações por cobertura deste eixo simples com roda simples, é igual ao inverso do produto do número de eixos pela percentagem $A_n = 10,4$.

$$\text{Operações por coberturas} = \frac{1}{(1)(A_n)} = \frac{1}{(1)(0,104)} = 9,59$$

Em outras palavras : A linha crítica da faixa de tráfego é carregada uma vez a cada 9,59 passagens dessa configuração.

EXEMPLO II :

Eixo Tandem, Roda Dupla (FIG. I.4)

DADOS :

$$P = 6.800 \text{ a } 9.080 \text{ kgf}$$

$$P_w = 335 \text{ cm}$$

TABELA I.1 :

$$T_w = 28 \text{ cm}$$

$$W_s = 183 \text{ cm}$$

CÁLCULO :

$$C_w = 0,75 T_w = 21 \text{ cm}$$

$$S = 5,0 \text{ cm} \dots\dots\dots (\text{vide notação})$$

$$B_w = P_w - (W_s + 1,75 T_w + S) \text{ (FIG.I.4)}$$

$$B_w = 335 - (183 + 1,75 \times 28 + 5,0)$$

$$B_w = 98 \text{ cm}$$

$$\sigma = 98/3 = 32,7 \text{ cm}$$

$$n = (1,75 T_w + S)/2\sigma \dots\dots (\text{vide notação})$$

$$n = (1,75 \times 28 + 5) / (2 \times 32,7) = 0,822$$

$$n' = (0,25 T_w + S) / (2\sigma) \dots (\text{vide notação})$$

$$n' = (0,25 \times 28 + 5) / (2 \times 32,7) = 0,184$$

$$n = 0,822 \rightarrow \text{curva normal} \rightarrow 0,2945 \rightarrow A_n = 58,90\%$$

$$n' = 0,184 \rightarrow \text{curva normal} \rightarrow 0,0729 \rightarrow A'_n = 14,58\%$$

Como a percentagem relativa a n' (X') não aplica carga na linha crítica, subtraímos esse valor do correspondente a n (X) :

$$A_n - A'_n = 44,32\%$$

Assim, 44,32% das operações de cada eixo, carregam a linha crítica da faixa de tráfego.

O número de operações por cobertura para esse eixo tandem (dois eixos) com rodas duplas, é igual ao inverso do produto do número de eixos pela diferença de áreas sob a curva de distribuição normal, correspondentes às abcissas n e n' (X e X') .

$$\text{Operações por cobertura} = \frac{1}{2(A_n - A'_n)} = \frac{1}{2(0,4432)} = 1,13$$

Dai, a parte crítica da faixa de tráfego é carregada uma vez a cada 1,13 passagens dessa configuração.



0

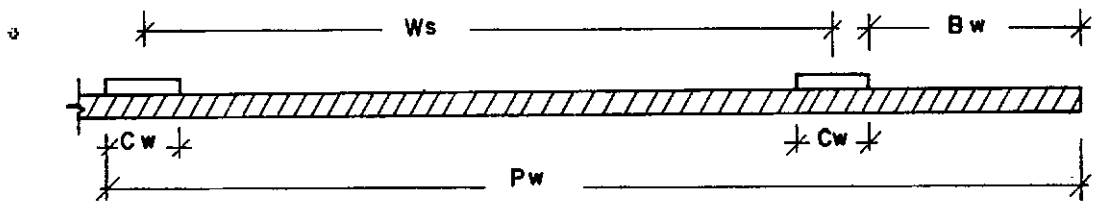
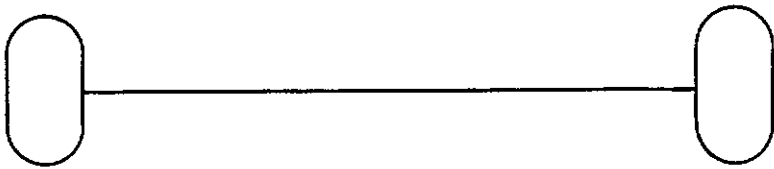


FIG. I-3

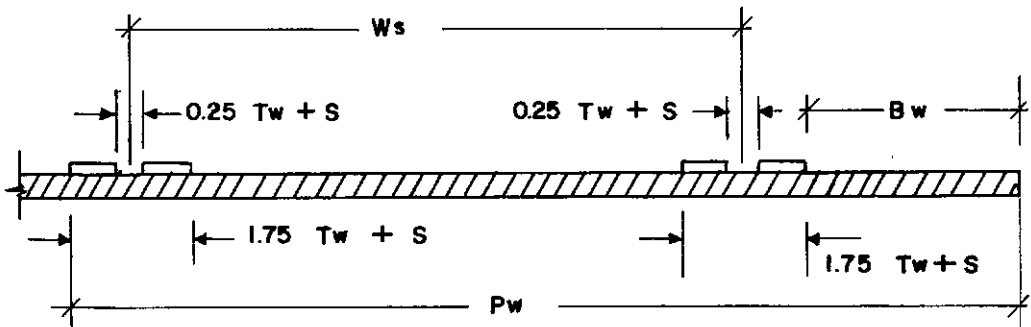
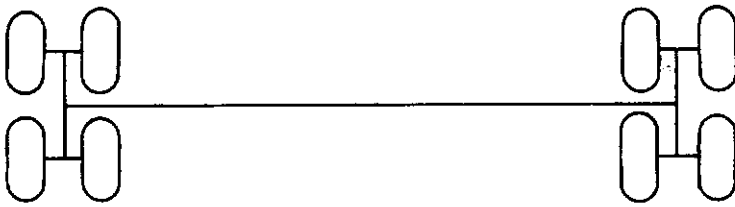


FIG. I-4

CONFIGURAÇÃO	Faixa de Variação da Carga(P) (ton)	Largura Média do Pneu(T _w) (cm)	Espaçamento Médio entre Rodas(W _s) (cm)
Eixo Simples	0 - 2,27	19,1	158
Roda Simples	2,27 - 4,54	24,1	183
Eixo Simples	0 - 4,54	22,8	178
Roda Dupla	4,54 - 9,08	24,4	183
	9,08 - 13,60	26,6	183
Eixo Tandem	0 - 4,54	19,1	183
Roda Simples	4,54 - 6,80	25,4	193
Eixo Tandem	4,54 - 6,80	19,1	171
Roda Dupla	6,80 - 9,08	28,0	183
	9,08 - 20,43	30,5	183

TABELA I.1

NOTAÇÃO :

P_w = Largura da faixa de tráfego (considerada igual a 335 cm)

B_w = Largura da parte da faixa de tráfego na qual o veículo pode vagar.

T_w = Média da largura dos pneus, isto é, soma da largura de todos os pneus dentro de uma faixa de carga especificada, dividida pelo número de veículos dentro dessa faixa (TAB. I.1) .

C_w = Largura da área de contato do pneu (assumida igual a $0,75 T_w$).

σ = Desvio padrão (assumido igual a $B_w/3$).

S = Espaço entre os pneus de roda dupla. (Assumido igual a 5 cm para todos os casos).

n e n' = Valores de X e X' em termos de σ :

$$\text{roda simples} \rightarrow n = C_w / 2\sigma$$

$$\text{roda dupla} \rightarrow n' = 0,25 T_w + 2\sigma \quad \text{e} \quad n = 1,75 T_w + S/2\sigma$$

A_n, A'_n = Área sob a curva normal de probabilidades correspondentes às abcissas n e n' .

