

EVOLUÇÃO DE CÉLULAS DE PRESSÃO TOTAL E EXPERIÊNCIA DA COPPE

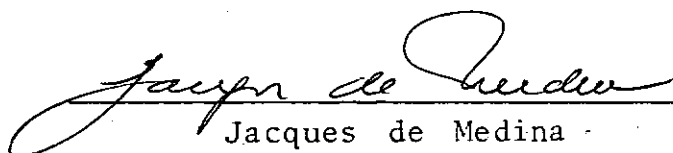
José Bonifácio Mäder Ribas

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

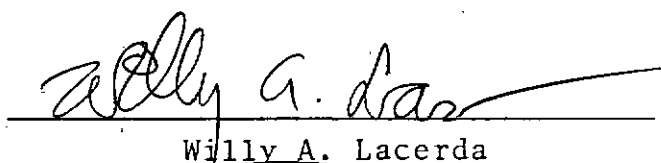
Aprovado por:



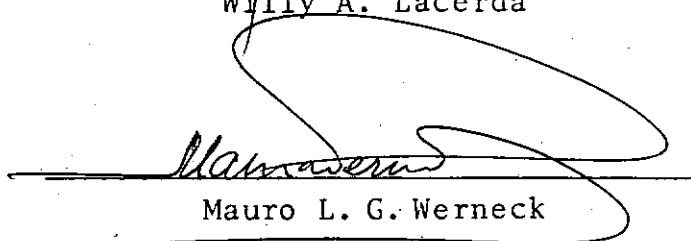
Márcio Miranda Soares
(Orientador)



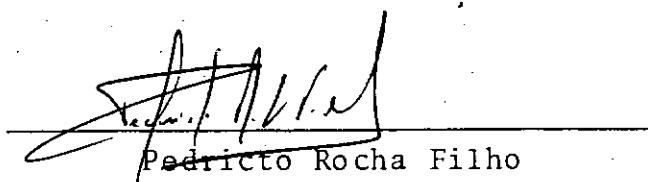
Jacques de Medina



Willy A. Lacerda



Mauro L. G. Werneck



Pedricto Rocha Filho

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1980

RIBAS, JOSÉ BONIFÁCIO MADER

Evolução de Células de Pressão Total e Experiência da COPPE
[Rio de Janeiro] 1980.

viii, 177 p. 29,7 cm (COPPE-URFJ, M.Sc., Engenharia Civil,
1980)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de
Engenharia Civil.

1. Estudo do comportamento de células de pressão total

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

Para
NÍCIA
e
CAMILA

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Márcio Miranda Soares, pela orientação, apoio e incentivo, durante a execução deste trabalho.

Ao Engenheiro Jean Pierre Remy, que cedeu grande parte da bibliografia utilizada, sem o que este trabalho teria sido bastante dificultado.

À Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro (METRÔ/RIO), que forneceu dados necessários para elaboração deste trabalho.

Aos professores e colegas da Área de Mecânica dos solos da COPPE, pelo interesse e estímulo.

À Norma de Vasconcellos pelo serviço datilográfico.

Ao Gilmar, à Fátima e ao Ricardo, pelos desenhos.

R E S U M O

Apresenta-se, inicialmente, um estudo abrangente dos vários tipos de células de pressão total, utilizadas em solos e em fronteiras rígidas (paredes-diafragma, estacas-pranchas etc), o que permitiu apresentar uma classificação geral destes instrumentos. Procura-se estabelecer os valores limites aceitáveis para os fatores que influenciam o desempenho das células. Analisam-se vários procedimentos de instalação das células, salientando a importância desta fase nos resultados obtidos.

Faz parte das atividades de pesquisa da área de Mecânica dos Solos da COPPE/UFRJ a instrumentação de campo, destacando-se a instalação de células de pressão total em paredes-diafragma de escoramento da vala do METRÔ/RIO. Descreve-se o procedimento de instalação de células de dois tipos e sua repercussão nos resultados. Comenta-se a calibração de um dos tipos de células.

Finalmente, como consequência destes estudos, apresenta-se o projeto de um protótipo de célula de pressão total. Esta célula, do tipo de fluido confinado, que o Autor projetou, não necessitará de material importado. Pretende-se que o seu desenvolvimento e calibração na COPPE/UFRJ, conduza ao projeto final de uma célula de utilização confiável no campo, em solo ou em fronteiras rígidas.

A B S T R A C T

A comprehensive study of design and performance of earth pressure cells as used in soils and rigid boundaries (diaphragm walls, sheet piling etc) was firstly done, and a general classification of these instruments was presented. It was sought to establish limiting values for the different factors that influence the performance of these cells. An analysis of different installation procedures and how they influence the results was made.

Researchers from COPPE/UFRJ have developed a few projects requiring field instrumentation. In two of these jobs, two types of earth pressure cells were installed in the excavations for the subway of Rio de Janeiro. The measurements are described. Also shown the calibration of one of the cell types.

Finally, as a result of these studies, the Author designed a prototype of earth pressure cell. It is a confined fluid cell type, and its design avoids using foreign imported material. It is hoped that the development and calibration of this cell will permit to attain an improved design of earth pressure cell to be used in soil and rigid boundaries.

Í N D I C E

FICHA CATALOGRÁFICA	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
	Página
I. INTRODUÇÃO	1
II. CÉLULAS EXISTENTES E SUA CLASSIFICAÇÃO	5
2.1 - A Célula Goldbeck	6
2.2 - Tipos de Células	8
2.2.1 - Células do Tipo Pistão	9
2.2.2 - Células do Tipo Diafragma	11
a) Diafragma com Deformação Impedida ("apoiado")	11
b) Diafragma com Deformação Livre	11
2.2.3 - Células do Tipo Fluido Confinado	15
2.3 - Transdutores	16
2.3.1 - Mecânicos	16
2.3.2 - Elétricos	16
a) Resistência de Condutor Elétrico	16
b) Propriedades Piezoelétricas	18
c) Indução Magnética	19
2.3.3 - Acústicos	20
2.3.4 - Hidráulicos	20
a) Contra-Pressão	21
b) Medida de Pressão de Fluido Confinado	23

III.	VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CÉLULAS DE PRESSÃO	
	TOTAL	24
	3.1 - Estudos Teóricos	25
	3.1.1 - Células em Solo	25
	3.1.2 - Células em Fronteira Solo-Estrutura	47
	3.2 - Ensaaios em Laboratório para Verificação do	
	Comportamento das Células de Pressão Total	56
	3.2.1 - Fatores que Influem na Medida de Ten	
	sões no Solo	62
	a) Dimensões da Célula	62
	b) Compressibilidade da Célula e do	
	Solo	63
	c) Relação Área Sensível para Área	
	Total	68
	d) Coeficiente de Poisson	70
	e) Tipo de Solo	70
	f) Temperatura	72
	g) Estado de Tensões no Solo	73
	3.2.2 - Fatores que Influem na Medida de Em-	
	puxos sobre Fronteira	81
	a) Ressalto formado pela Célula so-	
	bre a Fronteira	81
	b) Compressibilidade e Flexibilidade	
	da Célula	83
	c) Tipo de Solo	87
IV.	COMPORTAMENTO NO CAMPO	90
	4.1 - Instalações em Solo (aterros e pavimentos)	91
	4.2 - Instalações em Fronteiras Solo-Estrutura	97
V.	EXPERIÊNCIA DA COPPE/UFRJ	100
	5.1 - Instrumentações Executadas	101

5.2 - Células de Pressão Total Utilizadas	105
5.2.1 - Descrição e Calibração	105
a) Célula tipo diafragma apoiado com transdutor contra-pressão	105
b) Células tipo fluido confinado com transdutor acústico	108
5.3 - Instalação e Valores Medidos	119
5.3.1 - Lote 3 (Rua Uruguaiana)	119
5.3.2 - Lote 9 (Botafogo)	125
VI. COMENTÁRIOS FINAIS	136
VII. PROJETO DE UM PROTÓTIPO - SUGESTÕES PARA PESQUISAS	140
VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I. INTRODUÇÃO

Verifica-se, atualmente, uma crescente preocupação com a medida de grandezas nas obras de engenharia geotécnica, por meio de instrumentação adequada. Estas instrumentações de campo geralmente são executadas para atingir os seguintes objetivos (Lee, 1968):

- a) verificar a aplicabilidade de uma teoria;
- b) obter dados de controle da obra;
- c) estabelecer regras puramente empíricas, quando os estudos teóricos são deficientes;
- d) fornecer, durante a construção, dados para completar o projeto de uma estrutura; e
- e) conhecimento do local e seus parâmetros geotécnicos.

A COPPE/UFRJ, sensível a esta tendência, tem procurado dinamizar os programas de instrumentação em suas várias áreas de pesquisa.

A área de Mecânica dos Solos tem participado de projetos de instrumentação de aterros, escavações e pavimentos. Para algumas dessas instrumentações foram importadas células de pressão total.

O presente trabalho teve como objetivo inicial fa

zer um estudo bibliográfico intenso que propiciasse o melhor conhecimento do comportamento destes instrumentos sob diferentes condições de emprego e que possibilitasse fazer uma análise mais precisa dos valores medidos. Ele se preocupa com as células que medem a componente normal da pressão total num ponto do solo.

A experiência brasileira no emprego e desenvolvimento dessas células, relatada em trabalhos publicados é escassa, e tem-se limitado a descrever a instrumentação executada sem se aprofundar na verificação da acurácia dos dados observados. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SP) vem desenvolvendo um modelo de célula há algum tempo e tem instalado células de pressão total, principalmente nas barragens de terra das grandes hidroelétricas.

Os trabalhos consultados da vasta bibliografia internacional abordam todos os aspectos relativos a esses instrumentos.

O estudo do projeto e funcionamento de diversos tipos de célula de pressão total possibilitou que se apresentasse uma classificação geral para as células em uso atualmente.

Das descrições de aplicação em ensaios de laboratório e de campo e vários desenvolvimentos teóricos sobre a performance das células, obteve-se uma visão bastante aprofundada dos diversos fatores que influem no seu comportamento em solo e em fronteiras rígidas. A partir deste estudo foi possível definir as características básicas para o projeto de um protótipo apresentado.

Finalmente, é descrita a experiência da COPPE com dois tipos diferentes de células. Em cada utilização, aborda-se a metodologia de instalação, os ensaios anteriores ao emprego no campo e faz-se alguns comentários com respeito aos valores medidos.

CAPÍTULO II - CÉLULAS EXISTENTES E SUA CLASSIFICAÇÃO

II. CÉLULAS EXISTENTES E SUA CLASSIFICAÇÃO

2.1 - A Célula Goldbeck

O primeiro projeto de célula de pressão total foi desenvolvido por Goldbeck & Smith (1916). Esta célula, mais tarde conhecida como "Célula Goldbeck", foi construída na forma de um cilindro circular reto de pequena altura, tendo uma de suas faces sensível à pressão do solo (fig.1).

Um fino diafragma metálico flexível é fixado à base da célula por um anel. Dois discos metálicos rígidos são parafusados e colados ao diafragma, um de cada lado deste, formando o pistão da célula. Estes discos têm diâmetro pouco menor que o diâmetro interno do anel fixador do diafragma, sendo só esta pequena porção anular do diafragma o elemento flexível. O conjunto formado pelos discos e pelo diafragma apoia-se em um suporte côncavo eletricamente isolado da base. Um fio elétrico é ligado a este suporte e levado ao exterior, até o terminal de leitura, por dentro de um tubo de ferro galvanizado conectado ao corpo da célula. A célula é instalada no local desejado e o fio elétrico e o tubo são ligados a um amperímetro. A pressão na face externa do pistão faz com que este fique em contato com o suporte côncavo, fechando o circuito elétrico. Ar sob pressão é injetado pelo tubo de ferro galvanizado, empurrando o pistão contra o solo, até que se verifique, pelo amperímetro, que o contato elétrico foi interrompido. A pressão de ar indicada pelo manômetro neste instante é considerada a pressão atuante na face da célula.

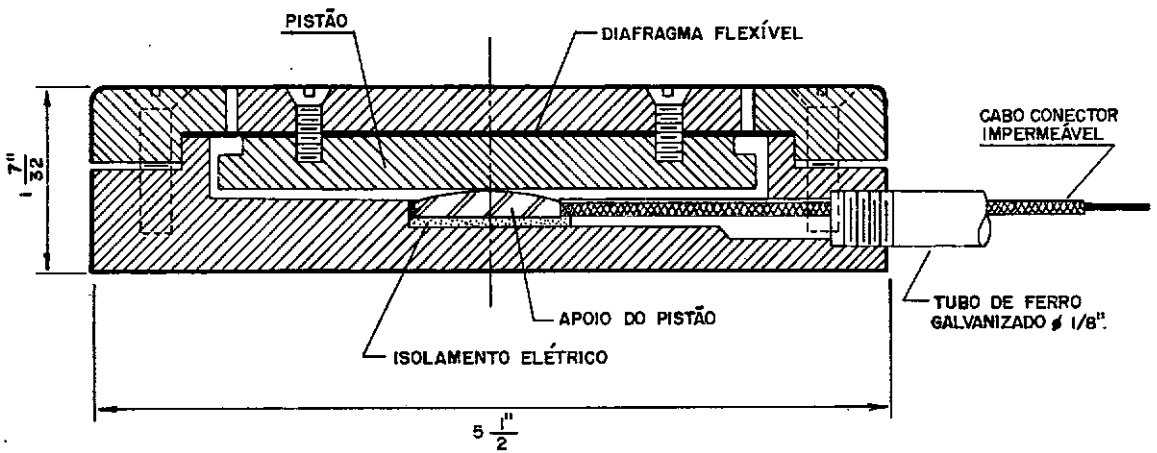


Fig.1 — Célula de pressão total "Goldbeck"
(Goldbeck, 1920)

Um dos principais inconvenientes desta célula é o deslocamento da face sensível contra o solo. Foi determinado que o deslocamento necessário para interromper o contato elétrico é da ordem de 0,0051mm (0,0002") a 0,0102mm (0,0004") para pressão de até 0,98 kgf/cm² (14 psi) (WES, 1944). Constatou-se, também, que para 0,0025mm (0,0001") de deslocamento do pistão, há um aumento de 1% na carga (Seaquist, 1934). Foram realizados melhoramentos no sentido de minimizar este deslocamento, reduzindo as deformações elásticas da parte móvel e utilizando indicadores elétricos mais sensíveis.

O emprego da célula no campo apresentou dificuldades em se obter um contato uniforme do solo sobre o pistão e o anel envolvente e em se fazer o isolamento elétrico.

2.2 - Tipos de Células

Tendo por base a célula descrita acima, foram desenvolvidos vários outros tipos, sempre conservando o formato original e procurando aperfeiçoar seu desempenho, com o fim de se tentar obter uma melhor acurácia.

Surgiram, então, os vários tipos de células, que podem ser assim agrupadas: tipo pistão, tipo diafragma e tipo fluido confinado.

Vários tipos de transdutores foram adaptados para a medição de pressão de terra. Até hoje, já foram utilizados os seguintes transdutores: mecânico, elétrico, acústico e hidráulico.

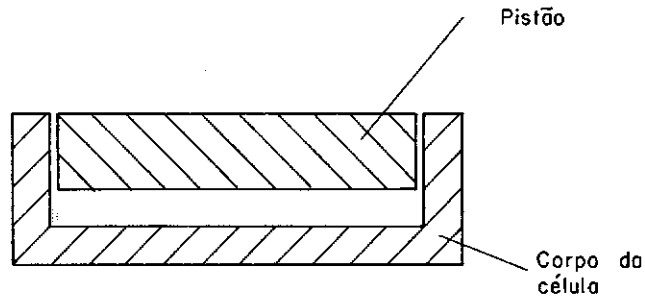
Nos ítems seguintes são apresentados os princípios de funcionamento de cada tipo de célula e de transdutor, com comentários a respeito do comportamento de cada um.

2.2.1 - Células do Tipo Pistão

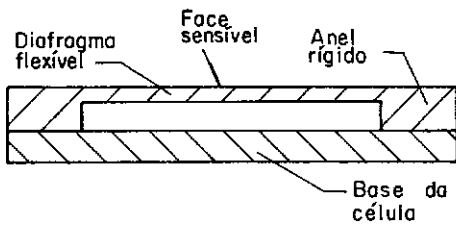
Estas células constam de um pistão plano rígido que se desloca no interior de um cilindro circular vazado (fig. 2.a). A medida do deslocamento deste pistão permite fazer uma estimativa da pressão de solo atuando sobre a face da célula. O deslocamento do pistão é função do esforço total aplicado sobre ele, sendo praticamente independente da distribuição de pressão. Por este fato, Kallstenius & Bergau (1956) aconselham o seu uso para a medida de pressões não uniformes.

No entanto, durante a fase de medida, ocorre uma alta concentração de tensões sobre a face da célula devido à descontinuidade de deformação na periferia do pistão. Verificou-se em ensaios que esta deformação localizada na periferia do pistão provoca grande dispersão dos valores medidos (Kallstenius & Bergau, 1956). Para Lee (1968) é possível, mas não provado, que este tipo de célula seja o melhor quando se medem variações decrescentes de tensões.

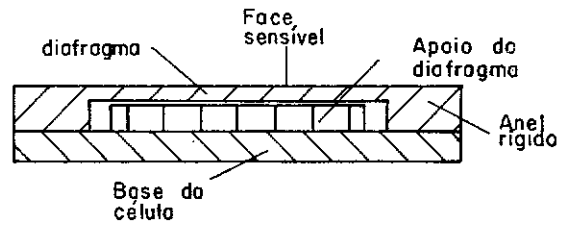
Devido a necessidade de enrijecer o pistão, a célula em geral apresenta grande espessura. Portanto, este tipo não é indicado para medições de tensões no interior de maciços, pois suas dimensões influenciarão muito os valores medidos, como veremos nos próximos capítulos.



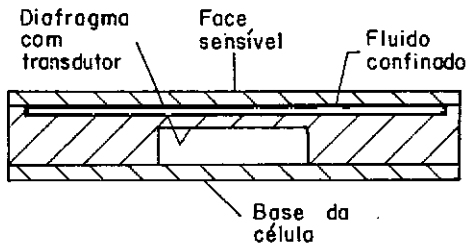
a) Tipo pistão



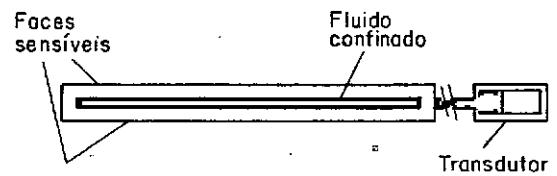
b) Tipo diafragma livre.



c) Tipo diafragma "APOIADO"



d.1) Com diafragma secundário.



d.2) Com transdutor anexo.

d) Tipo fluido confinado.

FIG. 2 - Representação esquemática dos tipos de célula de pressão total.

2.2.2 - Células do Tipo Diafragma

O diafragma metálico foi utilizado para eliminar a descontinuidade de deformação na periferia do pistão. Este diafragma pode ou não deformar-se livremente sob a ação da pressão do solo.

a) Diafragma com Deformação Impedida ("apoia-do")

Neste tipo de célula, o diafragma, fixado ao corpo da célula na sua periferia, fica com a sua região central apoiada numa parte do corpo da célula mais rígida que ele, e que pode ser o transdutor (fig.2.c). Quando as células possuem cristais piezoelétricos como transdutor, o diafragma fica apoiado no transdutor; quando possuem transdutores hidráulicos tipo contra-pressão, o diafragma fica apoiado no corpo da célula. Pode-se construir células altamente rígidas e bastante sensíveis, como é o caso daquelas que empregam transdutores piezoelétricos. As células com transdutor hidráulico contra-pressão apresentam, durante a fase de medida, um deslocamento da face sensível contra o solo.

b) Diafragma com Deformação Livre

Neste caso, o diafragma, engastado em um anel rígido, deforma-se livremente sob ação da pressão de solo (fig. 2.b). A célula é construída a partir de uma peça metálica maciça de forma cilíndrica circular de pequena espessura. Por torneamento constroem-se, simultaneamente, o diafragma e o anel envolvente nas dimensões desejadas. O anel deve ter a largura necessária

para resistir às altas tensões que ocorrem na periferia da célula, decorrentes da diferença de compressibilidade.

Sob a ação da pressão do solo, o diafragma se deforma segundo uma curva contínua, sem provocar concentração de tensões sobre a face de medida. A curva de deflexão para a tensão máxima é calculada pela teoria da elasticidade (equações de Timoshenko para placas circulares engastadas). A deflexão máxima do diafragma deve ser menor que a sua espessura, pois deflexões da ordem de grandeza da espessura do diafragma fazem com que este atue como uma membrana e a deformação radial no centro torne-se muito reduzida e não mais proporcional à pressão (Woodman, 1955).

Este tipo de célula não é adequado para medir pressões não uniformes pelo fato do diafragma deformar diferentemente em função da distribuição da tensão.

Um estudo teórico analítico, empregando a solução elástica de Timoshenko & Kriger, para verificar o efeito da distribuição não uniforme de pressões sobre o diafragma foi feito por Wong (1974). Pela teoria da elasticidade foram calculadas as deformações que ocorreriam em diferentes pontos do diafragma solicitado por tensões não uniformes. A concentração de tensões na área central do diafragma provoca maior erro em relação à distribuição uniforme de pressão do que quando a concentração ocorre na região periférica do diafragma. Se a deformação do diafragma é medida em pontos situados no centro e no bordo do diafragma,

com "strain gages", no caso de concentração de tensões na região central, o "gage" central será mais influenciado. No caso de concentração de tensões na região periférica, o "gage" do bordo será mais solicitado. Observou-se também, que quanto menor a área central de concentração de tensões, maior a influência sobre os "strain gages". Wong sugere que no projeto de uma célula com estas características, deve-se medir a deformação do diafragma em pelo menos quatro pontos nos bordos a intervalos de 90° , o que tenderá a minimizar qualquer efeito de concentração de pressão diretamente sobre um dos pontos. Sugere também que o diafragma deve ter a maior área possível para que o ponto lateral de medida fique com a máxima distância relativa do centro (relação distância do ponto ao centro/raio do diafragma se aproximando de 1).

Brown & Pell (1967) verificaram que, neste tipo de célula, uma pressão aplicada sobre a superfície lateral da célula influi mecanicamente na sua resposta. Este fato deve-se às deformações na própria célula e no diafragma decorrentes da superposição dos efeitos do coeficiente de Poisson e da flexão do diafragma quando a tensão lateral é aplicada. Conforme a direção da aplicação da carga, em relação à posição dos pontos de medida da deformação do diafragma, os valores medidos podem ser maiores ou menores que a tensão aplicada (fig.4).

A sensibilidade e a pressão máxima admissível na célula são definidas pela espessura e rigidez do diafragma. Pode-se fazer com que a célula tenha diafragma em uma ou nas suas duas faces planas.