W_s = Média das distâncias entre centros de rodas, isto é, soma das distâncias centro a centro das rodas de todos os veículos dentro de uma faixa especificada de carga, dividida pelo número de veículos dentro desta faixa (TAB. I.1) .

OBSERVAÇÕES :

1 - Este estudo é baseado em resultados obtidos em pesquisa rodoviárias. Porém, ele se aplica a aeroportos, desde que se substituam os valores tabelados aqui, por parâmetros representativos das aeronaves consideradas.

2 - Calculamos nos exemplos, o número de operações por cobertura para um tipo de aeronave. No dimensionamento completo, calcula-se esse valor para cada avião que usará o pavimento. Divide-se o número total de operações pelo número de operações por cobertura de cada um. A soma desses valores é o "C" final, com o qual entramos na curva percentagem de espessura "versus" coberturas e encontramos a percentagem a acrescentar ou subtrair na espessura do pavimento determinada.

3 - Julgamos que o cálculo do número de coberturas, para trens de pouso mais complexos, pode ser resolvido com base na metodologia exposta aqui nos dois exemplos dados.

APÊNDICE II : ROTEIRO PARA O DIMENSIONAMENTO:
GRÁFICOS .

ROTEIRO PARA O DIMENSIONAMENTO :

A finalidade deste apêndice é de complementação do trabalho, caso em que não se disponha de computador e necessita-se dimensionar um pavimento flexível de aeroporto. Para maior compreensão, resolvemos um problema real, detalhando todas as suas passagens, complementando-o com algumas simplificações possíveis.

Consideraremos o DC-10, cujo trem de pouso é mostrado na FIG. II.1, possuindo as seguintes características:

Peso Total = 223.560 kgf

Pressão dos pneus = 11,8 kgf/cm²

Porcentagem da carga sob o nariz = 5%

Admitiremos um subleito com CBR = 10 e coeficiente de Poisson = 0,30.

Deseja-se determinar a espessura do pavimento flexível necessária a essa aeronave para o subleito admitido.

1 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS AO CÁLCULO :

1.1 - Carga atuante numa perna principal (P) :

$$P = (100 - 5) / 2 \times 223.560$$

$$P = 106.191 \text{ kgf}$$

1.2 - Carga atuante em cada roda (P2) :

$$P2 = 106.191 / 4$$

$$P2 = 26.548 \text{ kgf}$$

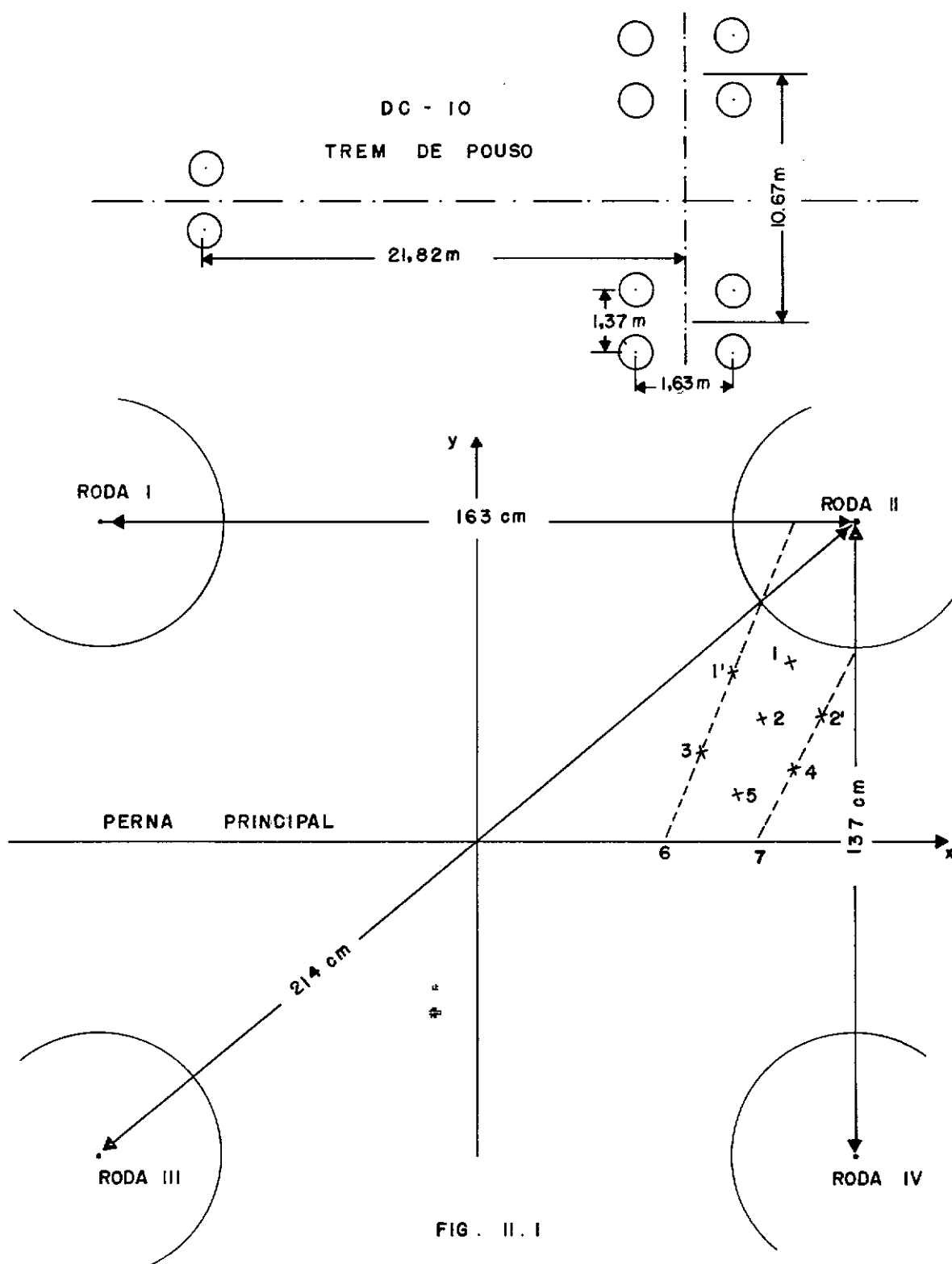


FIG. II. I

1.3 - Raio da área de contato das rodas (R) :

$$A = \frac{P}{p} = \frac{26,548}{11,8}$$

$$A = 2.250 \text{ cm}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.250}{\pi}}$$

$$R = 26,7 \text{ cm}$$

2 - PRIMEIRA TENTATIVA :

2.1 - Altura (d) :

Arbitraremos $d=50,0 \text{ cm}$

Para uso dos gráficos (d em unidades do raio) :

$$z = d/R = \frac{50,0}{26,7} = 1,87$$

2.2 - Fator de deflexão para as rodas contidas no 1º quadrante (no caso apenas uma) :

a) Distâncias às rodas (graficamente) :

$$II - I = 163 \text{ cm}$$

$$II - II = 0$$

$$II - III = 214 \text{ cm}$$

$$II - IV = 137 \text{ cm}$$

b) Distâncias expressas raios (ρ) :

$$\rho_{II-I} = 163/26,7 = 6,10$$

$$\rho_{II-II} = 0$$

$$\rho_{II-III} = 214/26,7 = 8,01$$

$$\rho_{II-IV} = 137/26,7 = 5,13$$

c) Com os valores de ρ , entramos no GRÁFICO II.3 com $z = 1,87$ e encontramos os respectivos fatores de deflexão (F) :

$$F_{II-I} = 0,15$$

$$F_{II-II} = 0,75$$

$$F_{II-III} = 0,11$$

$$F_{II-IV} = 0,18$$

Observação : Podemos considerar somente o fator de deflexão encontrado sob a roda II, pois é bem provável que seja ele o máximo, porque a profundidade é pequena (em profundidades pequenas, os pontos de maior deflexão se encontram sob os centros das áreas de contato das rodas), e esta primeira tentativa é para termos uma ordem de grandeza da espessura necessária, provavelmente sendo a última, bem diferente da profundidade arbitrada.

2.3 - Fator de deflexão relativo à roda simples (F_s) :

$$\rho = 0 \text{ e } z = 1,87 \rightarrow \text{GRÁFICO II.3} \rightarrow F_s = 0,75$$

2.4 - Roda equivalente (PEQUI) :

$$PEQUI = P_c \frac{F_c}{F_s} = 26.548 \frac{1,19}{0,75}$$

$$PEQUI = 42.211 \text{ kgf}$$

2.5 - Pressão de contato correspondente à roda equivalente (devido à hipótese de que $A = \text{constante}$) :

$$PRES = \frac{PEQUI}{A} = \frac{42.211}{2.250}$$

$$PRES = 18,76 \text{ kgf/cm}^2$$

2.6 - Espessura necessária (HT) :

$$HT = \sqrt{PEQUI \left(\frac{1}{0,57 \text{ CBR}} - \frac{1}{PRES \cdot \pi} \right)}$$

$$HT = \sqrt{42.211 \left(\frac{1}{0,57 \times 10} - \frac{1}{18,76 \times \pi} \right)}$$

$$HT = 81,67 \text{ cm}$$

Como a espessura encontrada é diferente da profundidade arbitrada, faremos outra tentativa.

Observa-se que a espessura é proporcional à raiz quadrada da roda equivalente. Assim, a nova profundidade a arbitrar deve ser maior que 81,67 cm .

3 - SEGUNDA TENTATIVA :

3.1 - Altura :

Arbitraremos $d=90 \text{ cm}$

$$z = d/R = 90/26,7 = 3,37$$

3.2 - Fator de deflexão máximo (F_c) :

Explicado no parágrafo 2.1 do item C e usado na programação, o ponto de maior deflexão situa-se sempre no retângulo cujos lados são as coordenadas máximas dos centros das áreas de contato das rodas do quadrante positivo (os eixos são colocados de acordo com a simetria da disposição - pag.72).

Para o exemplo, estas coordenadas são as da própria roda II, pois é a única contida no 1º quadrante.

Porém dentro deste retângulo, existem, em função da profundidade, zonas que apresentam sempre, os pontos de máxima deflexão em cada profundidade.

Observando vários exemplos para dois tipos de disposições de rodas : 4 rodas e 6 rodas, principalmente os usados no item E deste trabalho, pudemos limitar aquelas zonas (às vezes reduzidas a segmentos), para essas disposições, porém sem podermos generalizar para todos os casos, pois nossos exemplos são limitados. Todavia, constitui um dado útil para simplificação desta determinação, que é a parte mais trabalhosa do cálculo.

A FIG. II.2 apresenta essas zonas (ou segmentos).

O sentido da flecha é de aumento de profundidade. A medida que a profundidade aumenta, a deflexão máxima se situa no centro de simetria da disposição.

Para posições especiais do ponto de máxima deflexão, como o centro de simetria, os eixos, colocamos na FIG. II.2 a sua profundidade aproximada, observada nos exemplos feitos. Salientamos contudo, que estas aproximações tem a finalidade de nos orientar na pesquisa do ponto de deflexão máxima, não podendo ser generalizada.

Não tivemos dados suficientes para avaliarmos essas zonas em outros trens de pouso, porém frisamos que uma boa observação da disposição de rodas, pode nos levar a alguma conclusão simplificadora.

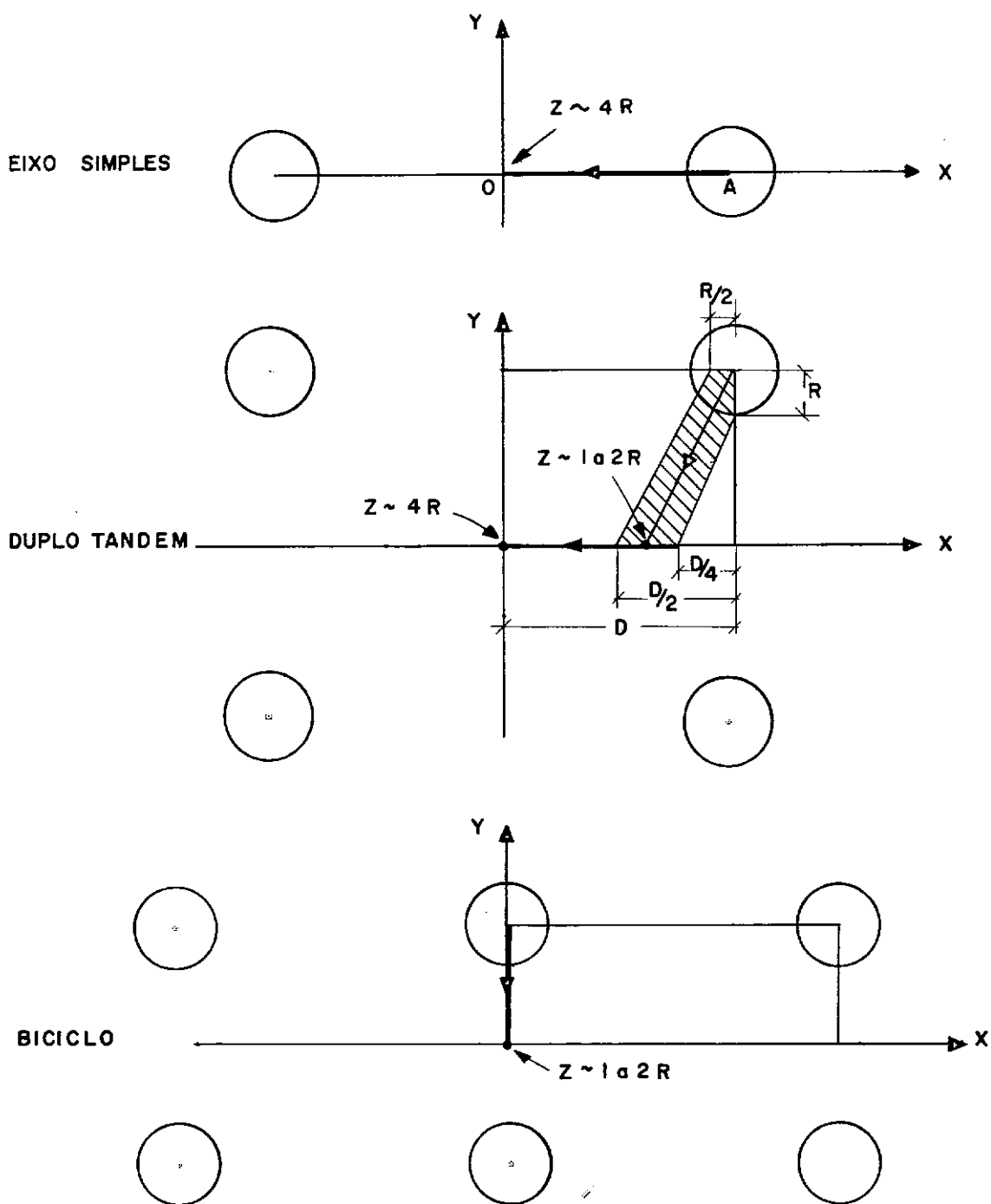


FIG. II - 2

h) Espessura necessária :