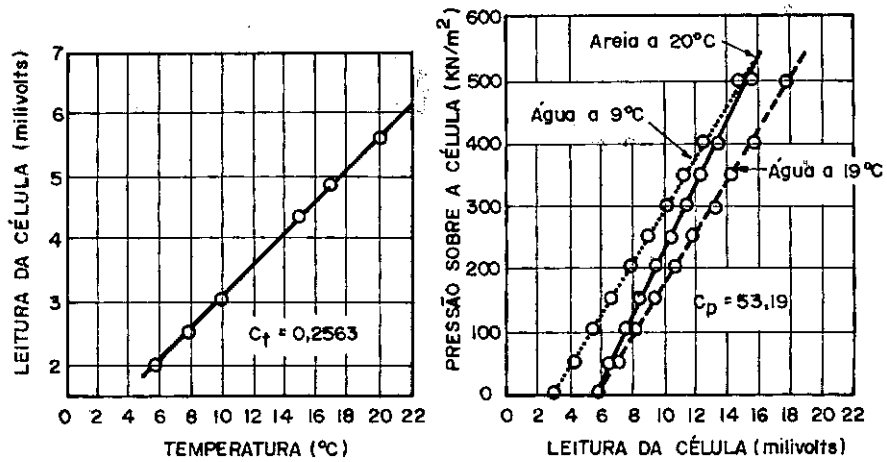
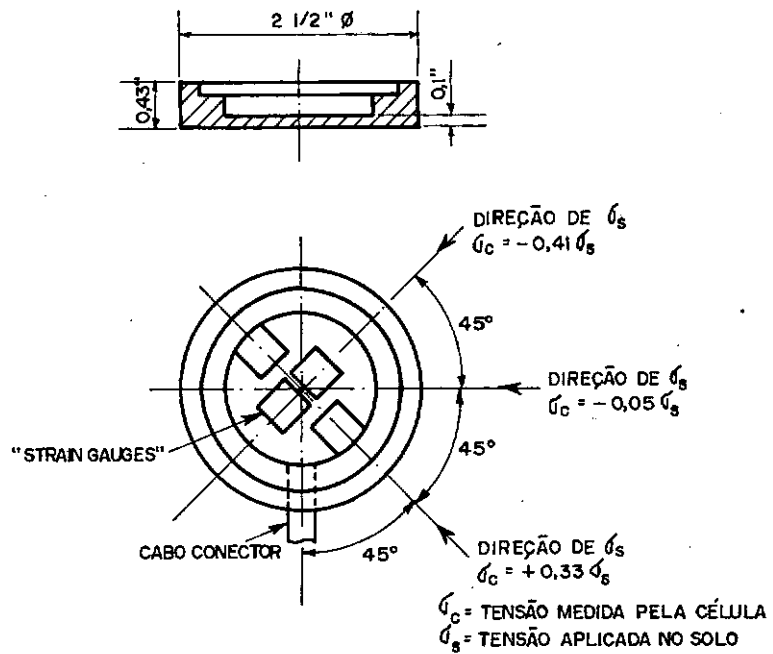


FIG. 3 — Influência da temperatura em células tipo fluido confinado (ATTEWELL & EL-NAGA, 1977).



PLANTA DA CÉLULA MOSTRANDO A POSIÇÃO DOS "STRAIN GAUGES"

FIG. 4 — Sensibilidade transversal de célula de pressão total tipo diafragma livre (BROWN & PELL, 1967).

2.2.3 - Células do Tipo Fluido Confinado

A face de medida, que fica em contato com o solo, é ligada em toda a periferia ao corpo da célula, formando uma câmara estanque, que é preenchida com um fluido incompressível (fig. 2.d), em geral mercúrio ou óleo, e que está em comunicação com um dispositivo onde o transdutor é montado. Quando a pressão do solo atua sobre a face da célula, a pressão do fluido confinado se altera, sensibilizando o transdutor.

Na maioria das células utiliza-se um diafragma interno que sofre a ação da pressão do fluido confinado (fig.2.d.1). A pressão do solo, mesmo aplicada excêntricamente, é redistribuída uniformemente pelo fluido sobre o diafragma interno, no qual está montado o transdutor.

A variação da temperatura altera a resposta da célula, devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica do fluido confinado e do material com que é construída a célula. Como o fluido é confinado, sua variação de volume se traduzirá em uma variação de pressão. Este efeito não pode ser totalmente eliminado, mas pode ser minimizado com o emprego de uma camada de fluido mais fina. Normalmente, este valor fica entre 0,25 mm (0,01") e 0,76 mm (0,03") (Hvorslev, 1976).

A influência da temperatura é verificada na figura 3, que mostra o resultado de calibração (Attewell & El Naga, 1977) de células tipo fluido confinado em solo e em água a diferentes temperaturas, sem alterar a pressão aplicada.

2.3 - Transdutores

2.3.1 - Mecânicos

Em células tipo pistão, a medida do deslocamento do pistão, que fornece uma indicação da pressão do solo atuante pode ser feita com extensômetros mecânicos (Converse, 1933; Evans, 1940).

É possível também estimar a pressão do solo, medindo-se o esforço necessário para fazer deslocar uma placa móvel confinada entre duas outras fixas, com a pressão do solo atuando sobre a face externa de uma destas placas fixas. Como existe uma relação constante entre a tensão normal (pressão do solo) e a tensão cisalhante, é possível determinar a pressão do solo (Huntington & Luetzelschwab, 1936; Spangler, 1938).

Estes extensômetros mecânicos são muito suscetíveis à histerese. Em geral são de dimensões relativamente grandes e exigem acesso até próximo ao ponto de medição para se obter as leituras. Foram pouco utilizados e logo abandonados.

2.3.2 - Elétricos

a) Resistência de Condutor Elétrico

Um condutor elétrico submetido a uma determinada variação de tensão sofre uma deformação, o que altera a sua resistência elétrica.

Esta propriedade foi utilizada por Carlson (1939) no projeto de uma célula tipo fluido confinado. Dois condutores são fixados entre o centro do diafragma e o corpo da célula, de maneira que a deformação do diafragma aumenta a tensão em um condutor e diminui no outro. Medindo-se a relação de resistências entre estes dois condutores, consegue-se eliminar efeitos indesejáveis na medida de resistência (como a resistência de ligações e de cabos conectores) e a influência do efeito da temperatura sobre os condutores.

O transdutor mais comum, conhecido como "strain gage", é colado ao diafragma de uma célula tipo diafragma livre (Sparrow & Tory, 1966; Ingran, 1965; Dunn & Billan, 1966) ou ao diafragma interno de uma célula tipo fluido confinado (WES, 1944; Plantema, 1953; Parkin, 1961). Para eliminar os efeitos da temperatura e da resistência das ligações e dos cabos conectores, monta-se sobre o diafragma um conjunto de quatro transdutores dispostos como na figura 4. Assim, os dois transdutores centrais medem deformações de tração e os dois laterais medem deformações de compressão do diafragma. As regiões de tração e de compressão na face do diafragma são determinadas pela teoria da elasticidade. Fazendo-se uma ligação elétrica conveniente entre estes quatro transdutores, consegue-se o objetivo desejado, além de se obter o valor máximo da variação de resistência e consequentemente, maior precisão nas medidas.

Como os transdutores são colados ao diafragma, a calibração inicial pode se alterar pelo efeito do "creep" do adesivo. Assim, este transdutor não é indicado em projetos de ins-

trumentação de longa duração.

b) Propriedades Piezoelétricos

Alguns materiais, como os cristais de quartzo, ligas de titânio-zircônio e outros, geram uma carga eletrostática quando submetidos a rápidas variações de pressão. A diferença de potencial que surge pode ser transmitida por cabos conectores a um receptor. Como esta voltagem é inversamente proporcional à capacitância total do circuito, é necessário usar cabos conectores curtos para medir pressões baixas.

Estes transdutores em geral são utilizados em células diafragma com deformação impedida, ficando o diafragma "apoiado" no transdutor. Um exemplo deste tipo foi desenvolvido no Road Research Laboratory (RRL-England) (Morris, 1953), com a utilização de cristais de quartzo. As características de deformabilidade e sensibilidade das células são determinadas pelas propriedades do transdutor, que é bastante rígido e muito sensível. Esta célula do RRL tem um módulo de elasticidade global de 8×10^5 kgf/cm² (11×10^6 lb/in²), e pode medir pressões de até 10,5 kgf/cm² (150 psi) com uma acurácia de $\pm 0,0021$ kgf/cm² ($\pm 0,03$ psi). Ensaios com a célula em laboratório indicaram que as pressões registradas foram 10% maiores que as aplicadas, independentemente do tipo de solo (Whiffin & Morris, 1962). Um anel rígido envolvente foi incorporado, alterando a geometria do corpo da célula (Potter, Mayhew & Mayo, 1969) para sua aplicação em presença de tensões radiais elevadas.

Estes transdutores podem ter dimensões muito pe-

quenas. O United Research Service (URS - USA) projetou uma célula com fluido confinado ficando o transdutor piezoelétrico mergulhado no fluido. Esta célula tem 0,1cm de espessura e 3,8cm de diâmetro (Brown, 1977).

Os transdutores piezoelétricos são empregados somente para medir pressões de curta duração (dinâmicas). São muito sensíveis a variações de temperatura, radiação elétrica e umidade.

c) Indução Magnética

Um núcleo metálico é preso ao centro do diafragma e levemente afastado de uma bobina elétrica. Quando o diafragma é deformado, altera-se a distância entre o núcleo e a bobina, influenciando o fluxo magnético que faz variar a relutância do circuito. No início, com o emprego de uma bobina, as curvas de calibração obtidas eram não lineares (WES, 1944). Este problema foi resolvido por Rowe (1954), que montou duas bobinas primárias e duas secundárias. Com isto também conseguiu-se maior sensibilidade na medida da deflexão do diafragma. Como o núcleo metálico é preso ao diafragma, a deformação medida é a que ocorre no centro do diafragma.

Este transdutor pode ser empregado em células tipo diafragma com deformação livre (Rowe, 1954; Lee & Brown, 1957) e tipo fluido confinado (WES, 1944). Smith & outros (1968) e Selig (1964) citam o emprego de célula Carlson, na qual o transdutor de resistência elétrica foi substituído por um transdutor deste tipo, chamado de LVDT, o que melhorou a geometria da célula para seu empre-

go em solo.

2.3.3 - Acústicos

Uma corda metálica mantida sob tensão possui uma frequência natural de vibração quando excitada. Caso a tensão sobre a corda seja alterada, a frequência natural de vibração também se alterará.

Este transdutor é usado com células tipo diafragma com deformação livre e tipo fluido confinado. A corda pode ser tensionada entre dois suportes fixos ao diafragma (NGI, 1962; Kennard, Penman & Vaughan, 1967) ou ao corpo da célula (Maihak). Em outras células, a corda é fixada entre o centro do diafragma e o corpo da célula (RRL-Whiffin & Smith, 1951; Trollope, Speedie & Lee, 1963). Quando o diafragma é deformado sob uma determinada pressão, altera-se a posição dos suportes da corda vibrante, fazendo variar a tensão na corda. Por calibração relaciona-se a variação de frequência à pressão aplicada sobre a célula.

É o transdutor mais estável, sendo o mais indicado para medições por longos períodos. É bastante sensível e ligações e o comprimento dos cabos conectores não influem na medição. Só mede cargas estáticas ou de lenta variação. Exige equipamento sofisticado para leitura.

2.3.4 - Hidráulicos

Estes transdutores estão separados em dois grupos: o primeiro emprega a contra-pressão de um fluido para equilibrar

a pressão atuando sobre a face da célula; e o segundo mede a variação de pressão de um fluido confinado. Estes transdutores só medem pressões estáticas ou de lenta variação e sua sensibilidade é baixa.

a) Contra-Pressão

Este grupo de transdutores pode ser aplicado tanto para células tipo fluido confinado como para células tipo diafragma apoiado.

A pressão do solo sobre as células tipo fluido confinado, faz variar a pressão deste fluido, a qual, por sua vez, atua num dispositivo anexo (fig.2.d.2), tirando-o da posição de repouso. Injetando-se neste dispositivo um outro fluido, sob pressão conhecida, procura-se equilibrar a pressão do fluido da célula, para, ao anular o efeito que este produziu no dispositivo, obter a pressão atuando sobre a célula.

Na célula Glotzl (Frans, 1958; Glotzl, 1958), do tipo fluido confinado, o dispositivo anexo contém um diafragma apoiado em uma placa com dois orifícios. A pressão atua sobre o diafragma, vedando os orifícios. A cada um dos orifícios está conectado um tubo de pequeno diâmetro. Por um destes tubos injeta-se óleo, elevando sua pressão e afastando o diafragma até que se obtenha o retorno pelo outro tubo. A pressão do óleo, neste momento, é considerada igual à pressão do solo.

O dispositivo anexo à célula projetada pelo TRRL-Department of the Environment (Irwin, 1974) é um tubo de Bourdon acondicionado em um cilindro de pressão ligado por um tubo de nylon a

um indicador de pressão. Ao elevar-se a pressão do fluido confinado, o tubo de Bourdon deforma-se e fecha um circuito elétrico montado no interior do cilindro. Uma válvula de solenoide é ativada ajustando a pressão de ar no interior deste cilindro de pressão até que o tubo de Bourdon retorne à posição inicial. A nova pressão de ar indica a pressão atuando sobre a célula. Com este sistema obteve-se uma acurácia de $\pm 0,014 \text{ kgf/cm}^2$ ($\pm 1,4 \text{ kN/m}^2$) para pressões de 0 a 2 kgf/cm^2 (0 a 200 kN/m^2).

As células de diafragma com deformação impedida que utilizam transdutor tipo contra-pressão apresentam uma placa com ranhuras circulares concêntricas e um fino diafragma que repousa sobre ela. Dois orifícios, um central e outro lateral, são feitos nesta placa. A eles são conectados finos tubos, ligados ao terminal de leitura. Ao atuar a pressão de solo sobre o diafragma, o orifício central é obstruído. Pelo orifício lateral injeta-se fluido, em geral ar ou óleo, sob pressão, forçando o diafragma contra o solo até se conseguir retorno pelo orifício central. Esta é considerada a pressão atuante. A pressão admissível desta célula é fixada pelas propriedades elásticas do material com que é construída (Glotz1, 1958; Tosticarelli, 1972). Quando se utilizar óleo para contra-pressão deve-se fazer correção correspondente à diferença de nível entre a célula e o terminal de controle. O uso de gás elimina esta correção (Levillain, 1972), mas exige maiores cuidados na vedação das conexões.

O emprego deste transdutor permite a construção de células de pequena espessura. No entanto, elas não devem ser usadas em contato direto com pedregulho grosso. É mais susceptível a torção e flexão, o que pode influenciar as leituras (Hosking,

1968). Sua sensibilidade é baixa e só é aplicável para medir pressões estáticas ou de lenta variação. Lee (1968) observa que este sistema de compensação de tensões é relativamente complexo, exigindo cuidados para seu uso, devido às variações no estado de tensões no solo de forma imprevisível, conforme foi constatado nos ensaios feitos por Kallstenius & Bergau (1956).

b) Medida de Pressão de Fluido Confinado

O transdutor que mede a pressão do fluido deve ficar em local acessível. Assim, um fino tubo ininterrupto faz a conexão do fluido desde a célula até o transdutor.

A pressão do fluido é medida, ou por um manômetro de Bourdon (Kallstenius & Bergau, 1956; Magnusson, citado em Hamilton, 1960), ou pela variação de nível em um tubo capilar (Peaker, 1965).

O maior problema no emprego destas células surge na montagem, manuseio e instalação, pois deve-se evitar a presença de bolhas de ar no circuito hidráulico. A necessidade de perfeita vedação nas conexões para impedir vazamentos e a alta sensibilidade a variações térmicas torna este transdutor não indicado para uso no campo e de difícil aplicação em laboratório.

CAPÍTULO III - VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO
DAS CÉLULAS DE PRESSÃO TOTAL

III. VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CÉLULAS DE PRESSÃO TOTAL

3.1 - Estudos Teóricos

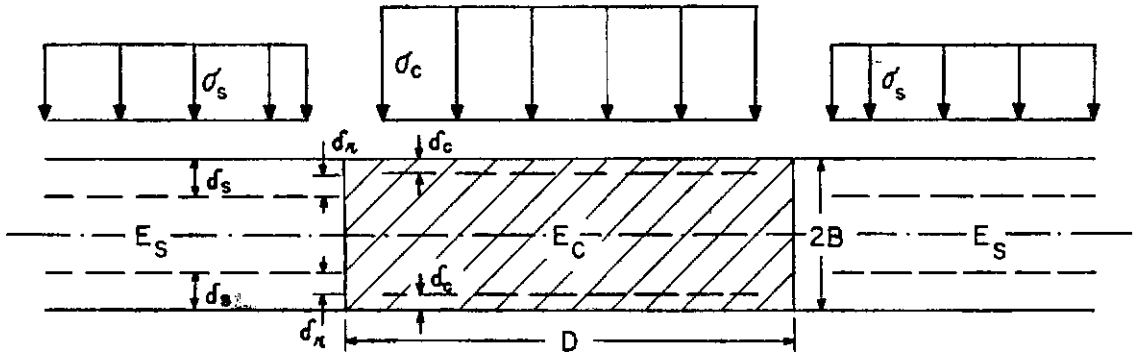
3.1.1 - Células em Solo

Os primeiros estudos do comportamento de células de pressão total em massas de solo empregaram a teoria de elasticidade, considerando, tanto o solo como a célula, materiais elásticos lineares, homogêneos e isotrópicos. Taylor (1945), Hast (1943) e Coutinho (1949) foram os precursores destes estudos.

O estudo de Taylor (1945) visou diretamente o emprego de células em solo. Ele analisou as deformações do solo e da célula, considerando uma camada horizontal de solo que contém a célula, limitada por dois planos horizontais que passam pelas faces superior e inferior da célula (fig. 5.a).

As hipóteses adicionais de Taylor consistem em admitir que a deformação desta camada é unidimensional (vertical), que é válida a hipótese de Winkler com distribuição uniforme de tensões sobre a célula e que a profundidade da célula é tal que os acréscimos de tensão decorrentes das diferenças de compressibilidades da célula e do solo não sejam função desta profundidade.

As diferentes deformações do solo e da célula sob tensão, fazem com que a célula forme um ressalto ("indentation"-



$$d_r = d_s - d_c \quad \therefore \quad \frac{(\sigma_c - \sigma_s) D}{N} = \frac{\sigma_s \cdot B}{E_s} - \frac{\sigma_c \cdot B}{E_c}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_s} = \frac{\frac{B}{D} \frac{N}{E_s} - \frac{B}{D} \frac{N}{E_c}}{1 + \frac{B}{D} \frac{N}{E_c}} \quad \text{onde} \quad \sigma = \sigma_c - \sigma_s$$

$$\text{Se } K = \frac{N}{E_s} \Rightarrow \frac{\sigma}{\sigma_s} = \frac{K \left(1 - \frac{E_s}{E_c} \right)}{1 + \frac{B}{D} \frac{E_s}{E_c} K} \frac{B}{D} = C_A \frac{B}{D} \quad \text{TAYLOR (1945)}$$

(a)

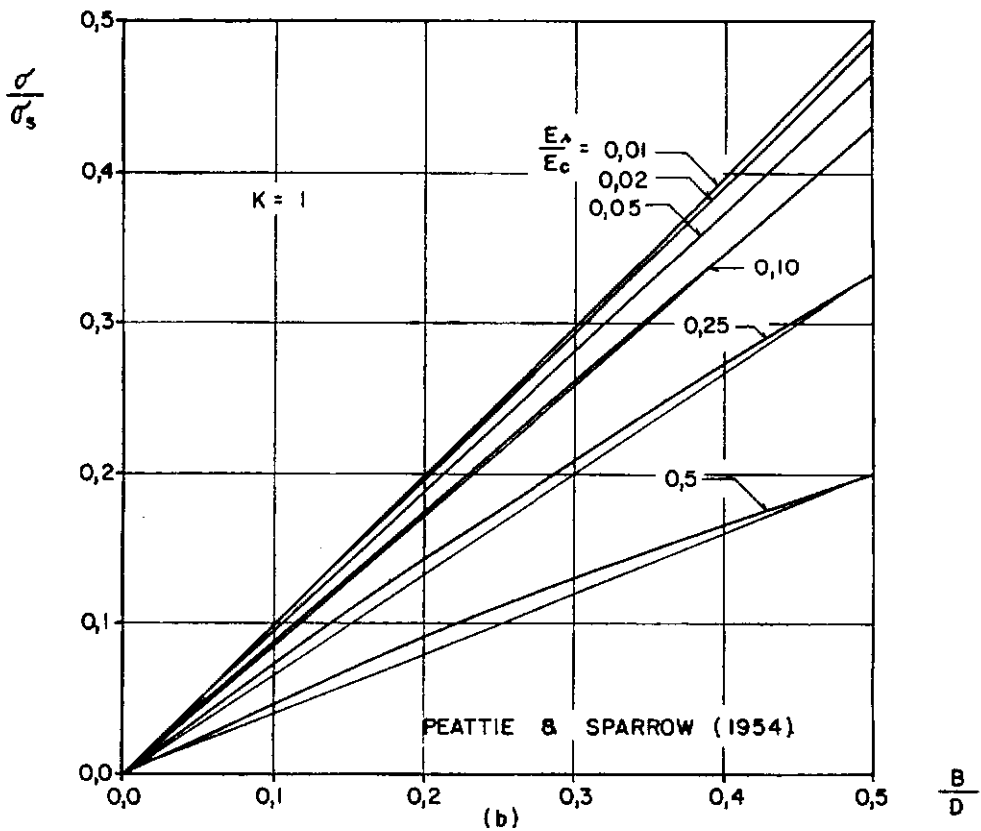


FIG. 5 - Estudo teórico de TAYLOR (1945):

δ_r) no solo, cujo comportamento é assimilado ao de uma placa circular sendo puncionada em um sólido elástico. A pressão (σ) sobre esta placa é igual à diferença entre a pressão sobre a célula e a tensão no solo no mesmo plano da célula ($\sigma = \sigma_c - \sigma_s$) devido a um acréscimo uniforme da pressão vertical no meio (fig. 5.a). Este conceito aplica-se a argila saturada e areia confinada, desde que o acréscimo de tensão seja menor que a tensão de confinamento e não induza acréscimos de tensão que se aproximem da tensão de ruptura (Hvorslev, 1976).

N é uma propriedade do solo, tal que a relação $\frac{N}{D}$ é considerada análoga ao coeficiente de reação do solo obtida em provas de carga (fig.5.a).

Considerando que tanto o valor de N como o de E_s aumentam quando a pressão aumenta, a relação $K = \frac{N}{E_s}$ pode ser considerada constante, pelo menos para variações limitadas de pressão.

Peattie & Sparrow (1954) introduziram o coeficiente C_A (fig.5.a), que chamam de "cell action factor", e observam que C_A tende a K quando (E_c/E_s) tende ao infinito, e é aproximadamente independente de (B/D) , desde que (B/D) e (E_s/E_c) sejam pequenos. Assim, C_A é um valor que depende somente de (E_c/E_s) e pode-se escrever $\frac{\sigma}{\sigma_s} = C_A \cdot \frac{B}{D}$.

Do gráfico $(\sigma/\sigma_s) \times (B/D)$ para diferentes valores de (E_c/E_s) e para $K = 1$ (fig.5.b) observa-se uma relação quase linear para valores de (B/D) inferiores a 0,5. Esta função se torna praticamente linear para valores de $\frac{E_c}{E_s}$ maiores do que 10.

Hvorslev (1976) concluiu que as equações estabelecidas por Taylor podem ser aplicadas a casos mais gerais de estados de tensão desde que se utilizem os valores do módulo do solo E_s correspondentes a estes estados. Para ampliar, ainda mais, o campo de aplicação destes estudos, Hvorslev (1976) estendeu esta análise para o caso de estado tridimensional de tensões. Os valores do módulo de deformação E_s e do coeficiente de Poisson devem ser determinados em ensaios triaxiais de solo em laboratório que representem as condições esperadas no campo (fig.6).

Carlson (1939) obteve a distribuição de tensões sobre a face da célula, analisando o comportamento de uma célula no interior de uma massa de concreto quando este sofre retração. Imaginou um plano indeformável, passando a meia distância das faces da célula e paralelo a estas faces. Empregando as equações de Boussinesq, calculou para o plano médio, os deslocamentos de anéis concêntricos submetidos a um carregamento uniformemente distribuído. Tensões de compressão e tração para manter o plano médio na posição inicial são superpostas. A somatória destas tensões em cada anel fornece a distribuição de pressões sobre a célula e no meio envolvente.