$$HT = \sqrt{54.905 \left(\frac{1}{0,54 \times 10} - \frac{1}{24,40 \times \pi} \right)}$$

$$HT = 94,31 \text{ cm}$$

Caso não desejássemos maior precisão, poderíamos parar nesta etapa, fixando por exemplo, a espessura em 95 cm. Calcularemos mais uma etapa, checando melhor esta iteração.

4 - TERCEIRA TENTATIVA :

4.1 - Altura :

Arbitraremos $d=96 \text{ cm}$

$$z = d/R = 96/26,7 = 3,60$$

4.2 - Fator de deflexão máximo :

Como a nova profundidade é próxima da última arbitrada , pesquisaremos os mesmos pontos, acrescentando apenas mais dois (1' e 2'), próximos aos dois pontos mais solicitados na tentativa anterior, visando-se uma precisão maior. Não consideraremos, para simplificação de cálculo, os pontos 6 e 7 por estarem afastados da zona que achamos ser mais solicitada, baseando-se nos resultados da segunda tentativa.

a) Distâncias dos pontos 1' e 2' às rodas (graficamente) :

(Vide TABELA II.4)

Baseando-se nas orientações sugeridas, escolhemos os pontos a pesquisar nesta profundidade conforme FIG. II.1 .

a) Distância dos pontos às rodas em cm (graficamente):

(Vide TABELA II.1)

b) Distâncias expressas em raios :

(Vide TABELA II.2)

c) Fatores de deflexão :

Com os valores de ρ do parágrafo anterior, extraímos no GRÁFICO II.3 os respectivos valores de F . (Vide TABELA II.3).

d) Fator de deflexão máximo :

Conforme os resultados da TABELA II.3 , o fator de deflexão máximo é 0,91, $F_c = 0,91$.

e) Fator de deflexão para roda simples :

$$\rho = 0 \text{ e } z = 3,37 \rightarrow \text{GRÁFICO II.3} \rightarrow F = 0,44$$

(f) Roda equivalente :

$$PEQUI = 26.548 \frac{0,91}{0,44}$$

$$PEQUI = 54.905 \text{ kgf}$$

g) Pressão de contato correspondente à nova roda equivalente :

$$PRES = \frac{54.905}{2.250}$$

$$PRES = 24,4 \text{ kgf/cm}^2$$

b) Distâncias em raios para 1' e 2' :

(Vide TABELA II.5)

c) Fatores de deflexão :

Com uso do GRÁFICO II.3, determinamos os fatores de deflexão mostrados na TABELA II.6 :

d) Fator de deflexão máximo :

$$F_c = 0,90$$

e) Fator de deflexão para roda simples :

$$\rho = 0 \text{ e } z = 3,60 \rightarrow \text{GRÁFICO II.3} \rightarrow F_s = 0,42$$

f) Roda equivalente :

$$PEQUI = 26.548 \frac{0,90}{0,42}$$

$$PEQUI = 56.866 \text{ kgf}$$

g) Pressão de contato correspondente à nova roda equivalente :

$$PRES = 56.866 / 2.250$$

$$PRES = 25,27 \text{ kgf/cm}^2$$

h) Espessura necessária :

$$HT = \sqrt{56.866 \left(\frac{1}{0,57 \times 10} - \frac{1}{25,27 \times \pi} \right)}$$

$$HT = 96,3 \text{ cm}$$

Valor praticamente igual à profundidade arbitrada (96 cm) . Fixa-

PONTOS	RODA I	RODA II	RODA III	RODA IV
1	152	33	185	108
2	150	46	173	97
3	139	60	157	93
4	159	55	172	85
5	149	64	159	83
6	140	80	140	80
7	158	72	159	72

Unid = cm

TABELA II.1

PONTOS	RODA I	RODA II	RODA III	RODA IV
1	5,69	1,24	6,93	4,04
2	5,62	1,72	6,48	3,63
3	5,21	2,25	5,88	3,48
4	5,96	2,06	6,44	3,18
5	5,58	2,40	5,96	3,11
6	5,24	3,00	5,24	3,00
7	5,92	2,70	5,96	2,70

TABELA II.2

PONTOS.....	RODA I.....	RODA II.....	RODA III.....	RODA IV.....	TOTAL.....
1	0,16	0,40	0,13	0,22	0,91
2	0,16	0,37	0,14	0,24	0,91
3	0,17	0,33	0,15	0,25	0,90
4	0,15	0,34	0,14	0,27	0,90
5	0,16	0,32	0,15	0,27	0,90
6	0,17	0,28	0,17	0,28	0,90
7	0,15	0,29	0,15	0,29	0,88

TABELA II.3

PONTOS	RODA I	RODA II	RODA III	RODA IV
1'	140	42	172	108
2'	161	42	184	96

TABELA II.4

PONTOS	RODA I	RODA II	RODA III	RODA IV
1'	0,17	0,37	0,14	0,22
2'	0,15	0,37	0,13	0,24

TABELA II.5

PONTOS	RODA I	RODA II	RODA III	RODA IV	TOTAL
1	0,16	0,38	0,13	0,22	0,89
2	0,16	0,36	0,14	0,24	0,90
1'	0,17	0,37	0,14	0,22	0,90
2'	0,15	0,37	0,13	0,24	0,89
3	0,17	0,32	0,15	0,25	0,89
4	0,15	0,33	0,13	0,26	0,87
5	0,16	0,31	0,15	0,26	0,88

TABELA II.6.

remos a espessura final em 96,3 cm .

Observação : Se o valor da espessura encontrada fosse menor que o valor da profundidade arbitrada, poderíamos fixar a espessura final como sendo a média aritmética entre os dois valores. O programa faz essa consideração.

5 - OPERAÇÕES POR COBERTURA :

5.1 - Dados :

$$P = 106.191 \text{ kgf}$$

$$P_w = 15 \text{ m (arbitrado)}$$

5.2 - Outros parâmetros :

$$T_w :$$

$$A = 0,5227 L^2 \quad (\text{Método FAA, FIG. II.3})$$

$$L = \frac{A}{0,5227} = \frac{2.250}{0,5227} = 65,6 \text{ cm}$$

$$T_w = 0,6 L = 0,6 \times 65,6$$

$$T_w = 39,4 \text{ cm}$$

$$W_s = 10,67 \text{ m (FIG. II.1)}$$

5.3 - Cálculo :

$$C_w = 0,75 T_w = 29,6 \text{ cm}$$

$$S = 137 - 39,4 = 97,6 \quad (\text{FIG. II.4})$$

$$B_w = 1500 - (1067 + 1,75 \times 39,4 + 97,6)$$

$$B_w = 266,5 \text{ cm}$$

$$\sigma = 266,5 / 3 = 88,8 \text{ cm}$$

$$\bar{n} = (1,75 \times 39,4 + 97,6) / 2 \times 88,8 = 0,94$$

$$n' = (0,25 \times 39,4 + 97,6) / 2 \times 88,8 = 0,61$$

$$n = 0,94 \rightarrow \text{curva normal} \rightarrow 0,3264 \rightarrow A_n = 65,28 \%$$

$$n' = 0,61 \rightarrow \text{curva normal} \rightarrow 0,2291 \rightarrow A_{n'} = 45,82 \%$$

$$A_n - A_{n'} = 19,46 \%$$

$$\text{Operações por cobertura} = \frac{1}{2 (0,1946)} = \frac{1}{0,3892} = 2,57$$

Assim, se o DC-10 operar durante a vida de projeto do pavimento 4.000 vezes, e se considerarmos somente este avião operando, para exemplo, o valor de C será :

$$C = 4.000 / 2,57 = 1.556$$

Entrando com esse valor de C no gráfico da FIG. I.2, na curva correspondente à "twin tandem" - 4 rodas - encontramos 74 % . Então , a espessura final seria :

$$H_f = 96,3 \times 0,74$$

$$H_f = 71,3 \text{ cm} .$$

2. GRÁFICOS :

Os gráficos apresentados a seguir foram feitos aproveitando-se a subrotina FENE - única do programa desenvolvido - que calcula o fator de deflexão para qualquer ponto de um espaço semi-infinito, isotrópico, homogêneo e linearmente elástico, sob a aplicação de um carregamento circular uniforme na superfície e o PLOTTER do computador 1130 .

Calculamos esses fatores para "offsets" em raios, de 0.0 a 8.0 , sendo ~~que~~ até 3.0 em intervalos de 0.25 e de 3.0 a 8.0 em intervalos de 1.0 . As profundidades em raios variam de 0.0 a 10.0 em intervalos de 0.25 .

A finalidade desses gráficos é complementar este apêndice, pois nos trabalhos consultados, só encontramos os mesmos para valores do coeficiente de Poisson de 0.30 e 0.50 .

Observação : Comparando-se os gráficos obtidos por nós para os valores de 0.30 e 0.50, com os respectivos encontrados nos trabalhos consultados, observamos ótima aproximação.