Utilizando esta mesma metodologia, Monfore (1950), determinou a distribuição de tensões na célula e no meio semi infinito (no caso, concreto), quando uma determinada tensão de compressão uniforme é aplicada na superfície do meio. A aplicação desta teoria às células em uso no Bureau of Reclamation, USA, levou a se concluir que (fig.7.a):

1. existe uma concentração de tensões no bor-

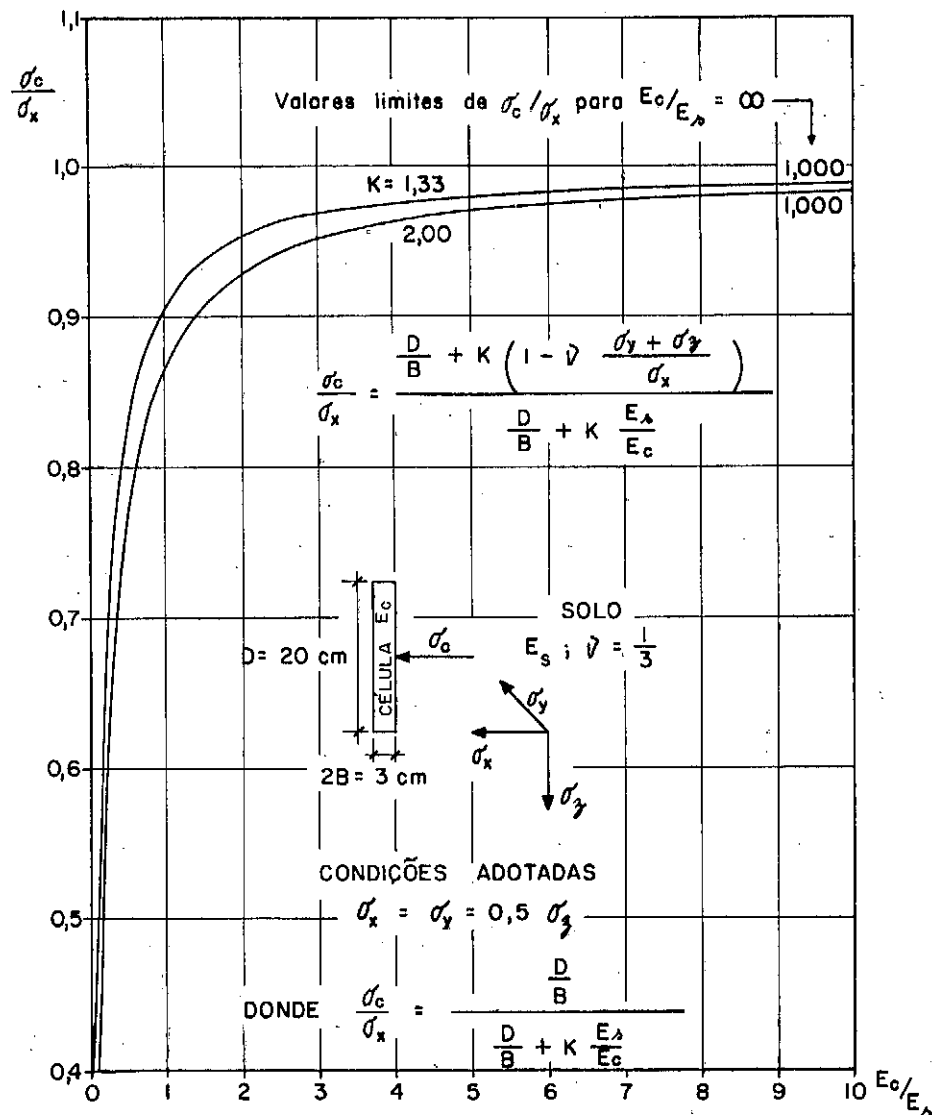
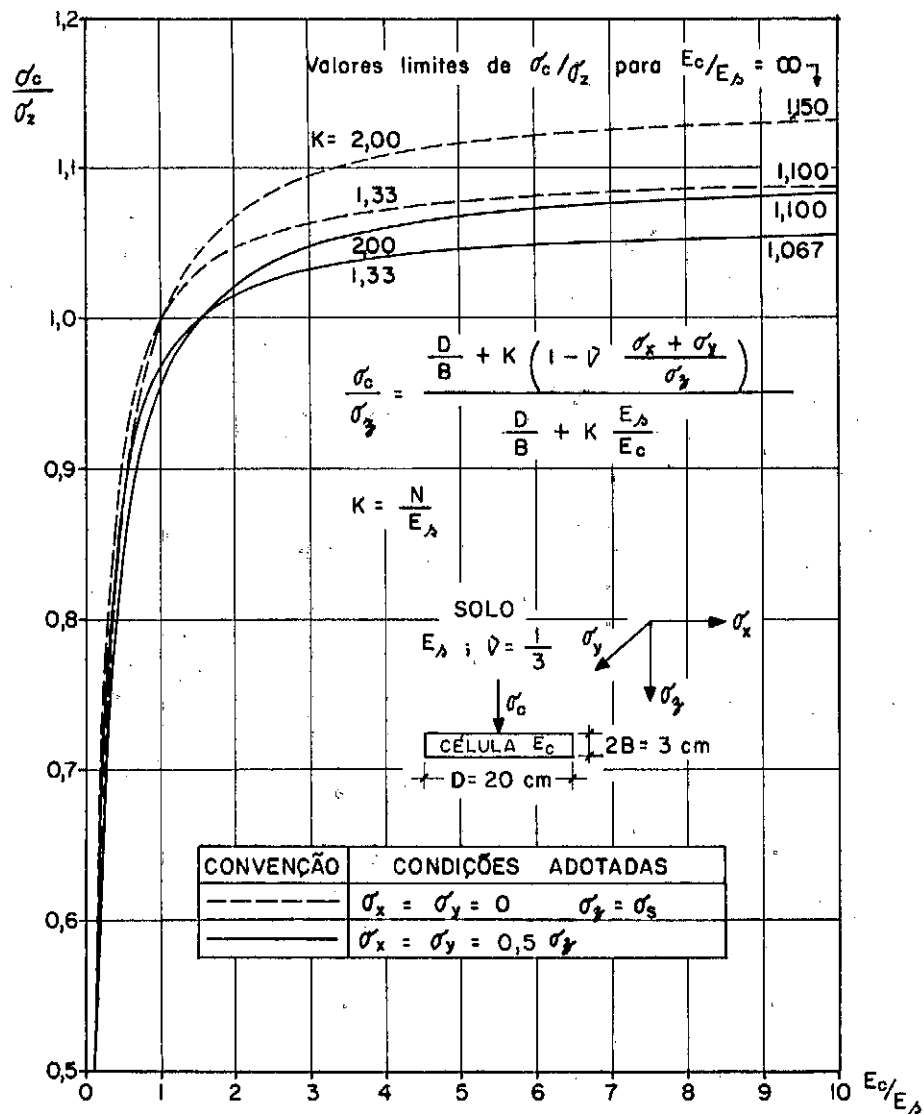


FIG. 6 - Relação σ_c/σ_s para células em solo. (HVORSLEV, 1974, - modificado).

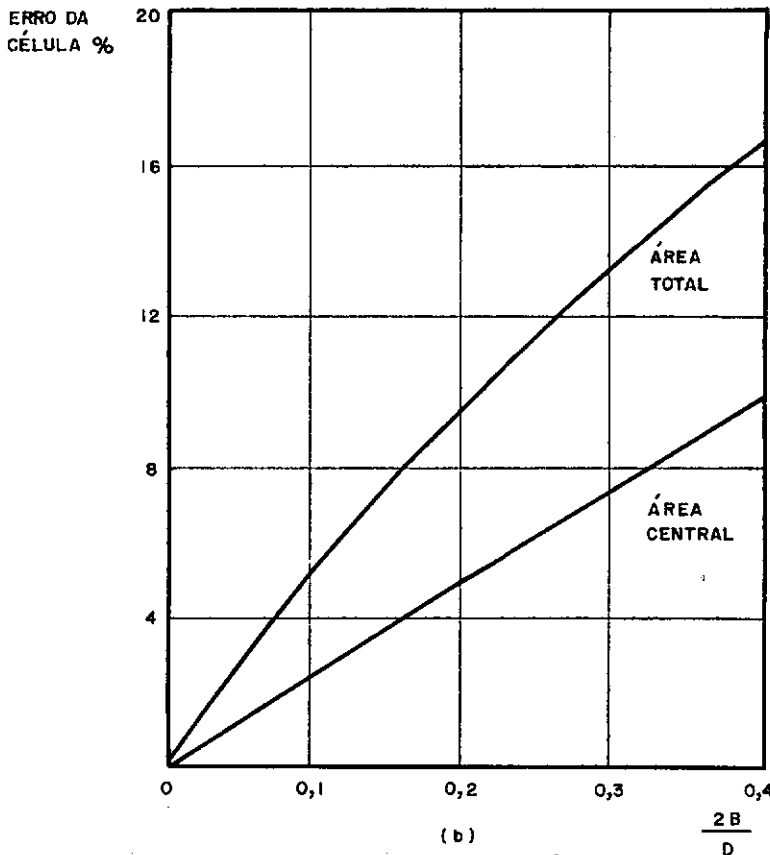
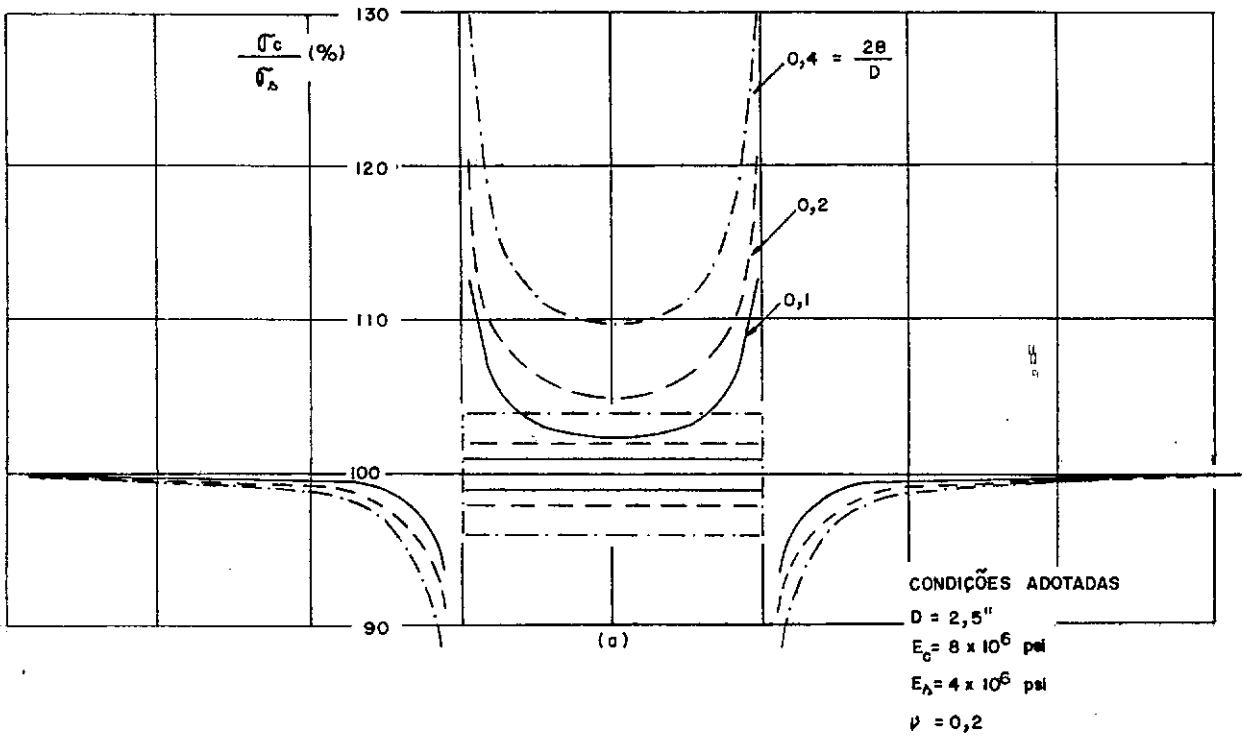


Fig. 7 — Efeito das dimensões da célula sobre a distribuição teórica de tensões (Monfore, 1950).

do periférico das células. A pressão sobre a região central da célula é 5% maior do que a pressão aplicada no meio, chegando a 20% no bordo da célula, para as relações $\frac{2B}{D} = 0,2$ e $\frac{E_c}{E_s} = 2$;

2. A influência da célula na distribuição de tensões do meio não se estende muito além de seu bordo.

Analizando a influência das propriedades da célula e do meio na distribuição de tensões, Monfore fez as seguintes observações:

- a) dimensões da célula: ao variar a espessura ($2B$) da célula e mantendo os outros valores constantes (diâmetro D ; módulos de elasticidade da célula E_c e do meio E_s ; coeficiente de Poisson ν e pressão Q aplicada na superfície), observou-se (fig.7.a) que quanto maior a espessura, maior o erro da célula (definido pela relação pressão medida σ_c /pressão no meio σ_s). Para uma célula sensível somente na área central, o erro da célula é uma função aproximadamente linear da relação espessura / diâmetro ($2B/D$), o que não se verifica, caso toda a face da célula seja sensível (fig.7.b).
- b) pressão Q aplicada sobre o meio: para va

lores práticos de Q , as influências sobre a distribuição de tensões e sobre o erro da célula, expressas em percentagem de Q , são pequenas.

- c) relação entre Módulos de Elasticidade (E_s/E_c): resolvendo o sistema de equações para diversos valores da relação (E_s/E_c), observou que o erro da célula será maior que 100% quando $E_c > E_s$, e menor quando $E_c < E_s$ (fig.8.a). Também observou que o erro será numericamente menor quando $E_c > E_s$. Assim, Monfore sugere que, ou deve-se usar $E_c = E_s$ ou, sendo isto impraticável, usar $E_c > E_s$. Novamente foi observado que o erro é maior quando a célula tem toda a sua superfície sensível. Este cálculo foi estendido por Peattie & Sparrow (1954) para valores de (E_c/E_s) normalmente encontrados em solo, conservando os valores de E_s , ν e B/D (fig. 8.a) constantes.
- d) coeficiente de Poisson (ν): a influência é muito pequena para variações de até $\pm 20\%$ no valor deste parâmetro do solo.
- e) variação da temperatura: concluiu que o erro da célula é diretamente proporcional às variações de temperatura e à diferença dos coeficientes de expansão térmica da célula

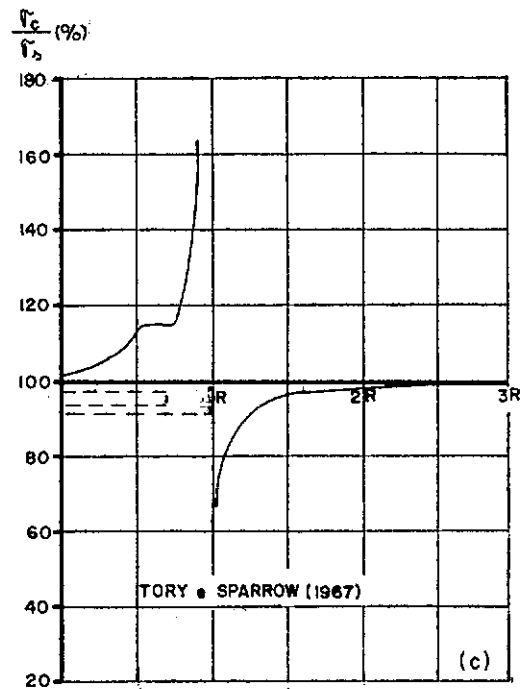
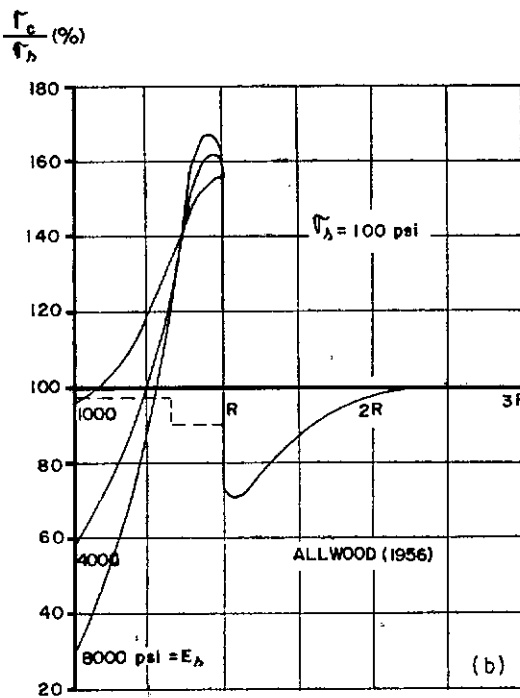
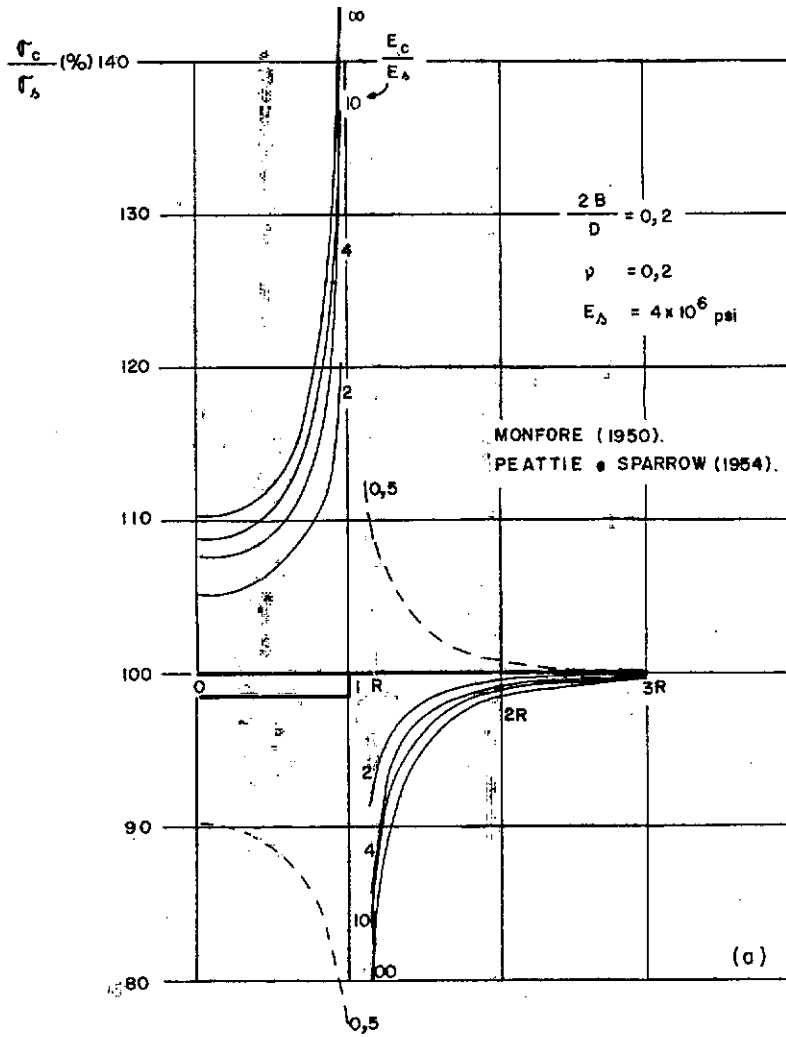


Fig. 8 — Distribuição teórica de tensões segundo diversas hipóteses.

e do meio.

Analisando as pesquisas de Taylor e Monfore, as seguintes conclusões são relatadas por Peattie & Sparrow (1954):

- a) para um dado conjunto de condições, os erros da célula são diretamente proporcionais à relação (B/D) (fig.5) e podem ser expressos na forma $\frac{\sigma}{\sigma_s} = C_A \left(\frac{B}{D}\right)$ onde C_A é o fator de influência da célula.
- b) C_A é função da relação entre os módulos E_c e E_s e seu valor aumenta com o aumento desta relação. Quando $(E_c/E_s) > 10$, C_A pode ser considerado aproximadamente constante, para um dado valor da relação entre a área sensível e a área total (a/A) (fig.9.a).
- c) para um dado valor da relação entre módulos, C_A é função da relação da área sensível para a área total da face da célula. Isto é causado pela distribuição não uniforme da pressão sobre a face da célula (fig.10).
- d) C_A depende do coeficiente de Poisson do material onde a célula está imersa em termos de $(1 - \nu^2)$, portanto um valor para ν entre 0,3 e 0,4 acarreta pequenas variações em C_A .

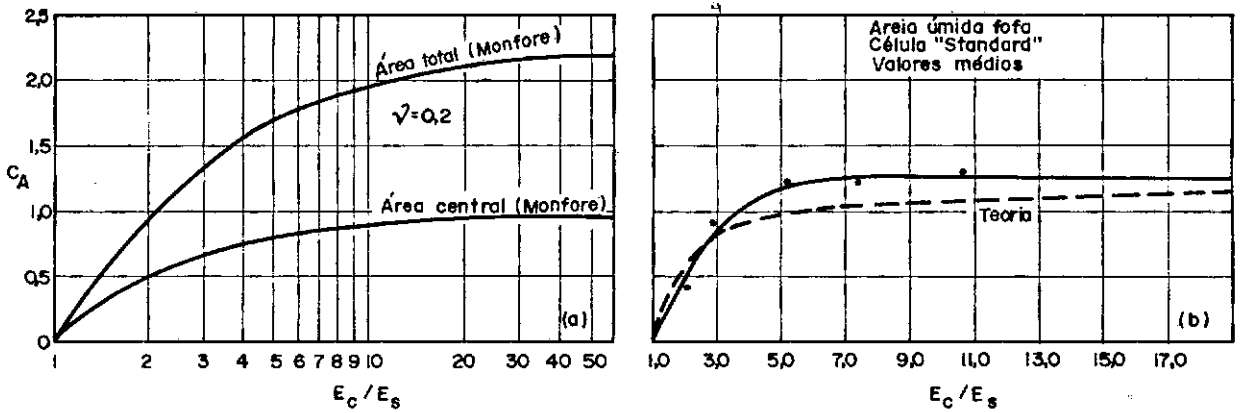


FIG.9 — Influência da variação dos módulos de elasticidade em C_A (PEATTIE & SPARROW, 1954).

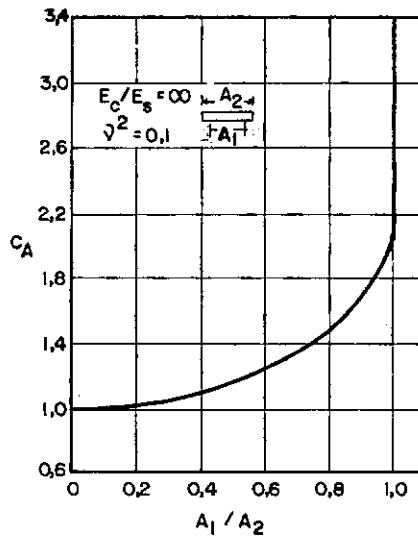


FIG. 10 — Influência da variação da área sensível de célula rígida em C_A (PEATTIE & SPARROW, 1954).

- e) desde que as análises consideraram um material elástico, homogêneo e isotrópico, e capaz de desenvolver tensões infinitas na periferia, os resultados independem do valor das tensões atuantes no meio e do seu tempo de aplicação.