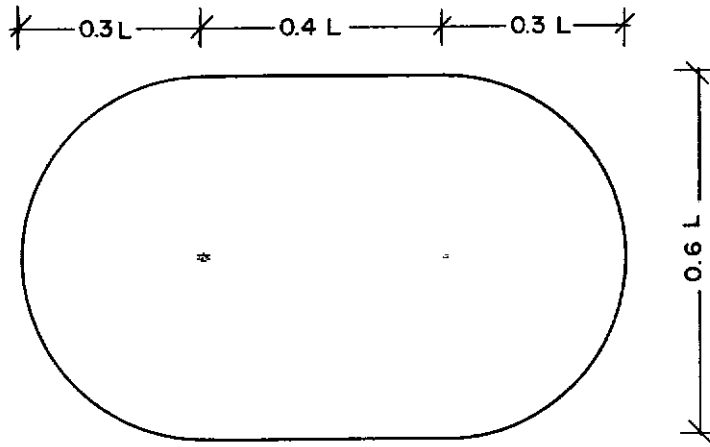


FIG. II. 3

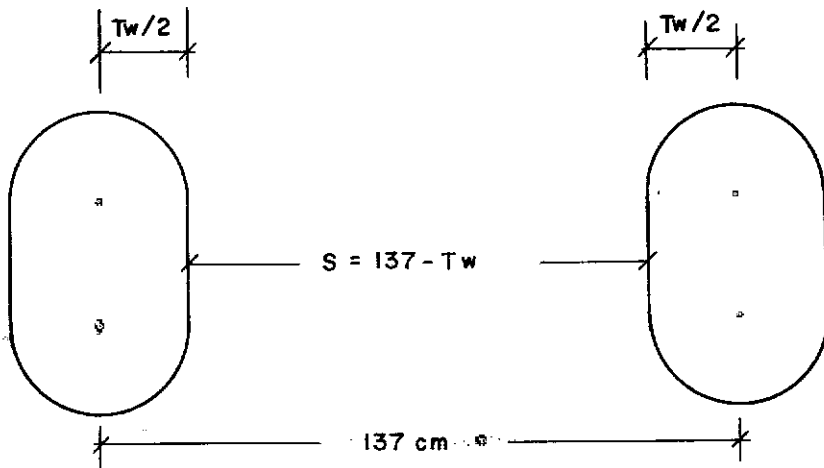
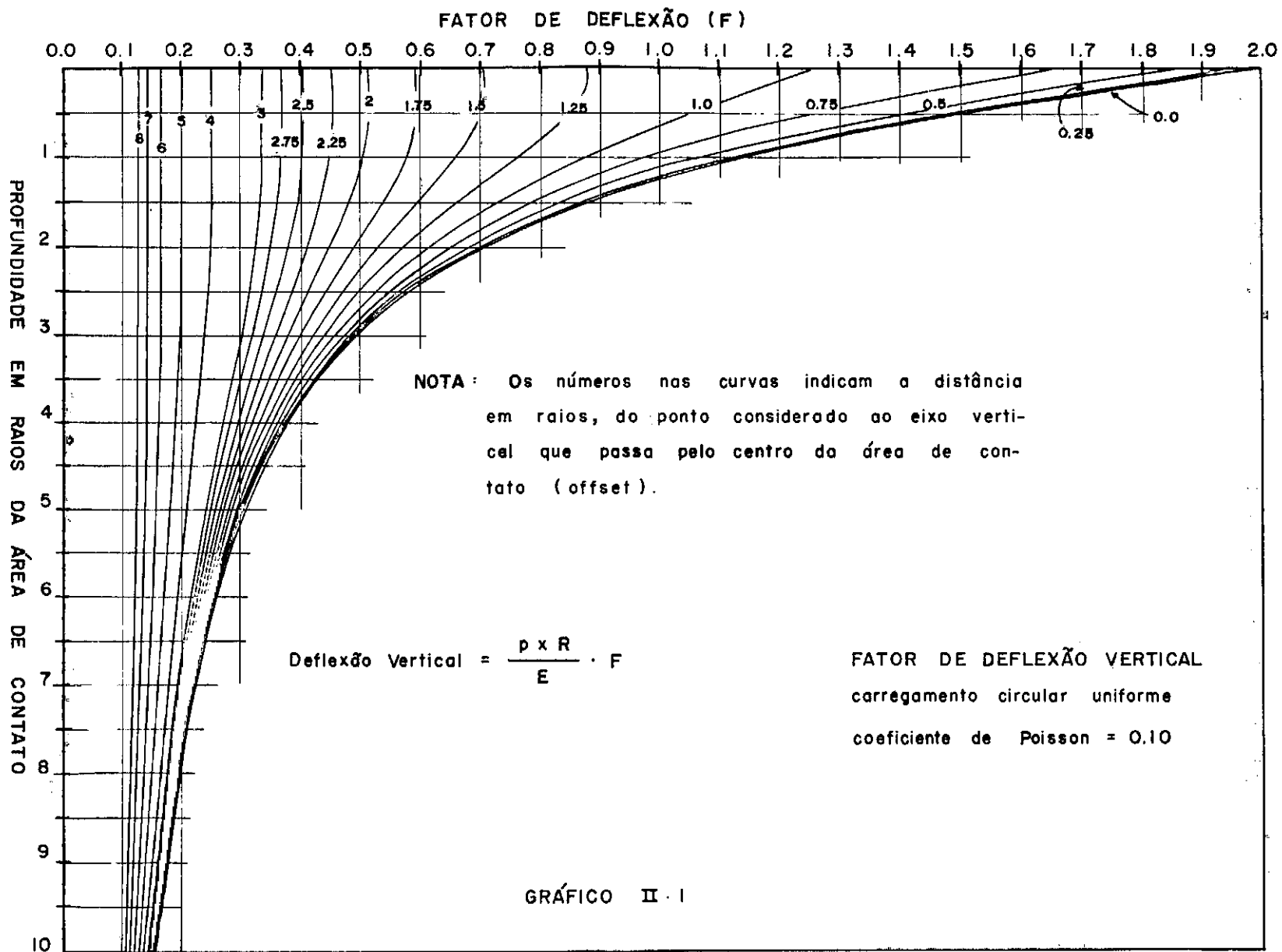
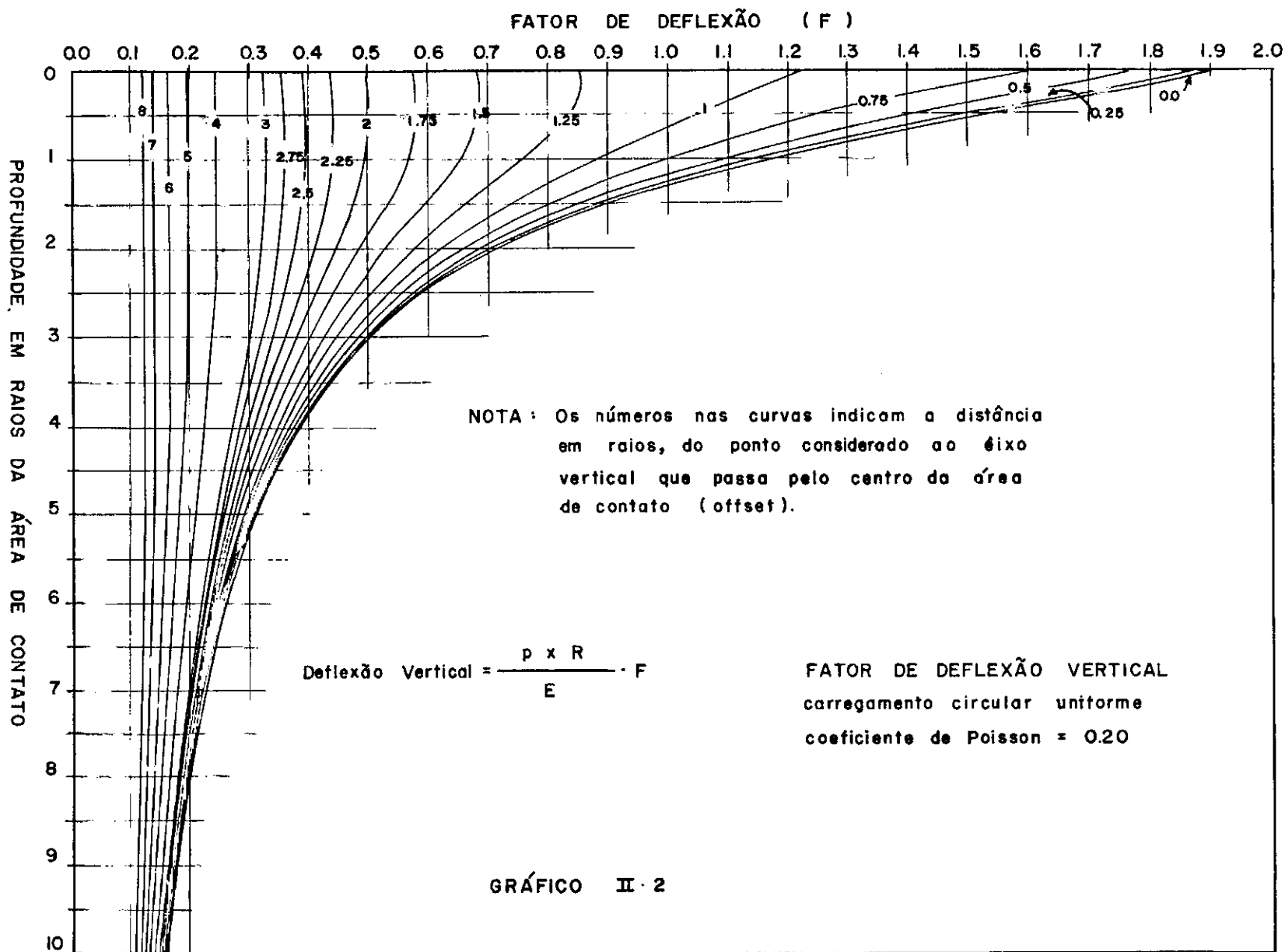
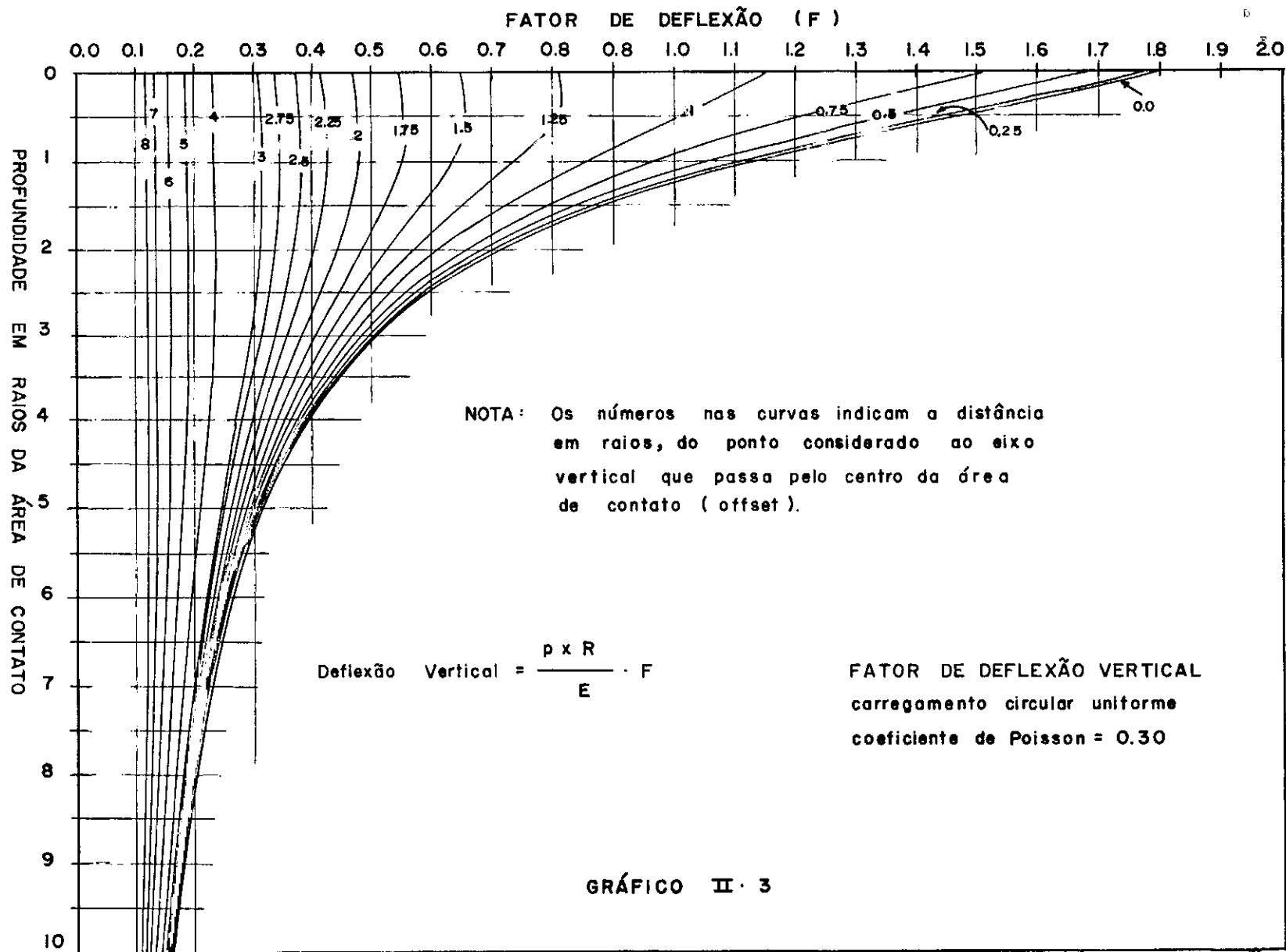
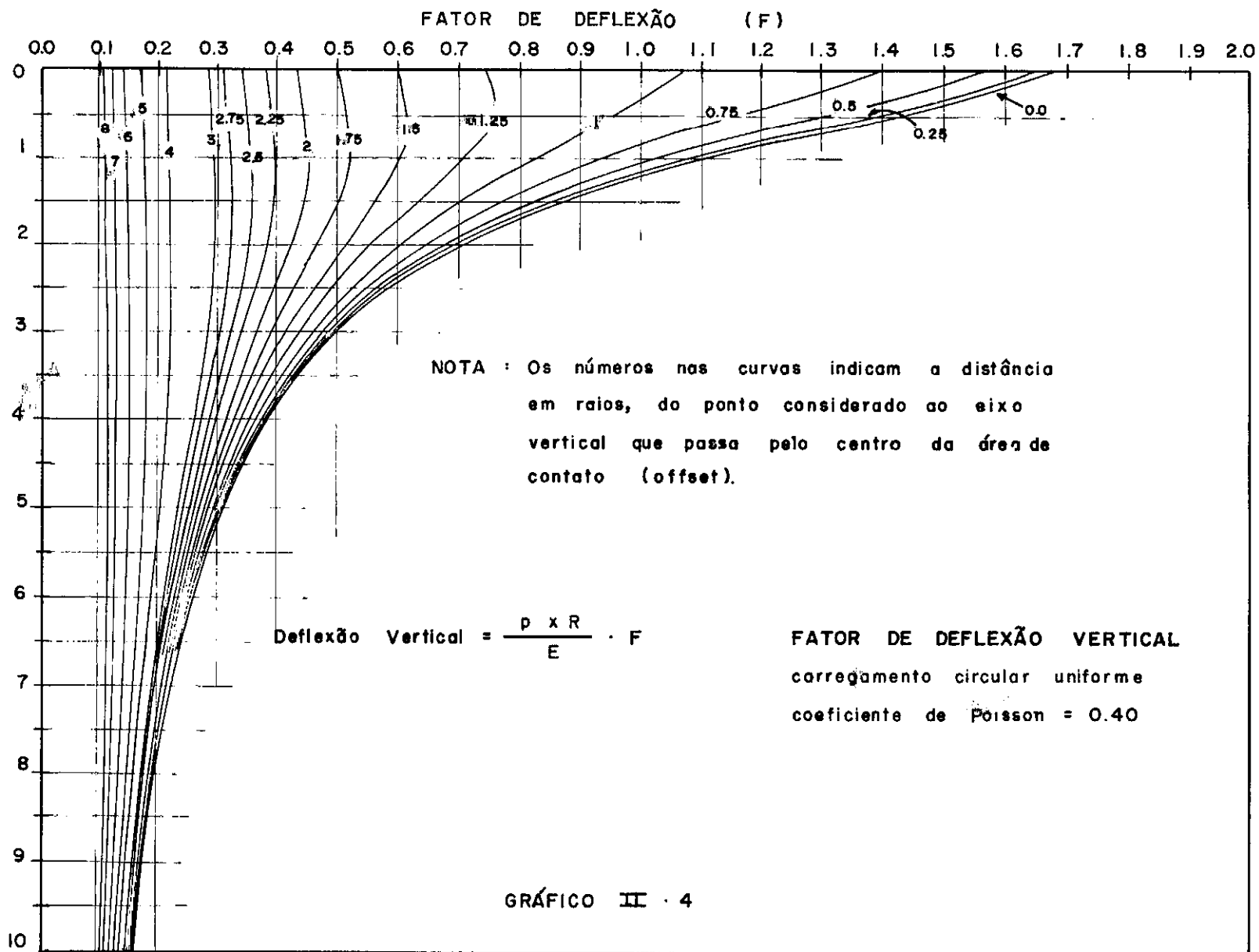