As análises teóricas até então consideravam a célula como um corpo rígido, elástico, cuja face plana deforma-se igualmente em toda a sua superfície. Allwood (citado em Dunn & Billam, 1966 e Buck, 1961), em 1956, desenvolveu uma análise teórica semelhante à de Carlson e a de Monfore, mas considerando, também, o efeito da deflexão do diafragma de uma célula tipo diafragma livre com anel rígido envolvente. Determinou a distribuição de tensões sobre a face da célula (fig.8.b), decorrentes de deformações unidimensionais do meio para diferentes valores do módulo de elasticidade do meio envolvente, considerado como sólido elástico. A partir daí, calculou as deflexões do diafragma, obtendo os valores do fator de influência da célula. Das equações deduzidas por Allwood, é observado por Dunn & Billam (1966) que a distribuição de pressões depende dos valores das relações: $(\frac{B}{R})$ e $(\frac{E_s}{E_c} \frac{r^3}{t^3})$, sendo esta segunda relação interpretada como a relação entre a rigidez do solo e do diafragma. A variação de C_A com a relação de rigidez, para determinados valores de (B/R) e ν (fig.11) mostra que o fator de influência da célula cresce quando o diafragma é mais rígido ou quando o solo é mais compressível. As pesquisas práticas de Allwood com célula tipo diafragma livre (Redshaw, 1954) em areia, com diferentes densidades relativas, mostrou valores de C_A cerca de 18% menores que os teóricos para as mesmas condições (fig.11). Buck (1961) atribui

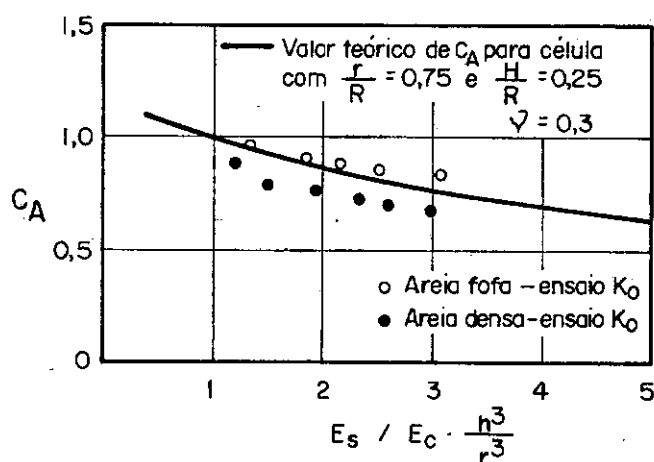


FIG.11 — Influência da flexibilidade do diafragma no valor de C_A (valores teóricos e medidos) (ALLWOOD, 1956).

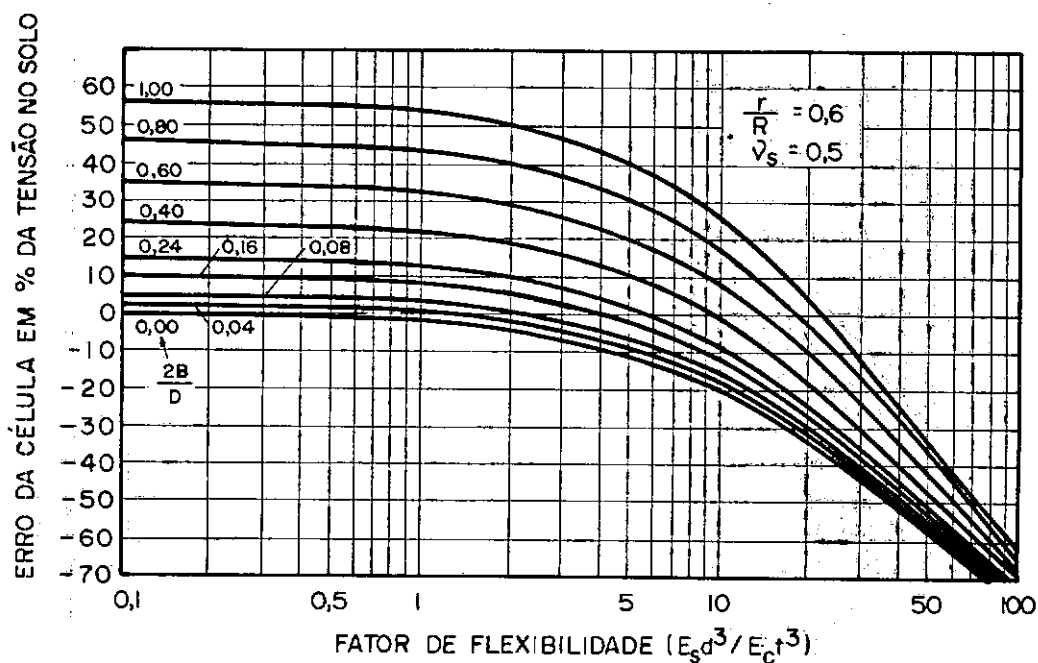


FIG.12 — Influência do fator de flexibilidade nas tensões medidas por células tipo diafragma livre (TORY & SPARROW, 1967).

esta diferença às condições de ensaio não coincidentes com as hipóteses adotadas, ou seja, na análise teórica é considerada compressão edométrica (condição K_0), enquanto que os ensaios foram feitos com as amostras cilíndricas sob pressão confinante lateral, o que induz deformações tridimensionais.

Uma análise semelhante à de Allwood e adotando o princípio dos anéis concêntricos utilizado por Carlson, foi feita por Tory & Sparrow (1967). Analisaram a distribuição de tensões sobre uma célula com anel rígido envolvendo o diafragma flexível, para o caso de compressão unidimensional do solo (fig.8.c). Chamaram de fator de flexibilidade (FF) à relação entre o módulo de elasticidade do solo e uma medida da rigidez do diafragma da célula (definida como a relação adimensional da deflexão resultante δ/d). Assim, pode-se definir $FF = \left(\frac{E_s}{E_c} \frac{d^3}{t^3} \right)$ a partir das equações para a deflexão do diafragma carregado. É obtido um gráfico (fig.12) entre FF e a relação entre a tensão registrada pela célula e a que existiria naquele ponto na ausência da célula, em percentagem desta, para valores de $(2B/D)$ entre 0 e 1; $\left(\frac{d}{D} \right) = 0,6$ e $\nu_s = 0,5$. Observa-se que para determinada relação $(2B/D)$, o erro da célula será constante quando FF for pequeno (até ~ 1). Ao se aumentar FF, o erro torna-se dependente deste, e o módulo do solo (E_s) deve ser conhecido acuradamente. Sendo E_s variável com o nível de tensões aplicado, aconselha-se adotar $FF < 1$.

A relação entre a pressão atuando em uma inclusão elipsoidal axissimétrica e o estado de tensões no meio envolvente, considerando o estado de tensão tridimensional foi deduzida por Askegaard (1963). Suas hipóteses consideram que o meio infinito e a inclusão são feitos de material isotrópico e homogêneo

que obedecem a lei de Hooke, que os deslocamentos são pequenos e que não há deslocamento relativo entre o meio e a inclusão. Empregando as equações de Eshelby chega às equações finais e calcula valores para pontos particulares.

No caso de uma inclusão infinitamente rígida e tensão uniaxial no meio, o estudo mostra que para $\alpha = (\frac{2B}{D}) = 0$, a tensão na inclusão será 100% da tensão no meio, quando $\nu = 0,0$ ou $\nu = 0,5$, e será 91% quando $\nu = 0,3$ (fig.13.a). Quanto maior α , para um mesmo ν , maior será a relação entre a tensão na inclusão e a tensão no meio, chegando a cerca de 1,5 quando $\alpha = 0,5$, para $\nu = 0,0$ ou $0,5$.

Considerando as duas seguintes condições de tensões no meio envolvente:

I - Condição de compressão simples:

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \quad \text{e} \quad \sigma_z = q$$

II - Condição de compressão hidrostática:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = q$$

observa-se que a relação entre as tensões na condição I e na condição II é dependente de ν e de α , decrescendo quando ν e α crescem (fig.13.b). Para valores altos de ν e α esta relação torna-se menor que 1, ou seja, a tensão axial na inclusão diminui com o aumento das tensões laterais.

No caso de o meio elástico conter um vazio elipsoidal axis simétrico cheio de um fluido, Askeggard calculou a relação entre os valores da pressão no fluido quando sob estado de compressão simples (condição I) e

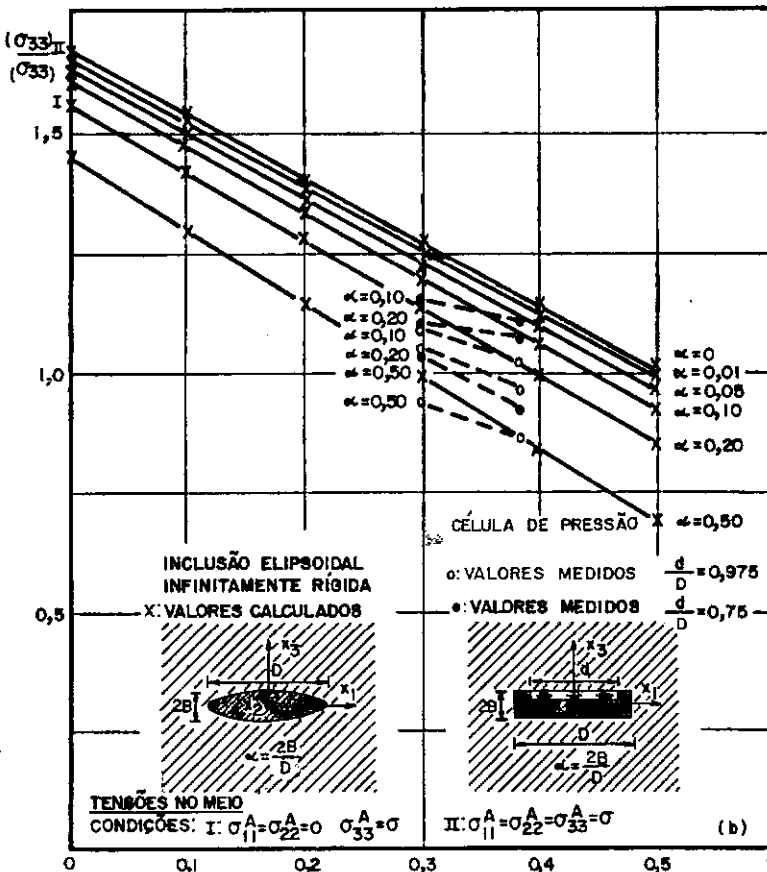
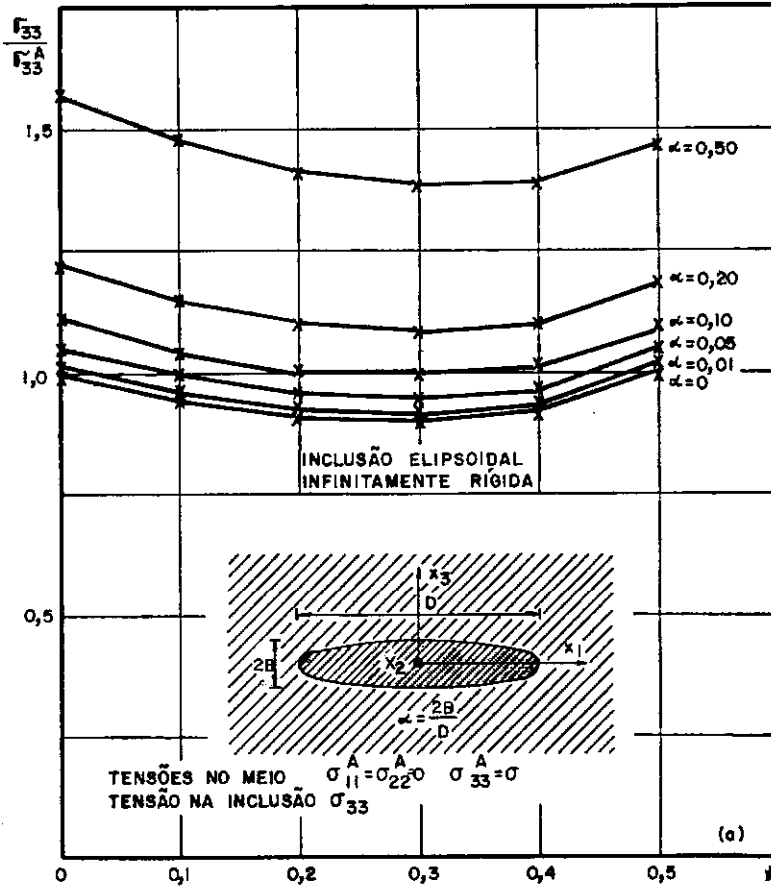


Fig. 13 — Estudo teórico de Askegaard (1963) do comportamento de células rígidas.

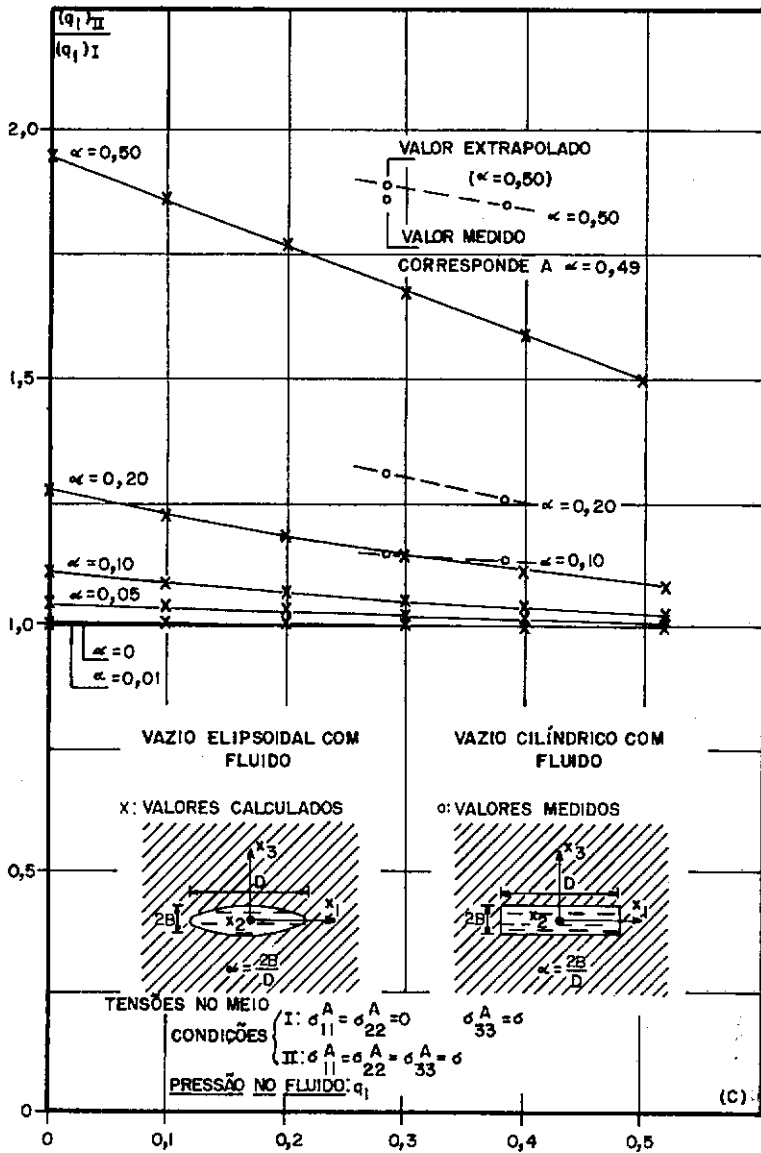


fig. 13 (continuação)

quando sob estado de compressão hidrostática (condição II). Concluiu que a pressão no fluido depende da variação de tensões no meio, da compressibilidade relativa do meio e do fluido, da relação altura/diâmetro da inclusão e do coeficiente de Poisson do meio. O gráfico da figura 13.c mostra que a sensibilidade transversal da inclusão com fluido diminui para valores decrescentes de α e é muito menor que a da inclusão rígida (figura 13.b). Observa-se, também, que a pressão no fluido aproxima-se da pressão no meio quando α tende a zero.

Bates (1969) introduziu o método dos elementos finitos na análise do comportamento de células em solo. Os resultados iniciais confirmaram os estudos de Askegaard (1963) quanto à influência da variação das tensões radiais sobre as tensões axiais e nas tensões indicadas pelas células. Com o fim de minimizar este efeito, Bates projetou e estudou por elementos finitos uma célula com o anel envolvente em forma de cunha. Dos dados obtidos foram traçadas as isôbaras para dois casos: acréscimos da tensão axial (fig.14.a) e acréscimo da tensão radial (fig.14.b). A relação $(\sigma_c - \sigma_s)/\sigma_s$, é mostrada na figura 14.c em função do módulo do material envolvente. Estes resultados mostram a influência da variação da tensão radial no solo sobre o valor registrado pela célula.

Estudos por elementos finitos do comportamento de uma célula tipo fluido confinado foram feitos por Krizek & outros (1974). Com o objetivo de comparar os resultados teóricos com os de laboratório, procurou-se reproduzir as condições de ensaio. Admitiu-se que a célula não se desloca em relação ao solo. O atrito na superfície lateral da câmara de ensaio é considerado em duas condições limites: atrito nulo e atrito máximo.

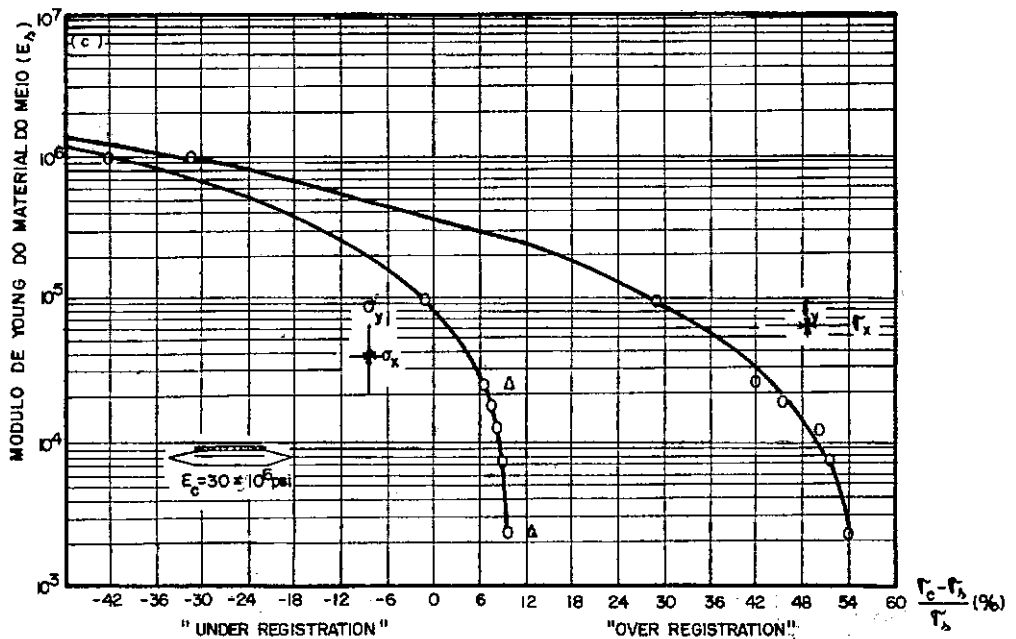
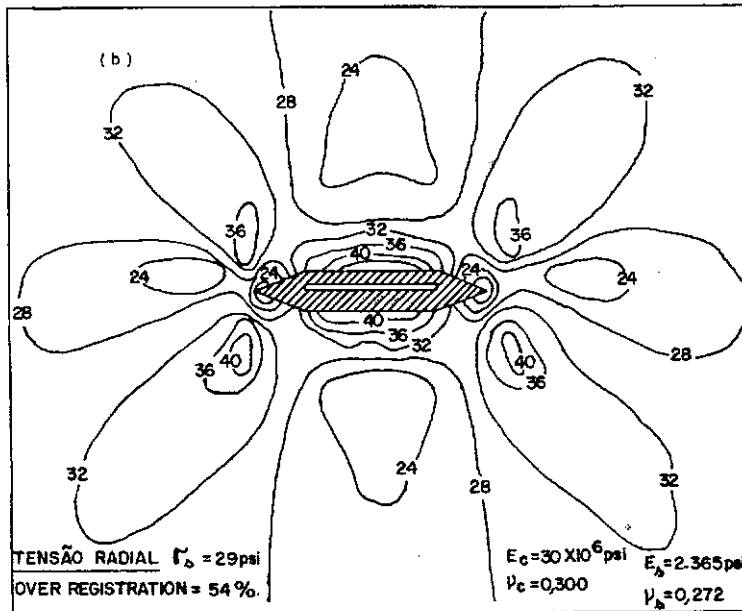
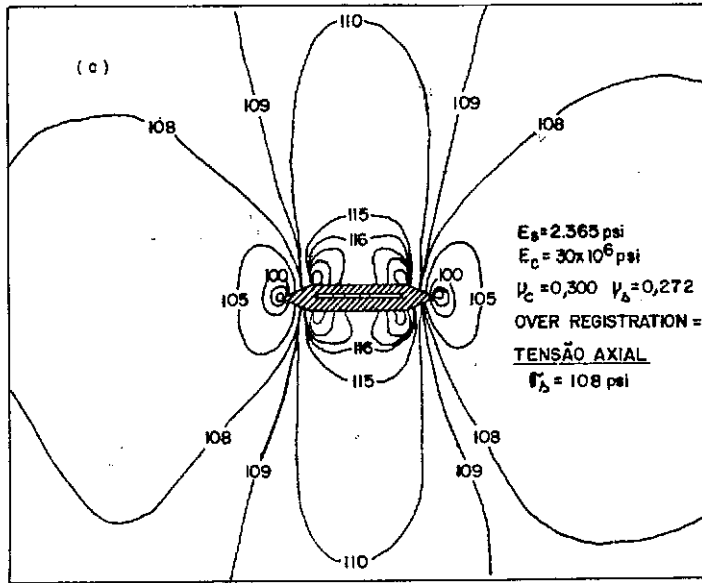


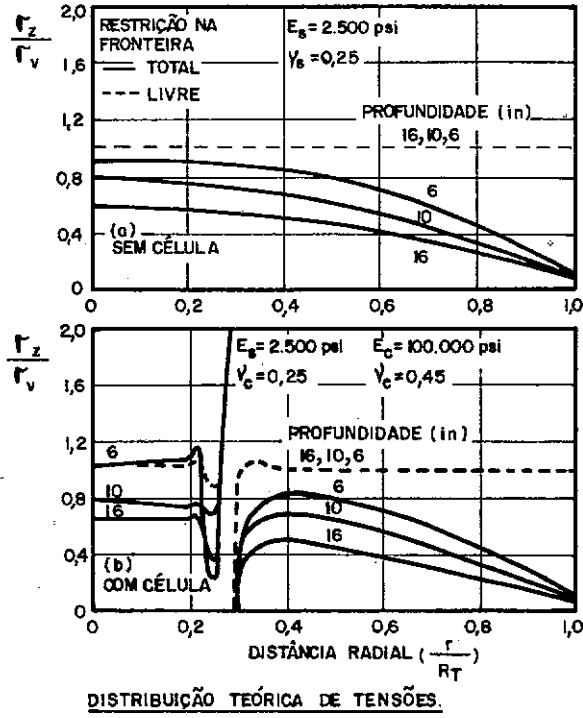
Fig.14 — Distribuição de tensões no solo e efeito da célula de pressão total (BATES, 1969).

Os estudos das variações de tensões sobre a célula mostram que, durante a aplicação de carga superficial uniformemente distribuída, as tensões verticais são, aproximadamente, uniformes sobre a célula em solo (fig.15.a), independentemente dos valores das variáveis do sistema, da profundidade de instalação ou das condições na interface solo-cilindro. Estes parâmetros afetam o valor geral das tensões em cada caso e são responsáveis pelas diferenças de medições em relação ao valor real. A presença da célula no solo não altera significativamente a distribuição de tensões na massa de solo, porque as células consideradas são finas e rígidas. Grandes variações de tensões surgem em pequena região na descontinuidade entre a célula e o solo, onde ocorrem altos gradientes de tensão. Entretanto, a maior parte desta variação é suportada pelo anel rígido externo, não afetando muito a região central da célula, que é a região sensível.

Os pesquisadores observaram que o caso de restrição ao deslocamento vertical na fronteira provoca uma redução de 26% na tensão normal média, e que a ausência desta restrição provoca um aumento de 2% na tensão normal, em relação à tensão aplicada.

A profundidade de instalação da célula para calibração afeta bastante as tensões verticais atuando sobre a célula, quando existe restrição na interface solo-cilindro (células mais profundas tendem a "under read", e células mais rasas a "over read", para o caso de pequena restrição na fronteira, como foi observado nos ensaios de calibração em areia densa). Se esta restrição não existe, a tensão sobre a célula independe da profundidade de instalação.

(a)



(b)

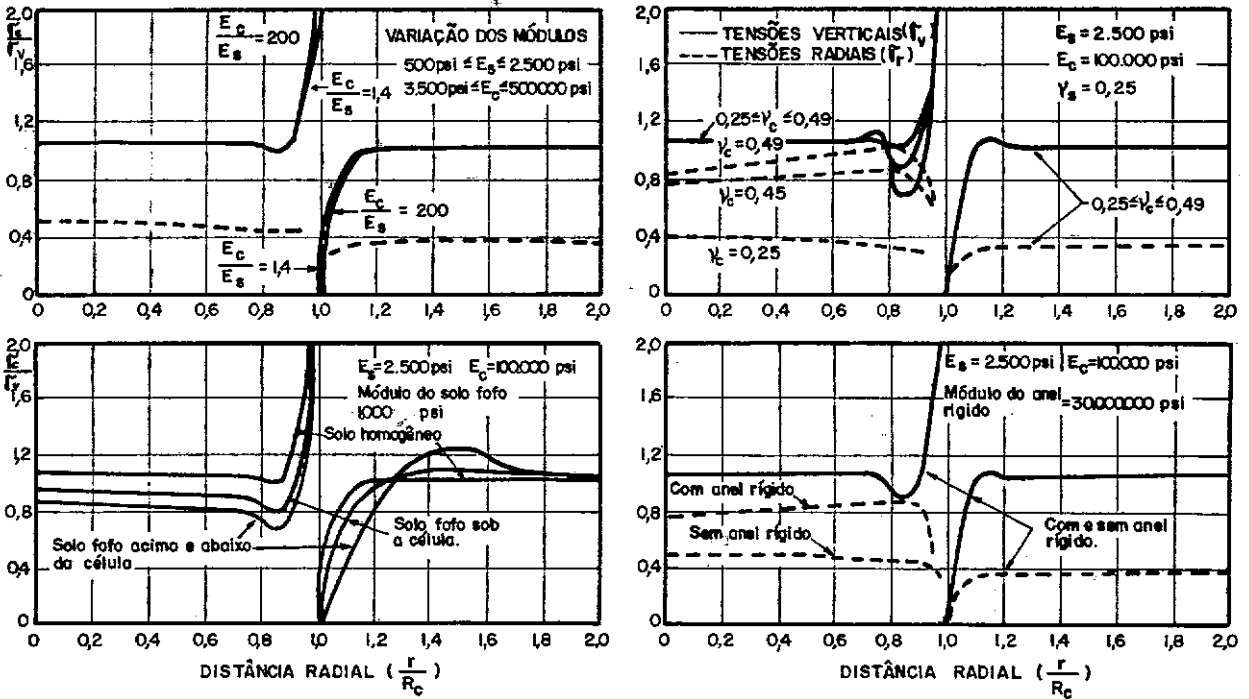


Fig. 15 — Distribuição de tensões e influência sobre o valor medido pela célula (KRIZEK e outros, 1974).

Considerando o caso de não haver restrição ao deslocamento vertical na interface solo-fronteira, Krizek e outros observaram que (fig.15.b):

- a) para a célula estudada, a tensão normal não é sensível a variações no módulo do solo e da célula, e a variações no coeficiente de Poisson da célula. Somente as tensões radiais são alteradas por variação no coeficiente de Poisson da célula (esta dependência diminui com a introdução de anel rígido).
- b) quando o solo acima e abaixo da célula é mais fofo do que nas outras regiões, as tensões sobre a célula são reduzidas. Este efeito diminui caso o solo fofo esteja só de um lado da célula.
- c) a presença de anel rígido não altera substancialmente as tensões verticais, mas aumenta as tensões radiais. Este fato faz com que o estado de tensões na célula se aproxime do hidrostático.

Foram feitos, ainda, estudos de célula instalada na vertical para medir pressões horizontais, com carga aplicada na vertical. Considerou-se que o valor medido pela célula é a tensão radial na massa de solo sem a presença da célula e atrito

nulo na interface solo-fronteira. Este procedimento foi adotado, pois, nestas condições, a presença da célula na massa de solo não altera a distribuição de tensões, conforme os estudos anteriores, e porque a inclusão de célula na vertical não preenche a condição de simetria na qual o modelo matemático se baseia. Comparação com o ensaio em areia densa mostrou muito boa concordância quando foi adotado o coeficiente de Poisson para o solo igual a 0,32, valor este determinado em ensaio triaxial para a areia densa empregada.

3.1.2 - Células em Fronteira Solo-Estrutura

Adotando as mesmas hipóteses de Taylor (1945) para o estudo de células em solo, Hvorslev (1976) desenvolveu um estudo para o caso de célula fixada a uma superfície horizontal de um material rígido e com um ressalto de altura H_s acima dessa superfície, para uma variação triaxial de tensões (fig.16).

Nas figuras 16(a) e 16(b) vê-se a representação gráfica das equações para uma célula com dimensões fixadas e diferentes estados de tensão. Observa-se que uma célula, cuja face de medida esteja no mesmo plano da superfície rígida horizontal ($H_s = 0$), sempre registrará tensões menores que as atuantes no meio, e a tensão na célula será igual à do solo quando $(E_s/E_c) = 0$.

Na condição de tensão no solo, mostrada na figura 16.b, ($\sigma_x = \sigma_y = 0,5\sigma_z$ e $\nu = 1/3$), a relação (σ_c/σ_s) independe de H_s quando a célula está colocada em uma superfície vertical,

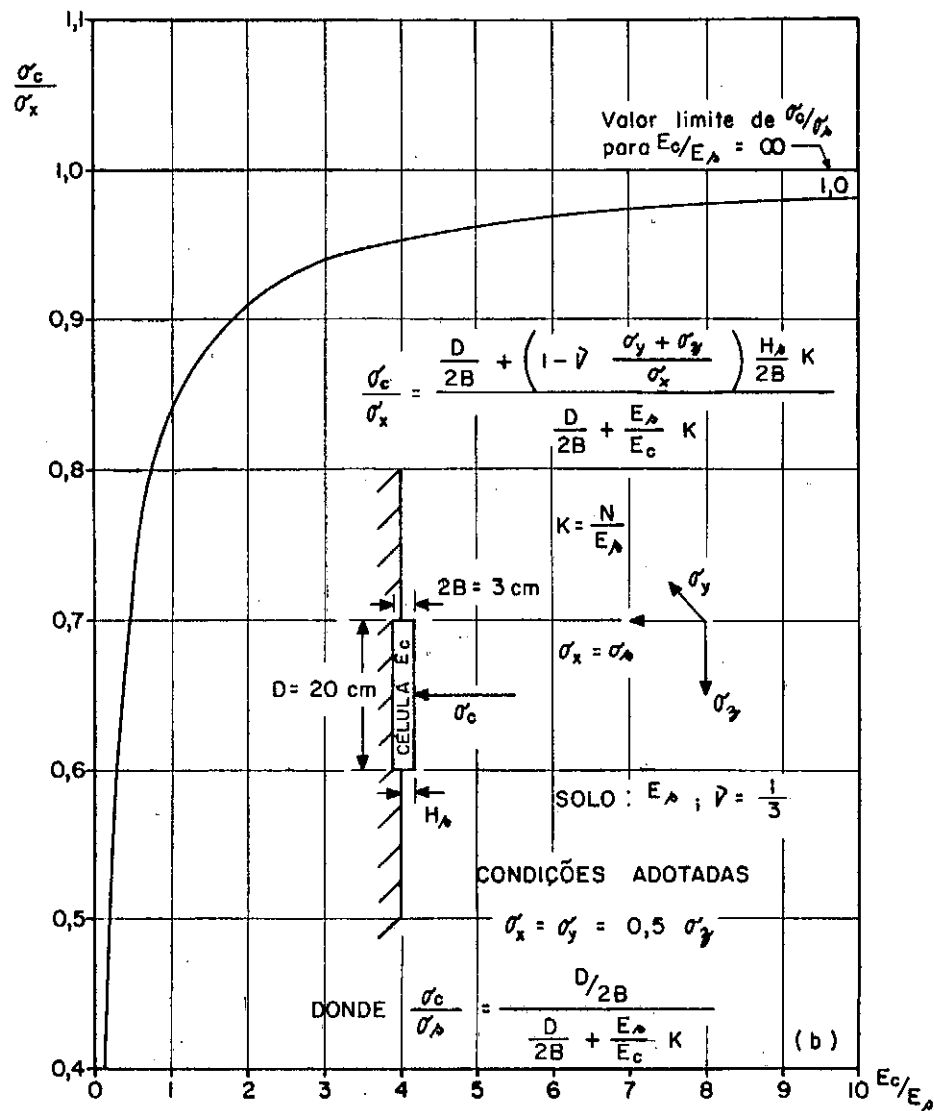
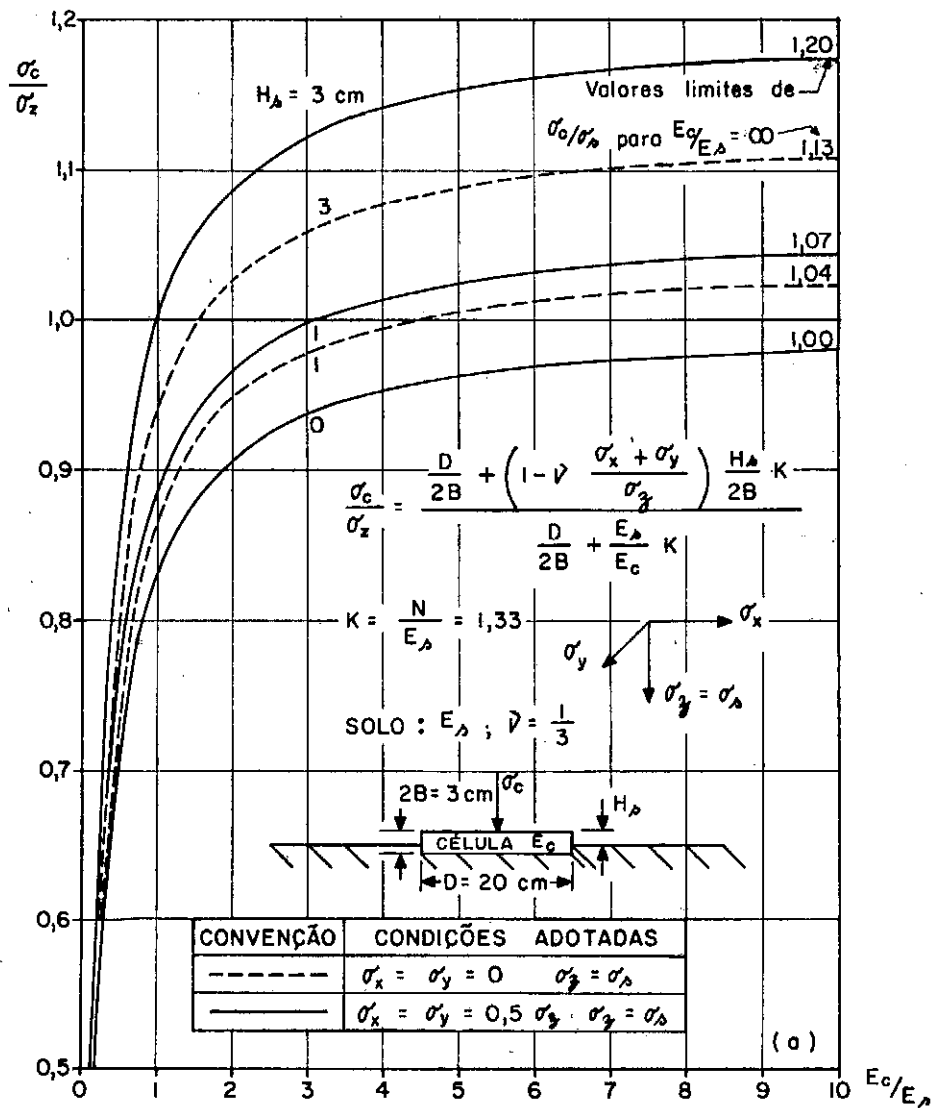


FIG. 16 — Relação σ_c/σ_s para células em fronteira rígida (HVORSLEV, 1974 - modificado.)

medindo tensões horizontais. A função (σ_c/σ_s) em relação a (E_c/E_s) é sempre menor do que a unidade, e tende assintoticamente ao valor unitário para valores crescentes de (E_c/E_s) .

Empregando o método dos elementos finitos para o estudo axissimétrico do comportamento de uma célula tipo pistão, instalada em uma fronteira horizontal rígida e indeslocável, com a face sensível no mesmo plano da fronteira, Carder (1976) aplicou tensões verticais e radiais iguais nas fronteiras superior e lateral do meio elástico estudado. A distribuição de tensões obtida para um determinado solo é mostrada na figura 17. Foi observado que para cada tipo de solo, a relação entre a tensão medida e a tensão aplicada é função linear do deslocamento da face da célula, que define a sua rigidez.

Como o solo não se comporta como um meio elástico ideal, Kallstenius & Bergau (1956) observam que a variação média de tensões provocada pelo deslocamento da face da célula será inferior à estimada por métodos elásticos. Por outro lado, a relação entre deslocamento da superfície da célula e a variação de tensões poderá ser não-linear.

O estudo por elementos finitos feito por Carder (1976) não considerou atrito entre a fronteira e o meio elástico que representa o solo, não havendo, portanto, restrição a deslocamentos horizontais na superfície da célula. Nestas condições, observou-se que a célula é sensível somente à tensão vertical aplicada, sendo independente das tensões radiais. No entanto, foi salientado que, caso seja considerado o atrito entre o meio e a

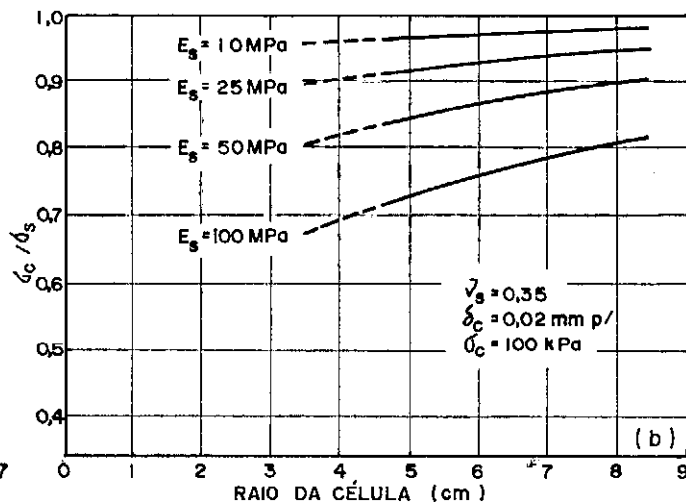
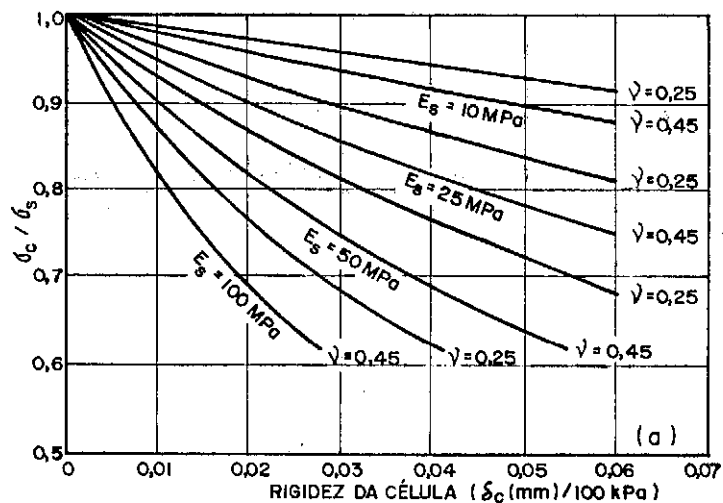


FIG. 18 — Comportamento teórico de células em diferentes condições de solo e com diferentes raios (CARDER, 1976).

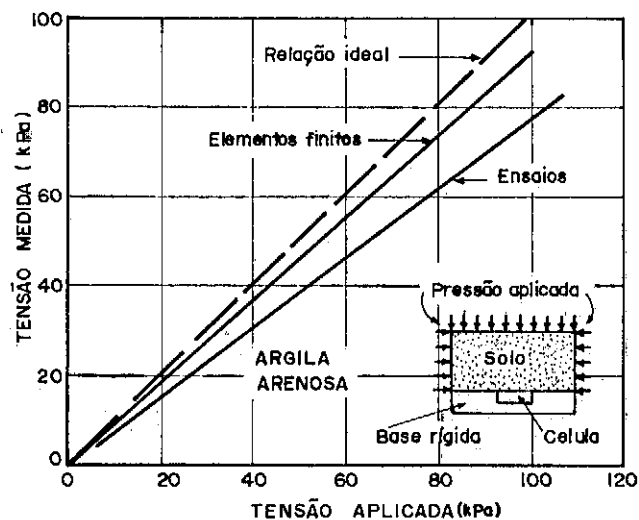
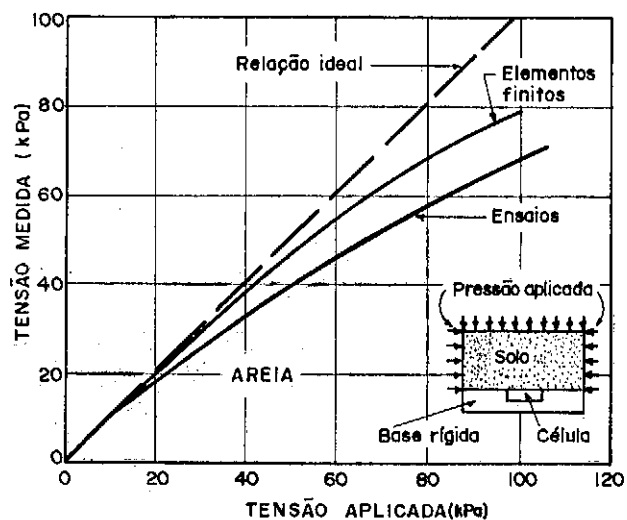
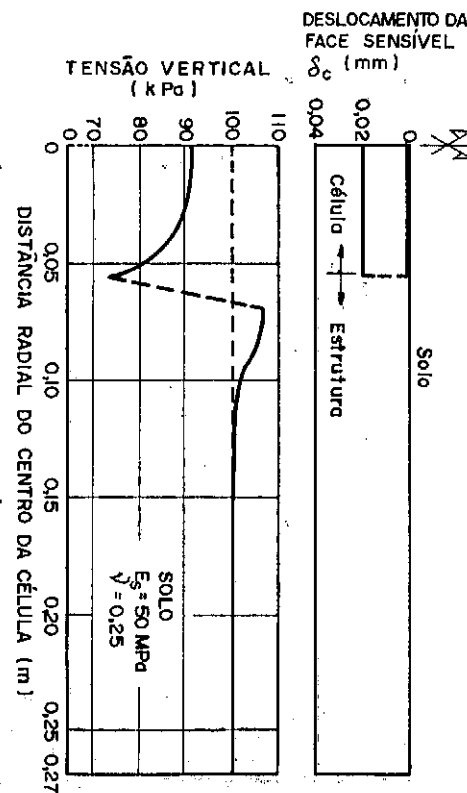


FIG. 19 — Verificação em laboratório do comportamento de células tipo pistão em fronteira rígida com diferentes tipos de solo (CARDER, 1976).

FIG. 17 — Distribuição teórica de tensões sobre célula tipo pistão em fronteira rígida (CARDER, 1976).



fronteira, a influência da relação entre tensões radiais e verticais é importante. A partir da determinação da rigidez da célula, ou seja, o deslocamento da face da célula sob uma determinada pressão média, foi possível traçar um gráfico que permite determinar a relação entre a pressão medida pela célula e a pressão aplicada em função das propriedades do solo. Este gráfico (fig.18.a) foi traçado para uma célula com 57mm de diâmetro. A influência do raio da célula sobre o fator de célula é mostrado na figura 18.b.

A comparação dos resultados deste estudo com a calibração de célula tipo pistão rígido feito por Carder & Krawczyk (1975) nas condições adotadas neste estudo, levou Carder (1976) a concluir que devido às variações do módulo do meio com a variação de tensões aplicadas (como é o caso de areias), a relação entre a tensão aplicada e a medida é não linear, e que a pressão medida é inferior à aplicada. Quando este módulo é invariável com o nível de tensões aplicado, como foi observado para a areia argilosa empregada nos ensaios, a relação é linear. Em ambos os casos, o estudo por elementos finitos indicou um erro menor que o medido (fig.19). Carder (1976) atribui esta diferença à dificuldade em estimar as verdadeiras propriedades do solo, à hipótese de não haver atrito entre o solo e a fronteira e às condições de ensaio, já que o valor medido pela célula depende do procedimento de compactação, o que poderia ter desenvolvido um arqueamento no solo sobre a face da célula.

Terzaghi (1943) desenvolveu um estudo teórico do efeito de arqueamento em solos. Por esta teoria, é estimada a ten

são vertical atuante sobre um alçapão horizontal retangular de grande comprimento quando se desloca em relação a uma camada de solo limitada pelas paredes indeslocáveis ao lado do alçapão. O arqueamento, ativo ou passivo, acima desse alçapão não afeta o solo além de uma distância crítica. O peso do solo sobrejacente a esta camada atua como simples sobrecarga. Os estudos de Terzaghi foram feitos para camadas de solo de espessura inferior a esta espessura crítica acima do alçapão. Esta profundidade é estimada por Terzaghi como sendo igual a 2 ou 3 vezes a largura do alçapão, para deslocamento "para fora" do solo (situação ativa).

Experiências com alçapão circular foram feitas por McNulty (1965), para dois diâmetros 7,6cm (3") e 15,2cm (6"). Foi usada areia média a diferentes densidades. Os ensaios foram feitos com diversas espessuras da camada de areia, sendo a espessura máxima igual a duas vezes o diâmetro do alçapão. As curvas obtidas para os casos ativo e passivo são bastante diferentes, mas apresentam uma tangente comum para deslocamento nulo do alçapão (fig.20). Observa-se que um deslocamento de 0,0002 vezes o diâmetro do alçapão pode alterar em até 50% a pressão sobre o alçapão.

Esta análise de McNulty (1965) aplica-se muito bem para o caso de células instaladas em fronteiras rígidas, com sua face no mesmo plano da superfície ($H_s = 0$).