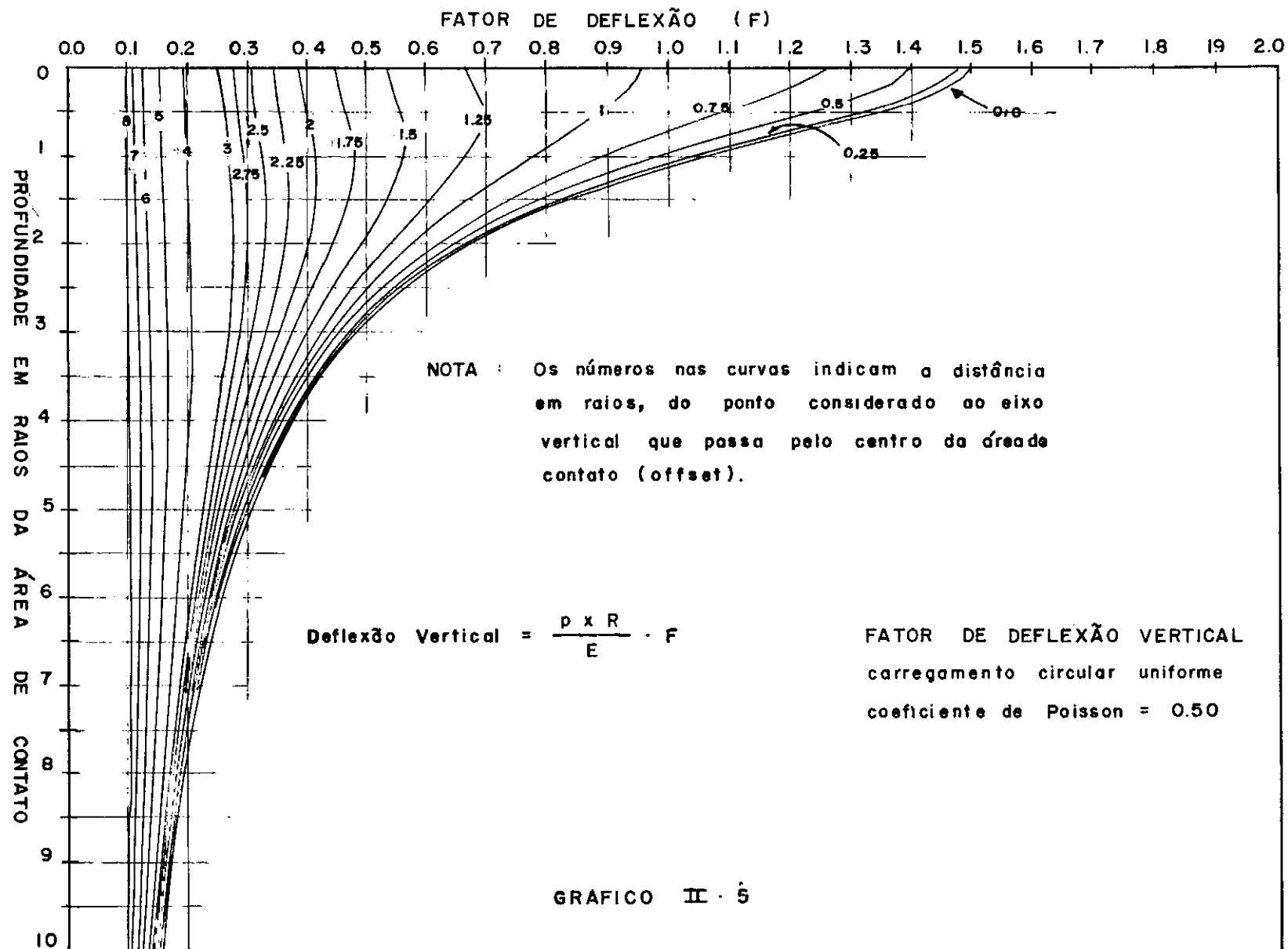
FIG. II. 4











REFERÊNCIAS

- 1 - Badillo, E.J. e Rodriguez, A.R , "Teoria y Aplicaciones de la Mecanica de Suelos"; Tomo II, México, 1967.
- 2 - Yoder, E.J. , "Principles of Pavement Design", John Wiley & Sons, 1959 , 3^a Edição, fevereiro / 1967.
- 3 - Love, A.E.H. , "The Stress Produced in a Semi-infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary", Philosophical Transaction of the Royal Society, Serie A, Vol. 228, pag. 377-420.
- 4 - Porter, O.J. , "Development of the Original Method for Highway Design" , Transactions of an ASCE Symposium, American Society of Civil Engineers , 1950 , pag. 461-471.
- 5 - Middlebrooks, T.A, e Bertram, G.E , "Adaptation to the Design of Airfield Pavements", Transactions of an ASCE Symposium, American Society of Civil Engineers, 1950, pag. 468-471.
- 6 - Boyd, W.K. e Foster, C.R. , "Design Curves for Very Heavy Multiple Wheel Assemblies" , Transactions of an ASCE Symposium, American Society of Civil Engineers, 1950, pag. 535-546.
- 7 - U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, C.E. , " Investigations of Pressures and Deflections for Flexible Pavements: Homogeneous Clayey-Silt Test Section", Report nº 1, TM nº 3-323, Vicksburg, Mississippi, Março / 1951.
- 8 - U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, C.E. , "Investigations of Pressures and Deflection for Flexible Pavements: Theoretical Stress Induced by Uniform Circular Loads", Report nº 3, Setembro / 1954.
- 9 - U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, C.E. , " Investigations of Pressures and Deflections for Flexible Pavements: Homogeneous Sand Test

- Section" , Report nº 4, Dezembro / 1954.
- 10 - Foster, C.R. e Ahlvin, R.G. , "Development of Multiple Wheel CBR Design Criteria ", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE , Paper 1647, Maio / 1958.
 - 11 - Turnbull, W.J. e Ahlvin, R.G. , "Mathematical Expression of the CBR (California Bearing Ration) Relations", Proceedings, 4^a Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Fundações , Vol.II, Londres , 1957.
 - 12 - Ahlvin, R.G. , "Consolidated CBR Criteria" , Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.84, Outubro / 1958.
 - 13 - Ahlvin, R.G. , "Flexible Pavement Design Criteria", Journal of the Air Transport Division, ASCE, Vol. 88, pag. 15-36, Agosto / 1962.
 - 14 - IBM Application Program, "System/360 Scientific Subroutine Package", Version III, GH 20-0205-4.
 - 15 - Abramowitz, M. and Stegun, I.A. , "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables", National Bureau of Standards , Applied Math. Series 55, U.S. Govt. Printing Office, Washington, 1964.
 - 16 - The Institution of Civil Engineers, "Aircraft Pavement Design", Proceedings of the Symposium, Londres, Novembro / 1970.
 - 17 - Brown, D.N., Hammitt, G.M. e Ladd, D.M. , "Flexible Pavement for Tomorrow's Major Airports", Transportation Engineering Journal ASCE, Vol . 95, Pag. 317-346 , Maio / 1969.
 - 18 - McFadden, G. e outros , "Development of CBR Flexible Pavement Design Method for Airfields", Transaction of an ASCE Symposium, American Society of

Civil Engineers, pag. 575-589, 1950.

- 19- Ledbetter, R.H. , Ulery, H.H. e Ahlvin, R.G. , "Traffic Tests of Airfield Pavements for the Jumbo Jets" , Proceedings of Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.I, pag. 876-902, Londres, Setembro / 1972.
- 20- Ahlvin, R.G. e Brown, D.N. , "Stress Repetitions in Pavement Design", Journal of the Aero-Space Transport Division, ASCE, pag. 29-37, Outubro / 1965.
- 21- Fergus, S.M. , "Development of CBR Flexible Pavement Design Method for Airfields", Transactions of an ASCE Symposium, American Society of Civil Engineers, pag. 563-567, 1950.

OUTRAS OBRAS CONSULTADAS:

- 22- Fergus, S.M. e Miner, W.E. , "Distributed Loads on Elastic Foundations the Uniform Circular Load", HRB, Proceedings, Vol 34, pag. 582-597, 1955.
- 23- Horonjeff, R. , "Planning and Design of Airports", McGraw-Hill, 1962.
- 24- Pacitti, T. , "Fortran-Monitor Princípios", Ao Livro Técnico, 2^a Edição , 1968.
- 25- Kaplan, W. , "Advanced Calculus" ,Addison-Wesley Publishing Company, 5^a Edição, 1970.