Askegaard (1961) estudou, teoricamente, o comportamento de vários tipos de células instaladas em fronteiras rígidas. O estudo considerou que o meio é semi-infinito (limitado na

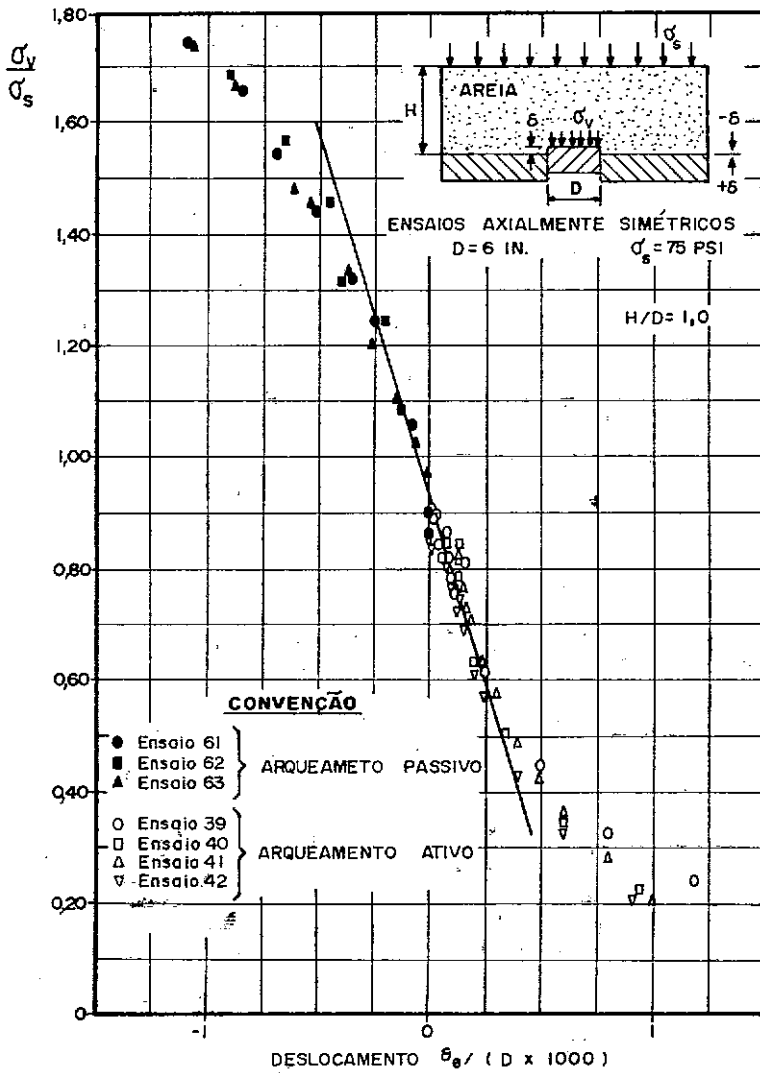


FIG. 20 - Variação da pressão de areia sobre alçapão circular devido a pequenos deslocamentos (Mc NULTY, 1965).

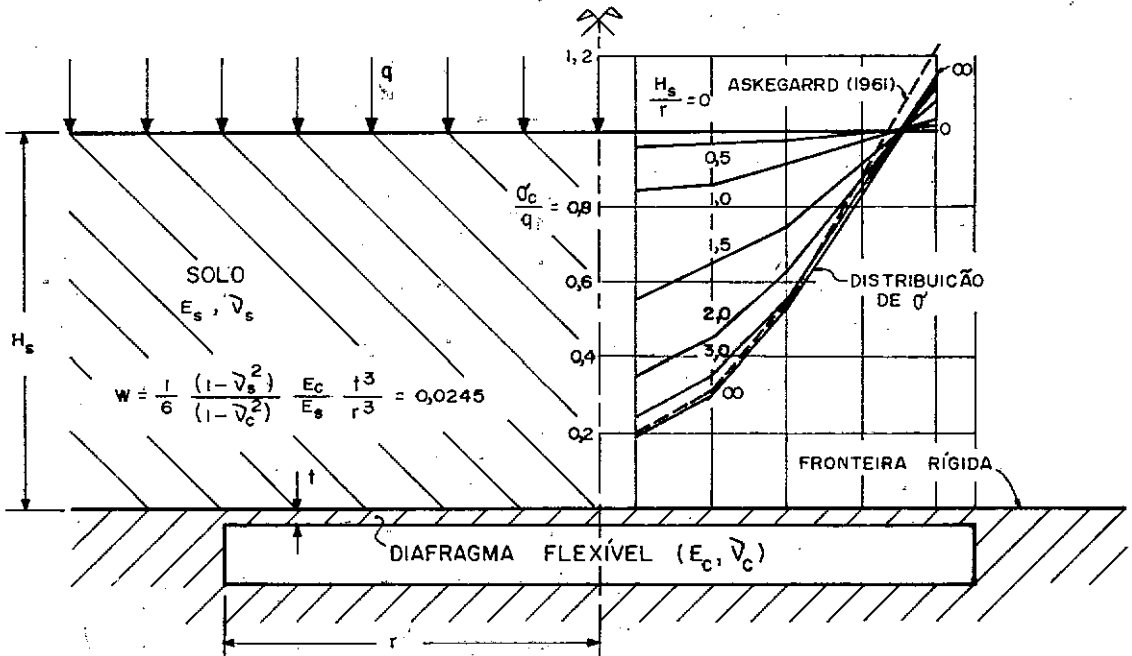


FIG. 21 - Distribuição teórica de tensões sobre diáfagma flexível em fronteira rígida (STAIN, 1971).

fronteira rígida), homogêneo, isotrópico, linear elástico e que não há atrito entre a fronteira e a célula. Estas hipóteses aplicam-se, razoavelmente bem, quando o solo em contato com a célula é uma argila saturada e as pressões atuantes são baixas. No entanto, em areias, estas hipóteses podem levar a erros sensíveis (Morgan & Moore, 1968). As equações deduzidas por Askegaard em função do deslocamento central da face da célula são baseadas nas equações de Boussinesq e de Walén (1942).

Para pistão rígido, a diferença entre a pressão aplicada e a registrada pela célula (σ_e), em termos de carga ($P_e = \pi R^2 \sigma_e$) e em função do deslocamento do pistão (δ), é dada por:

$$P_e = (3,05) \delta \frac{D \cdot E_s}{(1 - \nu_s^2)}$$

Esta relação aplica-se a pequenos deslocamentos da face da célula. A medida que o deslocamento δ aumenta, a área de contato entre o pistão e o meio elástico decresce, e a relação entre P_e e δ não é mais linear. Kallstenius & Bergau (1956) observaram que a variação do decréscimo na tensão média quando o pistão se desloca para o interior da fronteira rígida é maior do que a variação do correspondente aumento de tensão quando o movimento é oposto.

Como o valor medido por esta célula é proporcional à carga sobre o pistão, pode-se fazer a calibração com pesos para se obter a correspondente calibração em fluido. O erro de medida será calculado separadamente pela equação acima. (Morgan

& Moore, 1968).

Quando a célula é do tipo diafragma livre, obtêm-se duas expressões. Uma em função da deflexão máxima ($\delta_{\text{máx}}$) do centro do diafragma:

$$P_e = (0,43) \delta_{\text{máx}} \frac{E_s \cdot D}{(1 - \nu_s^2)}$$

e a outra em função da deflexão média (δ_{med}) do diafragma:

$$P_e = (1,12) \delta_{\text{med}} \frac{E_s \cdot D}{(1 - \nu_s^2)}$$

O erro acusado pela célula tipo diafragma livre é menor que o acusado por uma célula tipo pistão, para uma dada deflexão central. No entanto, o valor registrado pela célula tipo diafragma livre depende do valor e da distribuição da carga aplicada. Se a distribuição da carga apresenta valores menores na região central da face da célula, será indicado um valor menor do que se a mesma carga fosse uniformemente distribuída. Caso contrário, se houver maior concentração no centro do diafragma, o valor indicado será maior, de acordo com o estudo de Wong (1974), citado no ítem 2.2.2(b).

Um melhor desempenho da célula é obtido quando a pressão é transmitida através de um fluido confinado ao diafragma do qual se mede a deformação. Neste caso, Askegaard (1961) obteve a seguinte expressão para P_e :

$$P_e = 1,85 \delta \frac{E_s \cdot D}{(1 - \nu_s^2)}$$

Esta análise de Askegaard (1961) considera o meio em contato com a célula como um sólido elástico e semi-infinito. Stain (1971) deduziu expressões semelhantes considerando uma célula com diafragma flexível em fronteira, em contato com um meio elástico de espessura H , e com uma carga uniformemente distribuída na superfície. O resultado desta análise é mostrado na figura 21, onde também está traçada a solução de Askegaard, para determinadas condições do meio, de tal forma que o parâmetro adimensional W , que representa as características físicas do solo e do diafragma assume o valor $W = 0,0245$.

3.2 - Ensaaios em Laboratório para Verificação do Comportamento das Células de Pressão Total

A fim de verificar as conclusões dos vários estudos teóricos desenvolvidos e pesquisar o desempenho das células sob diferentes condições, inúmeros ensaios em laboratório foram executados.

O material utilizado para representar o solo, na grande maioria dos ensaios, foi areia seca uniforme, colocada na câmara de ensaio com cuidado, procurando fazer com que toda a massa de solo ficasse com uma densidade uniforme. Em poucos ensaios foi empregada argila a diferentes umidades.

O material é colocado na câmara de ensaio até a altura onde se deseja instalar as células. Interrompe-se a colocação do material e as células a serem ensaiadas são instaladas na posição desejada: horizontal, vertical ou inclinada. A seguir

completa-se o enchimento da câmara com o solo empregado. Em geral as camadas de solo acima e abaixo das células ficam com a mesma espessura.

Quando deseja-se pesquisar o comportamento de células para medir pressão sobre fronteiras, as células são instaladas sobre o fundo rígido da câmara de ensaio e envoltas com argamassa. Desta forma, a face sensível da célula fica no mesmo plano do fundo da câmara. Pode-se, também, cobrir esta camada de argamassa com uma placa metálica com um furo por onde passa a célula.

Após completar o enchimento da câmara de ensaio, a superfície do solo é coberta com uma membrana flexível impermeável e a pressão é aplicada por meio de um fluido (ar ou água). Com isto é garantida uma distribuição uniforme de pressão na superfície do solo.

As primeiras pesquisas foram feitas utilizando câmaras metálicas cilíndricas (fig.22). Verificou-se que o atrito do solo na superfície lateral da câmara influenciava muito a distribuição de pressões no solo. Com o fim de tentar eliminar este efeito, Plantema (1953) projetou e construiu uma câmara de ensaio onde o solo ficava confinado entre "bolsas" de borracha com água sob pressão controlada (fig.23), o que também possibilitou controlar as tensões aplicadas lateralmente.

Uma câmara mais simples e que visava também eliminar o atrito lateral foi construída por Kallstenius & Bergau (1956). Consta simplesmente de anéis metálicos de determinada al

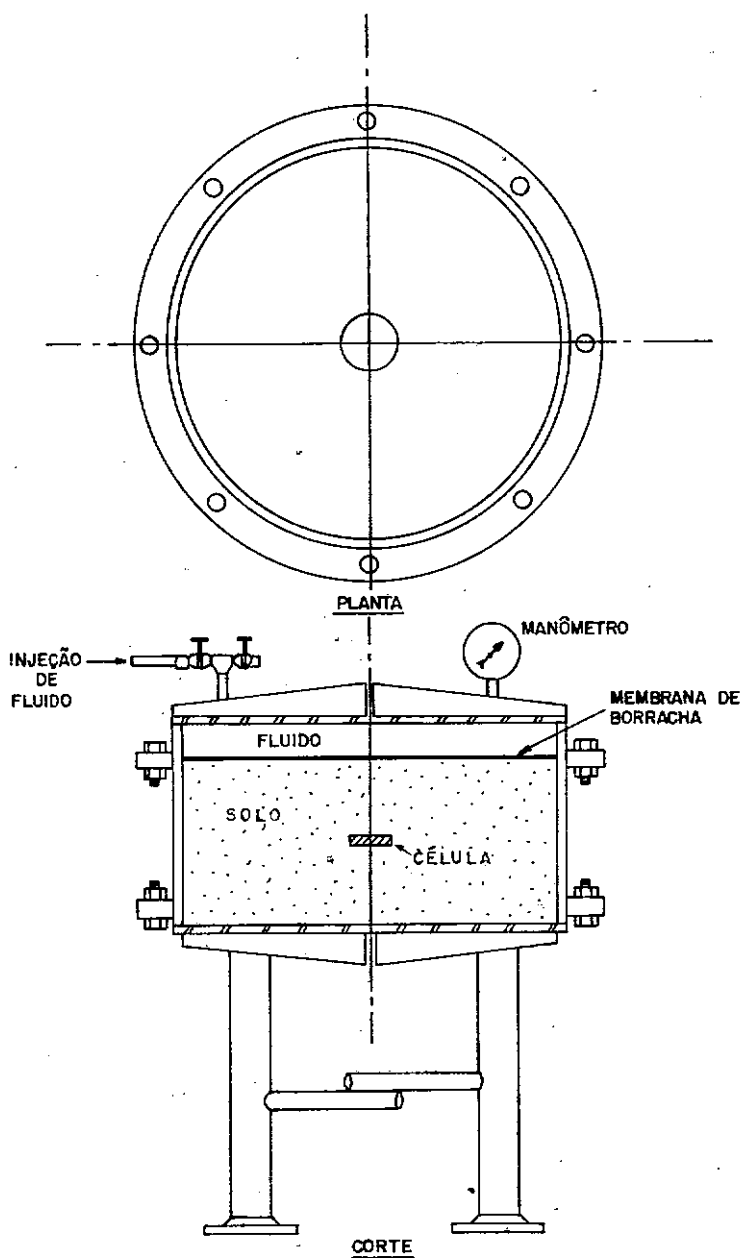


Fig. 22 — Câmara de ensaio de células em solo (WES.1944).

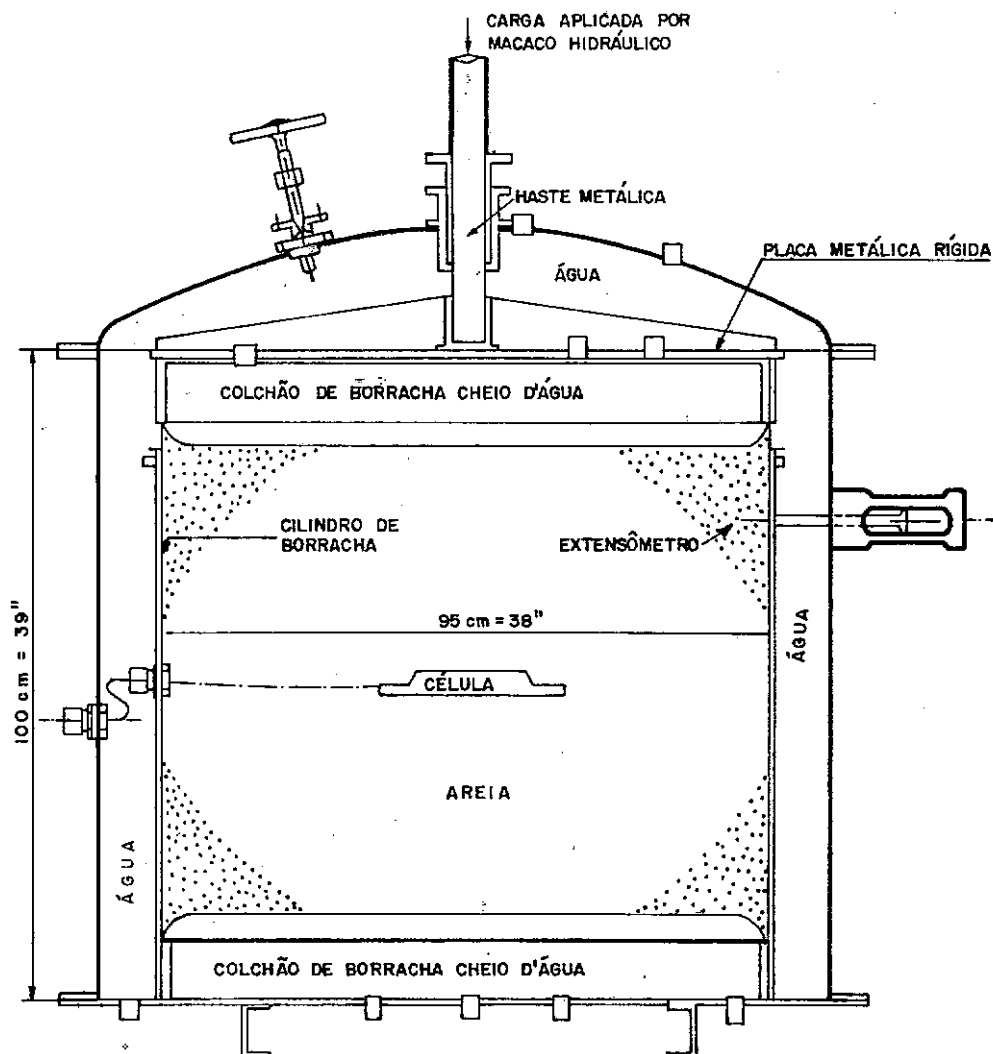


Fig. 23 — Câmara de ensaio projetada por Plantema (1953).

tura (5 cm no projeto original) superpostos e afastados entre si por pequena distância (1mm) (fig.24). Mais tarde, no espaço entre os anéis metálicos foram colocados anéis de borracha (Hvorslev, 1976), para os ensaios com materiais granulares finos, evitando a penetração de grãos de solo entre os anéis metálicos.

Trollope & Currie (1960) procuraram medir a distribuição de pressões no solo no interior de uma câmara cilíndrica. Para isto, construíram uma câmara cuja base é formada por vários anéis concêntricos e uma placa circular central. Cada anel é apoiado em três pequenos postes metálicos aos quais foram fixados transdutores de corda vibrante para medir a carga em cada poste. Diferentes alturas de solo foram colocadas no interior da câmara e a pressão foi aplicada por meio de um colchão de água sob pressão. Desta forma, foi possível determinar a pressão no topo e na base da camada de areia e estimar, com uma acurácia de $\pm 2\%$, a pressão no plano médio desta camada, onde seriam instaladas as células.

Exceto a câmara de Plantema, as outras não permitem um controle das tensões laterais no solo. Os ensaios são feitos na condição K_0 , isto é, não há deslocamento lateral. Estes deslocamentos são impedidos pelas paredes rígidas da câmara.

As pesquisas da influência das tensões radiais no valor das tensões medidas, empregando câmaras com paredes rígidas, são feitas com a instalação de células verticalmente e a aplicação da pressão no topo da camada de solo.

Muitos ensaios foram feitos instalando células de

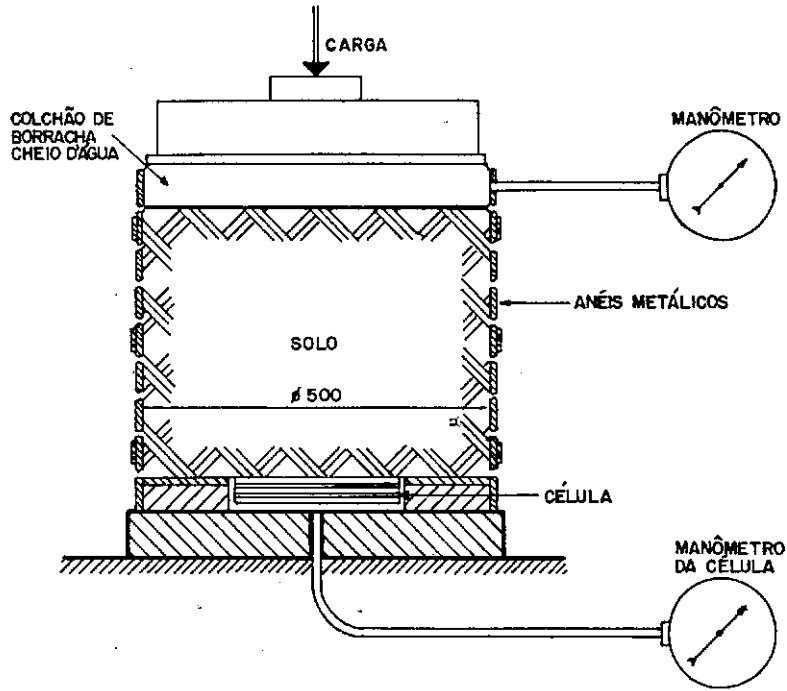


Fig. 24 — Câmara de ensaio projetada por KALLSTENIUS e BERGAU (1956).

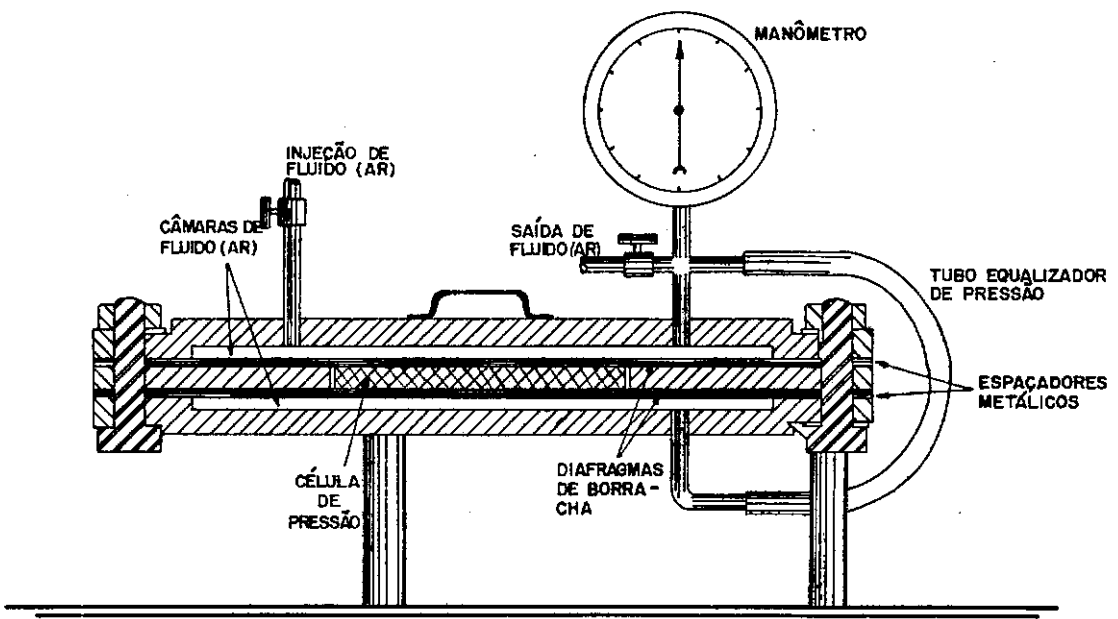


Fig. 25 — Câmara para calibração em fluido de célula de pressão total (WES. 1951).

pequeno diâmetro em corpos de prova e as pressões aplicadas em câmaras triaxiais. Neste caso é possível controlar o estado de tensões a que estará sujeita a célula, e pode-se fazer um estudo da influência das tensões no valor medido pela célula.

A verificação da linearidade da resposta da célula à pressão aplicada é feita sob pressão de fluido (ar ou água). Uma câmara para este ensaio, construída pelo WES (fig.25), apresenta a vantagem de não aplicar pressão de fluido sobre a superfície lateral da célula. Os ensaios em solo são sempre referidos a esta calibração em fluido e o melhor desempenho de uma célula em solo é verificado quando estas duas calibrações coincidem.

A seguir são apresentadas as conclusões de várias destas pesquisas em laboratório para verificação dos fatores que influem no comportamento das células de pressão total.

3.2.1 - Fatores que Influem na Medida de Tensões no Solo

a) Dimensões da Célula

Este foi um dos primeiros fatores pesquisados. Os ensaios com células e os estudos teóricos indicaram que quanto maior a relação espessura/diâmetro ($2B/D$), maior o valor registrado pela célula para a mesma pressão no solo. Este fato é atribuído a um aumento na concentração de tensões sobre a célula.

Ensaio feito pelo WES (1944) com células tipo fluido confinado em areia uniforme, com três diâmetros (3" (7,6cm)

4,5"(11,4cm); 12"(30,5cm)) e espessura variável, verificaram esta conclusão (fig.26.a). Observa-se que para valores da relação $(D/2B) > 5$, a pressão registrada tende a se manter constante, em torno de 100 a 120% da pressão aplicada na superfície da areia. Este valor tem sido usado como referência para os projetos de células, independente da finalidade a que se propõe. O valor proposto pelo WES foi considerado muito rigoroso por Trollope & Currie (1960), que não constatarem diferença significativa nas curvas de calibração em areia de células tipo diafragma livre com diâmetro de 1,03" (2,62cm) e relação $(D/2B)$ entre 4,6 e 2,3 (fig.27). Assim, é sugerido que seja utilizado como valor limite a relação $(D/2B) = 2,5$.

Os estudos teóricos indicam a tendência de variação, sem fixar valores limites. Peattie & Sparrow (1954) verificaram esta tendência para diversos tipos de solos e com célula tipo diafragma livre. A dependência do valor da tensão medida às dimensões da célula, numa relação direta a (B/D) , foi verificada em todos os estudos. Conclui-se que as células devem ter grande diâmetro e pequena espessura.

b) Compressibilidade da Célula e do Solo

Kögler & Scheidig (1927), ao fazerem medições de pressão, observaram que, se a célula fosse menos compressível que o solo envolvente, as pressões indicadas seriam maiores que as tensões no meio. Inversamente, se a célula for mais compressível, indicará tensões menores.

Ensaio em areia, fazendo variar a compressibili-

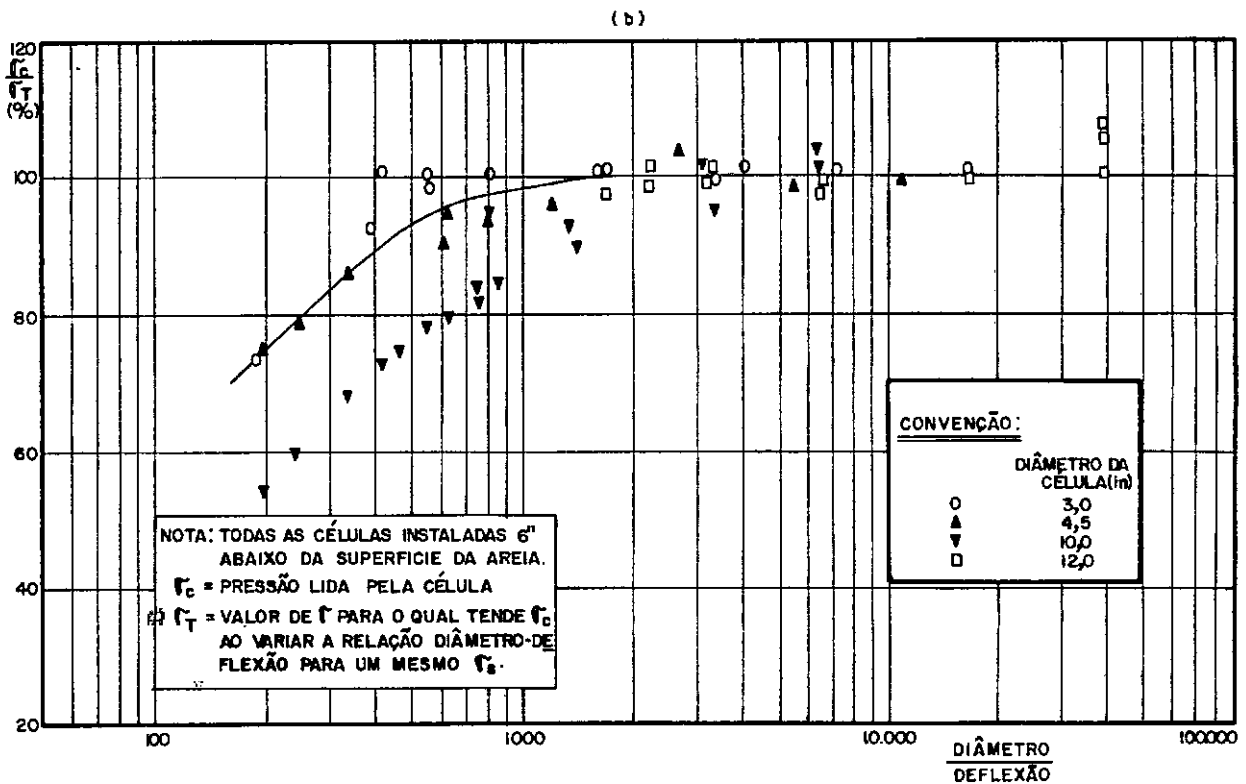
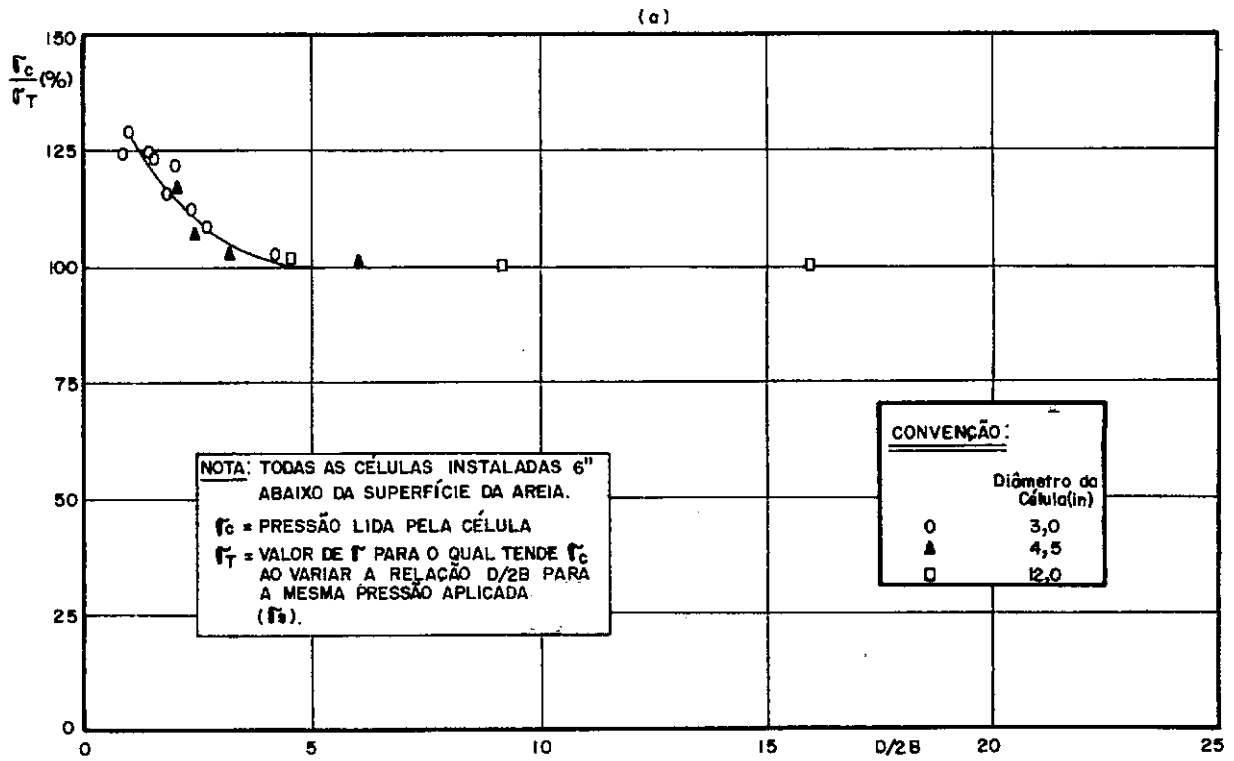


Fig. 26 — Influência das dimensões e rigidez no comportamento de células tipo fluido confinado em areia (wes, 1944).

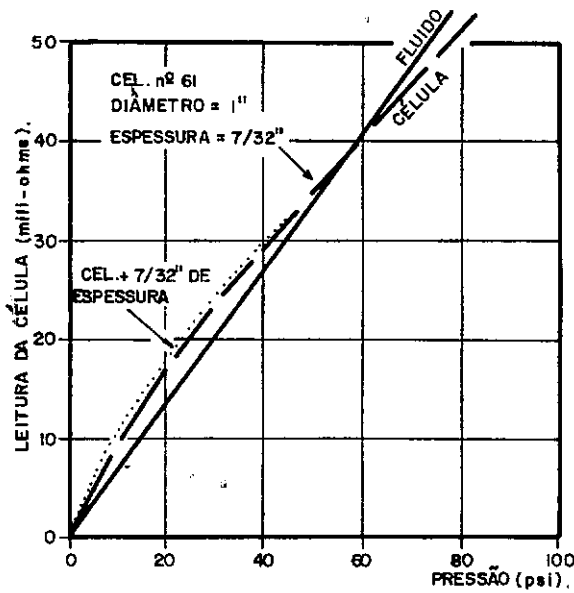


Fig. 27 — Efeito das dimensões da célula na calibração (Trollope Currie 1960)

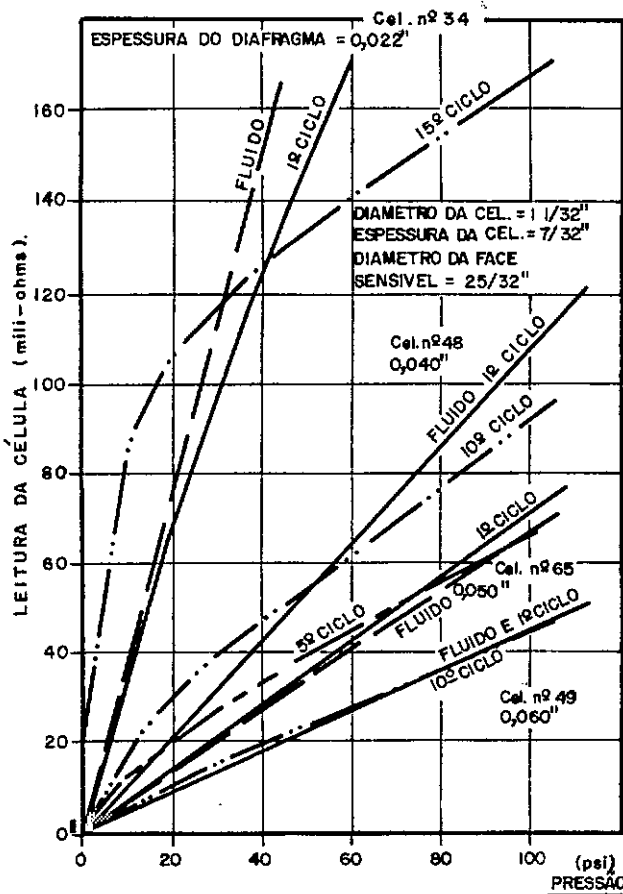


Fig. 28 — Efeito da rigidez do diafragma na calibração em areia de células tipo diafragma livre (Trollope Currie 1960)

dade total de células com diâmetros diferentes foram feitos pelo WES (1944). Os valores medidos, apesar de muito dispersos, apresentam uma tendência a se estabilizar em torno de 120 a 150% da pressão aplicada quando a relação diâmetro-deflexão ultrapassa o valor de 2.000 (fig.26.b). Para valores inferiores a este, a curva apresenta declividade acentuada, tendendo ao valor da pressão aplicada quando as compressibilidades do solo e da célula se igualam. No entanto, qualquer variação no módulo do solo provocará uma significativa alteração no valor da relação entre a tensão indicada e a real.

Peattie & Sparrow (1954) analisaram os estudos de Taylor (1947) e de Monfore (1950) e observam que para relação (E_c/E_s) > 10, o fator de influência da célula (C_A) pode ser considerado aproximadamente constante, e portanto, independente de variações desta relação (fig.9.a). Este limite foi verificado experimentalmente por Peattie & Sparrow (1954) em pesquisa com células tipo fluido confinado de diferentes compressibilidades, em areia fofa úmida (fig.9.b).

Estas conclusões são aplicáveis às células tipo fluido confinado, tipo diafragma apoiado, e tipo pistão nas quais a face de medida desloca-se por translação, permanecendo plana após a deformação.

No caso de células tipo diafragma com deformação livre, a deflexão do diafragma tem grande influência no valor medido. Os estudos teóricos de Allwood (1956) e de Tory & Sparrow (1967) consideraram este efeito e mostraram que o erro da célula

é função do fator de flexibilidade (FF), já definido. As curvas da fig.12, traçadas para diferentes valores de $(2B/D)$ mostram que para valores de $FF < 1$ o erro da célula é aproximadamente constante e independente de incorreções e variações do módulo do solo.

No primeiro ciclo de carregamento em areia, curvas de calibração não lineares para pressões acima de 30 psi (2 kgf/cm^2) com células tipo diafragma livre de pequeno diâmetro ($1\frac{1}{32}'' = 2,62\text{cm}$) foram obtidas por Trollope & Currie(1960)(fig. 28). Também foi verificado que a curva de calibração variava após aplicação de ciclos de carga, estabilizando após o 10º ciclo. Este fato foi atribuído ao efeito da deflexão do diafragma e consequente formação gradual de uma estrutura granular rígida sobre o diafragma, com a aplicação de ciclos de carga, o que leva a célula a acusar pressões maiores que as aplicadas, quando sob baixas pressões.

A adoção de diafragmas rígidos evita este fenômeno. Utilizando células de diafragma livre com diafragmas de espessura variável, constatou-se que para um diafragma de $0,06''$ ($0,15 \text{ cm}$) de espessura, o fenômeno não ocorre. A deflexão do centro deste diafragma, medida com um micrômetro, forneceu um valor mínimo para a relação diâmetro do diafragma livre-deflexão entre 1950 e 2600.

Finalmente Trollope & Currie (1960) sugerem que o projeto de células de pequeno diâmetro para medir tensões em material granular deve ser de diafragma livre engastado em um anel rígido. Assim, os efeitos da compressibilidade e da deflexão do diafragma, que provocam, respectivamente, concentração e alívio

de tensões sobre o diafragma, se compensariam, fazendo a curva de calibração se aproximar da calibração em fluido, que verifica a acurácia da célula.

c) Relação Área Sensível para Área Total

Devido à elevada concentração de tensões que ocorre na periferia de uma célula em solo, provocada pela diferença de compressibilidades naquela interface, faz-se necessário a adoção de um anel rígido envolvendo a face sensível, para a absorção dessas tensões.

O estudo teórico de Monfore (1950) mostrou que a influência das dimensões da célula e da compressibilidade relativa solo-célula sobre a tensão medida pela célula, é reduzida quando somente a área central é considerada. (fig.7).

Esta conclusão foi verificada em laboratório por Peattie & Sparrow (1954). Eles observaram que para células de pequeno diâmetro (inferior a 4" = 10,0cm) a relação área sensível/área total deve ser menor que 0,25 para células tipo fluido confinado, e menor que 0,45 para células tipo diafragma livre. Para células de maior diâmetro é necessário pesquisar até onde a concentração de tensões na periferia influi na medida de pressões pela célula. Na figura 29 observa-se a influência desta relação no erro medido, para diferentes tipos de solo, com duas células de 3" (7,6cm) de diâmetro total. Uma contém uma face sensível de 1,5" (3,8cm) de diâmetro e a outra é sensível em toda a face plana.

Várias células com diferentes proporções de área

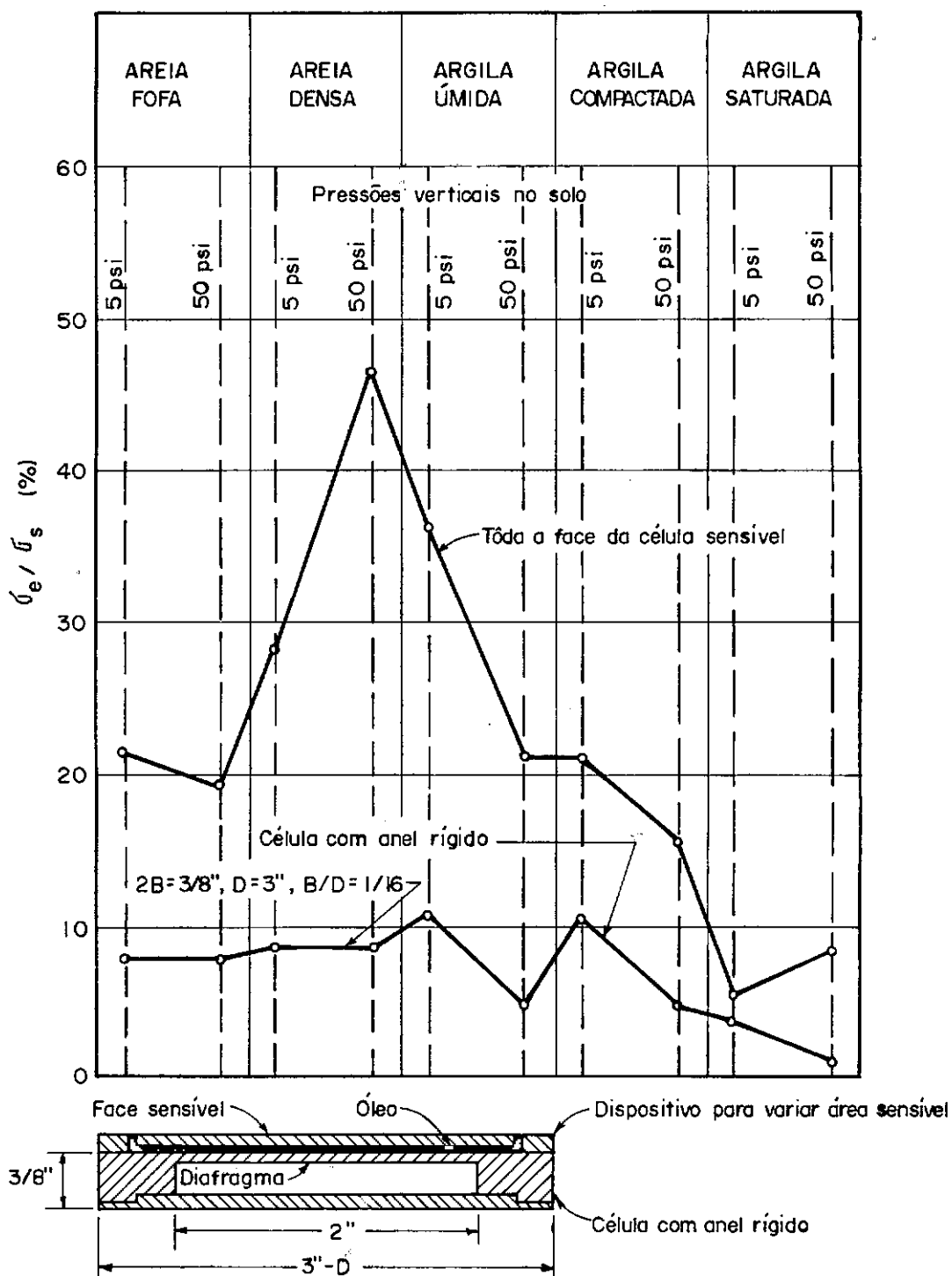


FIG. 29 — Erros da célula para vários tipos de solo e diferentes pressões (PEATTIE & SPARROW, 1954).

sensível em relação a área total (15 a 60%) foram ensaiadas sob carga repetida por Trollope & Currie (1960). Foi verificado que para o caso de cargas repetidas em areia, esta proporção deve ser a maior possível.

Ensaaios feitos pelo WES (Hvorslev, 1976) não mostraram significativas diferenças de comportamento entre células com anéis de borracha e metálico. Bates (1969) empregou um anel em forma de cunha e Carlson propôs que a periferia de sua célula fosse em forma semi-circular (Hvorslev, 1976).

d) Coeficiente de Poisson

A influência do coeficiente de Poisson do solo é pequena. Na análise de Monfore (1950), a influência é em termos de $(1 - \nu^2)$, e uma variação de ν de $\pm 20\%$ alterará o valor medido em menos de 2%. No entanto, quando é considerada a influência das tensões radiais, este coeficiente tem influência sensível, como mostra a análise de Askegaard (1963) (fig.13).

e) Tipo de Solo

Pesquisando os efeitos relativos das propriedades da areia, Buck (1961) utilizou células tipo diafragma livre. Definuiu Fator de célula (F), para uma determinada pressão, pela relação.

$$F = \frac{\text{pressão registrada pela célula em solo}}{\text{pressão registrada pela célula em fluido}}$$

Buck verificou que este fator é influenciado pelas características do solo arenoso empregado nos ensaios, fazendo aumentar o valor de F quando contem partículas angulares. Dunn & Billan (1966) observaram que F para areia densa é menor que para areia fofa. O solo arenoso também influencia outros aspectos de medição de pressão de terra. Assim, em medições com 3 ou 4 células da mesma pressão aplicada em solo arenoso, a melhor reprodutibilidade será obtida com solos finos e bem graduados, enquanto que solos com grãos angulares, densos e úmidos prejudicam a reprodutibilidade. O desvio do zero, ou seja, a diferença entre o registro da célula sob carga mínima antes e após um ciclo de carga, é menor com o emprego de solo fino com partículas angulares e denso. Verifica-se uma menor histerese entre os ciclos de carregamento e descarregamento quando o solo apresenta partículas angulares.

Peattie & Sparrow (1954) observaram que em solos coesivos com umidades acima de seu limite de plasticidade, os erros de medida são muito pequenos (fig.29), podendo ser desprezados.

Células para uso em solos grossos ou pedregulhosos devem ter um diâmetro mínimo de cerca de 5 a 6 vezes o diâmetro da maior partícula de solo em contato com a superfície da célula (Hvorslev, 1976). Também, o diâmetro da célula para uso em areia deve ter de 6" (15,2cm) a 12" (30,5cm). Em solos arenosos finos, podem ser usadas células de menor diâmetro. No entanto, maiores estudos a este respeito devem ser feitos, pois o tipo de célula também influirá nos limites citados. Para células tipo pistão,

Kallstenius & Bergau (1956) concluíram teoricamente que o diâmetro médio da partícula em contato com a célula não deve exceder cerca de 2% do diâmetro da célula.

f) Temperatura.

Devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica do solo e do material com que é feita a célula, quando há uma variação de temperatura, tensões são induzidas sobre a célula, influenciando na medição feita, devido à diferente deformação sofrida pelo solo e pela célula.

Monfore (1950) introduziu os coeficientes de expansão térmica nas equações teóricas deduzidas para estudo do comportamento da célula. Conclui que o erro na célula é diretamente proporcional à variação de temperatura e à diferença entre os coeficientes de expansão térmica do solo e do material da célula. Para uma célula sensível só na área central, instalada em concreto, com as seguintes características:

<u>Célula</u>	<u>Meio (concreto)</u>
Espessura : $2 B = 0,25'' (0,64 \text{ cm})$	-
Módulo de Elasticidade : $E_C = 8 \times 10^6 \text{ psi} (6 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$	$E_S = 4 \times 10^6 \text{ psi} (3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$
Coeficiente de Poisson : $\nu_C = 0,2$	$\nu_S = 0,2$
Coeficiente de Expansão Térmica : $\alpha_C = 6,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1} (3,65 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\alpha_S = 5,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1} (3,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$

uma variação de temperatura de 125°F (52°C) induzirá um erro de 50 psi (3,5 kgf/cm²), ou seja, um aumento de 0,4 psi por °F (0,07 kgf/cm² por °C).

A influência da temperatura no comportamento mecânico das células pode ser corrigido por um arranjo conveniente dos transdutores, que eliminam este efeito. Foi citado na descrição de cada tipo de célula os efeitos que surgem.

g) Estado de Tensões no Solo

Ensaíos feitos por Buck (1961) com células posicionadas na direção normal, paralela e fazendo ângulo de 45° com a direção da tensão principal maior, e com várias relações de tensões principais, mostraram a dependência de F à relação de tensões principais e à direção da deformação principal. Dos resultados, expressou F em função da relação entre as tensões principais ($R = \sigma_v/\sigma_H$) atuantes sobre a célula, por:

$$F = \frac{C}{R^{1/4}}$$

onde C é uma constante (igual a 0,51 para seus ensaios). Os valores de F encontrados para células medindo tensões normais (σ_1), paralelas (σ_3) e fazendo 45° (σ_u) com a face da célula em ensaios K_0 foram:

	σ_1	σ_3	σ_u
F	1,08	0,91	0,92

Laidlaw, (citado em Morgan & Gerrard, 1968), em 1965, fez ensaios em câmaras triaxiais com areia compactada em camadas e com células tipo diafragma livre de 1 1/32" (2,6cm) de diâmetro total e 3/4" (1,9cm) de diâmetro da face sensível. A partir dos resultados obtidos, (fig.30.a) apresenta a seguinte relação:

$$F = 1,09 \bar{R}^{0,151}$$

onde \bar{R} é a relação entre a tensão no solo nas direções normal e paralela à face da célula. O valor das constantes varia com o tipo de solo, com as condições de compactação, e espessura do diafragma das células, e deve ser determinado experimentalmente para cada situação. Coppinger (citado em Morgan & Gerrard, 1968) concluiu, também, que o efeito da relação de tensões está presente para células instaladas na horizontal, na vertical ou em uma inclinação qualquer.

Morgan & Gerrard (1968) fizeram uma análise da influência da relação de tensões principais sobre uma célula tipo diafragma livre colocada horizontalmente em meio elástico ideal, isotrópico e anisotrópico. Encontraram valores com tendência oposta aos de Laidlaw, mas similares aos encontrados para células em argila compacta e areia fofa. A influência da anisotropia foi marcante, como mostra o quadro a seguir:

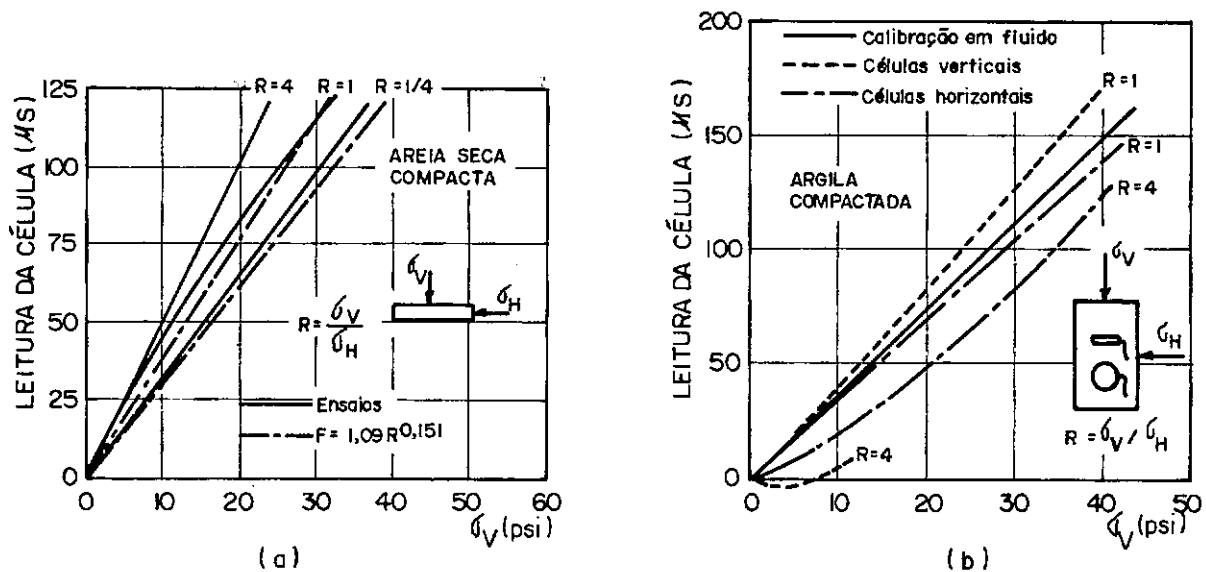


FIG. 30 — Efeito da relação de tensões principais na calibração de células tipo diafragma livre (MORGAN & GERRARD, 1968).

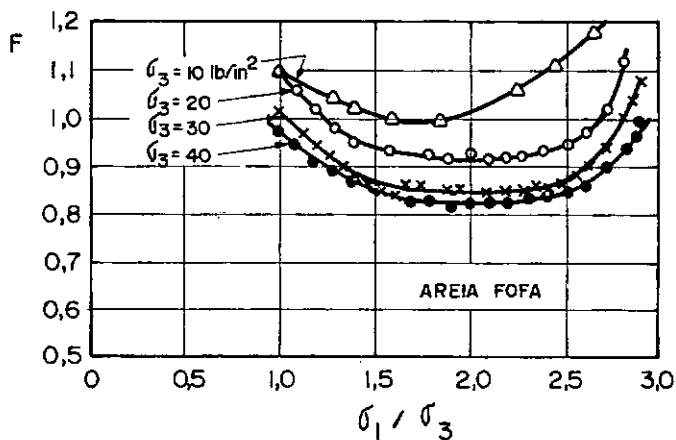


FIG. 31 — Influência da relação de tensões principais na calibração de células tipo diafragma livre (DUNN & BILLAM, 1966).

Valores Relativos de F		
Relação de Tensões sobre a Célula	Meio Isotrópico	Meio Anisotrópico ($E_H < E_V$)
1	1,11	1,34
2	1,05	1,13
4	1,00	1,03

Ensaaios feitos com areia fofa por Morgan & Gerrard (1968) mostram que, neste caso, à medida que a relação de tensões principais cresce, o valor de F decresce. Esta mesma tendência foi encontrada por Holden (1967) (citado em Morgan & Moore, 1968).

Os resultados obtidos por Morgan (Morgan & Gerrard, 1968) com células tipo diafragma livre instaladas vertical e horizontalmente em corpos de prova de argila compactada na umidade ótima e ensaiados em câmara triaxial com relações de tensões principais variando de 1 a 4 (fig.30.b) confirmam a análise acima. McMahon & Yoder (1960) acharam que em argila compactada, as células tipo diafragma livre, ensaiadas em diferentes inclinações, eram sensíveis somente à tensão normal à face da célula.

Brown & Pell (1967) mostram, como já foi citado, que a leitura da célula pode ser influenciada de maneira puramente mecânica quando uma força atua sobre o anel externo (fig.4). Este fenômeno também foi verificado por Whiffin e por Selig. No entanto, Selig mostrou que este efeito é adicional ao provocado pela relação de tensões principais (Morgan & Gerrard, 1968).

Células tipo diafragma livre, com as duas faces sensíveis e com diafragma de espessura variável, com 1,5" (3,8cm) de diâmetro total e 1" (2,5cm) de diâmetro da face sensível foram ensaiadas em corpos de prova de areia em câmara triaxial por Dunn & Billam (1966). Após aplicar ciclos de tensões de confinamento de 10 psi (0,7 kgf/cm²), 20 psi (1,4 kgf/cm²), 30 psi (2,1 kgf/cm²) e 40 psi (2,8 kgf/cm²) nos corpos de prova de areia fofa e densa, aumentou-se a tensão axial até a ruptura. Observou-se que F é influenciado pela relação de tensões principais (fig.31), atingindo um mínimo de 0,81 a $\sigma_1/\sigma_3 \approx 2$ para areia fofa, e 0,60 a $\sigma_1/\sigma_3 \approx 2,5$ para areia densa. O valor de F cresce rapidamente a um valor superior a 1 quando a ruptura é iminente. Também foi observado que F para areia densa é menor que para areia fofa.

Dos ensaios executados por Gerrard & Morgan (1972) com células tipo diafragma livre de 1" (2,5cm) de diâmetro e espessuras de 0,02" (0,05cm), 0,04" (0,10cm) e 0,05" (0,13cm) em corpos de prova de areia compactada, colocados em câmara triaxial, observa-se que, tanto para células na horizontal, como na vertical, as tensões paralelas à face têm efeito sobre F . O valor de F depende da orientação da célula, do valor da relação de tensões principais e da espessura do diafragma. Resultados típicos para células com diafragma de 0,04" (0,1cm) de espessura são:

Orientação da Face Sensível	Relação de tensões σ_1/σ_3	Fator de Calibração F
Horizontal	4	1,16
	1	1,10
Vertical	4	0,90
45°	1 e 4	1,10

A influência da tensão principal intermediária sobre F observada em ensaios triaxiais verdadeiros é menor do que 2%. As tensões cisalhantes (aplicadas em ensaios de torsão) aumentam F para células horizontais e diminuem F para células verticais, significativamente.

Gerrard & Morgan (1972) sugerem um processo iterativo para a estimativa de F, já que F depende do completo estado de tensões inicialmente desconhecido. O processo deve convergir para a avaliação das tensões reais. Uma estimativa das tensões pode ser feita adotando $F = 1$. A seguir, faz-se uma calibração onde a trajetória de tensões estimada é aplicada a amostras de areia contendo a célula. Dos resultados do ensaio obtém-se novo valor de F que fornecerá uma estimativa mais acurada das tensões que se desenvolvem. O processo deve ser repetido até se obter a acurácia desejada.

A influência das tensões laterais também é mostrada na figura 13.b (Askegaard, 1963). Observa-se que as tensões axiais na inclusão rígida aumentam quando aumentam as tensões la

terais para valores baixos da relação $(2B/D)$ da inclusão. Mas esta tendência inverte-se para valores mais altos de $(2B/D)$ quando $v_s > 0,3$. No caso de inclusão com fluido, a sensibilidade às variações de tensões laterais no meio é bem menor (figura 13.c). As experiências práticas de Askegaard com uma inclusão cilíndrica com fluido em uma matriz elástica, deram resultados que confirmam a tendência geral da análise teórica. As pequenas diferenças encontradas são atribuídas à diferente geometria das inclusões e a representação de um meio semi-infinito por um cubo de dimensões limitadas (Hvorslev, 1976).

Da análise teórica por elementos finitos feita por Bates (1969), observa-se na fig.14.c que para os módulos adotados para o solo e o material da célula, o efeito da inclusão (relação $\sigma_c - \sigma_s / \sigma_s$) é 9,5% para tensões axiais e 54% para tensões radiais.

Brown (1977) conclui que, no atual estágio de estudo sobre a interação solo-célula, deve-se tentar projetar células de forma que os efeitos da relação de tensões e deformações laterais sejam minimizados. Isto pode ser feito pela escolha adequada da relação (B/D) para um determinado coeficiente de Poisson do solo (fig.32). Infelizmente a relação (B/D) é muito sensível ao coeficiente de Poisson do solo, propriedade esta, de difícil determinação e que pode variar com a trajetória de tensões e condições de drenagem do solo.

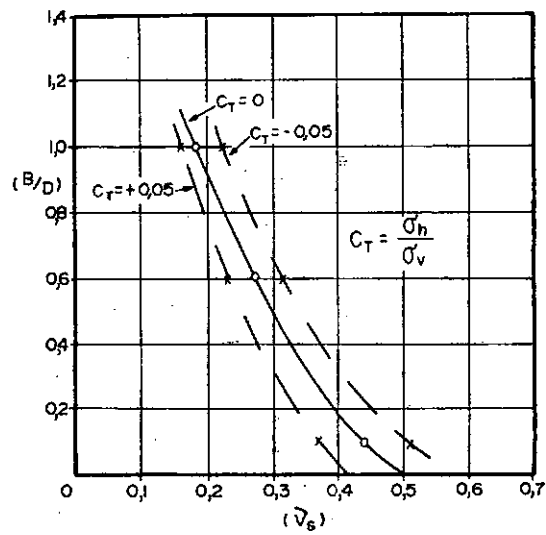


FIG. 32 - Curvas para limitar a sensibilidade transversal (BROWN , 1977).

3.2.2 - Fatores que Influem na Medida de Empuxos sobre Fronteira

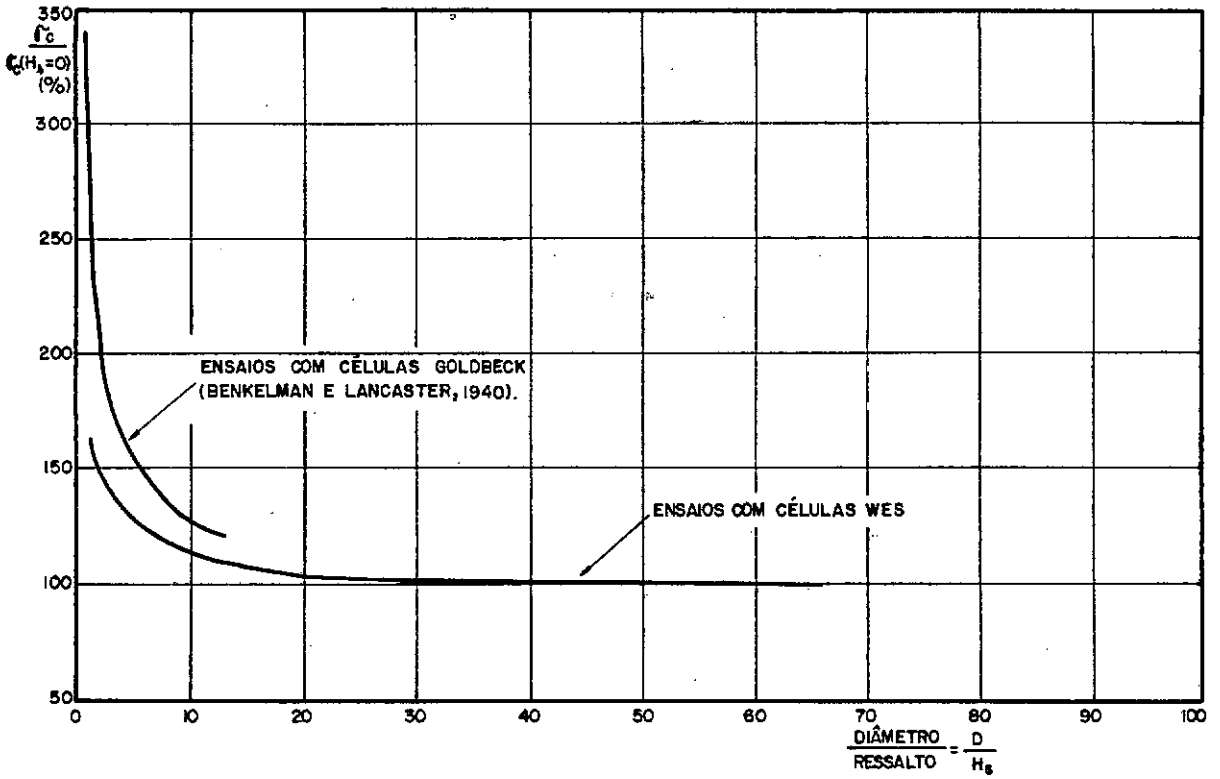
a) Ressalto Formado pela Célula sobre a Fronteira

A influência do ressalto formado pela célula sobre a fronteira rígida no comportamento da célula foi estudada, já em 1941, por Benkelman & Lancaster. Suas pesquisas em laboratório com células Goldbeck indicaram o comportamento geral da célula frente a esta variável, sem, no entanto, obter resultados conclusivos.

Pesquisa mais objetiva e ampla foi conduzida pelo WES (1944). Os ensaios foram feitos em areia uniforme com células tipo fluido confinado, instaladas na base de uma câmara de ensaio com paredes rígidas. Foram adotados como referência os valores medidos pelas células instaladas com a face sensível no mesmo plano da base rígida. Admitiu-se que nesta situação a pressão medida é igual à pressão real atuando no solo naquele ponto. Verificou-se que para valores da relação diâmetro/ressalto maiores que 30, a relação entre as pressões medidas (fig.33.a) aproxima-se de 100% e mantém-se estável nesta relação. Os resultados de Benkelman & Lancaster (1941) já indicaram esta mesma tendência para o comportamento das células em função do ressalto. Assim, o WES sugere que este valor pode ser aplicado a qualquer tipo de célula.

Esta conclusão foi aceita e não foram feitas mais pesquisas neste sentido, mesmo porque procura-se sempre instalar

(a)



(b)

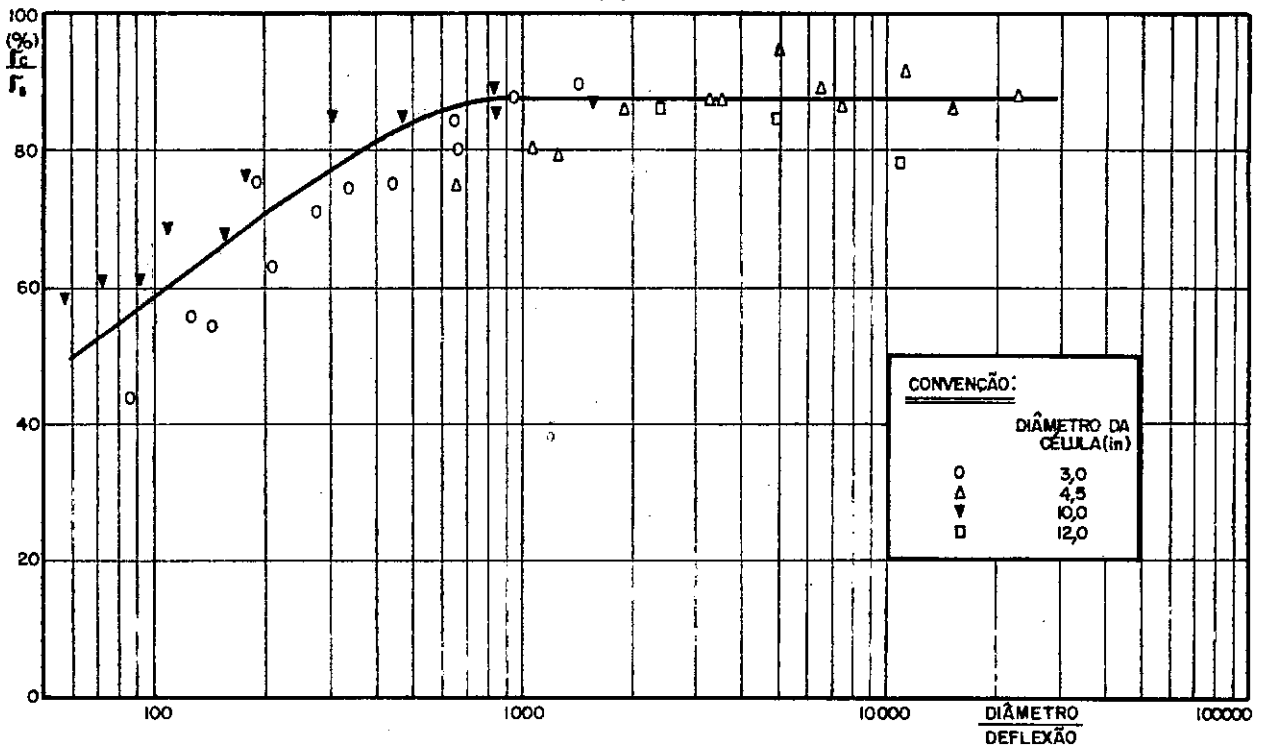


Fig. 33 — Influência do ressalto e da rigidez de células instaladas em frente (Wes, 1944).

as células de forma que sua face sensível fique no mesmo plano da superfície rígida.

b) Compressibilidade e Flexibilidade da Célula

As diferentes características de deformabilidade de uma célula instalada numa fronteira, influem nos valores de pressão medidos.

Este fato foi primeiro pesquisado pelo WES (1944). Adicionando pequenas molas a células tipo fluido confinado, instaladas com sua face sensível no mesmo plano da superfície rígida, foi possível alterar a compressibilidade geral das células. Os resultados dos ensaios em areia uniforme indicam que a pressão medida decresce a medida que a compressibilidade da célula aumenta, e é sempre inferior à pressão aplicada na superfície da areia (fig.33.b). No entanto, quando as células apresentam um valor para a relação diâmetro/deflexão maior que 1.000, a pressão indicada é, aproximadamente, constante e cerca de 88% da pressão aplicada. A diferença, 12%, é atribuída ao efeito do atrito nas paredes laterais da câmara de ensaio. Estas conclusões aplicam-se a células tipo fluido confinado, tipo pistão e tipo diafragma apoiado, em contato com areia.

Kallstenius & Bergau (1956) fizeram ensaios com células tipo pistão e tipo diafragma, concluindo que o comportamento de uma célula é grandemente dependente do tipo de movimento de sua face sensível, especialmente a baixas pressões. Células que sob pressão desenvolvem curvatura contínua na periferia

são as que apresentam melhor reprodutibilidade dos valores medidos, apesar de registrarem as maiores diferenças entre a pressão medida e a pressão aplicada. Os valores medidos sempre são inferiores aos aplicados. Os autores sugerem que a deformação máxima de uma célula de 25cm de diâmetro, sob uma pressão de 4kgf/cm², deve ser igual a 0,025mm, o que corresponde a uma relação diâmetro/deflexão de 10.000. Estes dados fornecem uma relação deflexão/pressão ($d\Delta/dp$) de 6×10^{-4} cm/kgf/cm².

Em células tipo diafragma, o efeito de arqueamento do solo arenoso sobre o diafragma, quando este se deforma, é responsável pelos valores medidos serem inferiores à pressão real. Segundo Trollope & Lee (1957) esta zona de arqueamento pode ser assimilada a uma pirâmide de base hexagonal inscrita em um círculo cujo diâmetro é igual ao diâmetro da célula, e com seus lados apresentando uma inclinação média de 60°. A distribuição de pressão sobre o diafragma é similar àquelas obtidas por Monfore e Peattie & Sparrow, com alta concentração de tensões na periferia. O arqueamento está sempre presente, em maior ou menor valor, provocando uma distribuição de pressões não uniforme sobre o diafragma.

Células com diafragma livre bastante rígido foram ensaiadas em areia por Trollope & Lee (1961). Foram medidas pressões em areia da mesma ordem de grandeza das pressões medidas em fluido, nas mesmas condições. A flexibilidade do diafragma (definida como a relação entre a variação da deflexão central do diafragma $d\Delta$, para um determinado acréscimo de tensão aplicado sobre o diafragma, dp), é um fator importante no comportamento da célula, e deve atender a duas condições (Trollope & Lee, 1961): a deflexão central do diafrag-

ma não deve exceder o valor além do qual a curva de calibração não é mais linear; e a rigidez do diafragma deve ser tal que a declividade da curva de calibração seja aproximadamente igual à curva de calibração em fluido.

Ensaaios em areia mostram que para se obter um erro máximo de 2% em relação à calibração em fluido, o diafragma deve ter um valor para sua flexibilidade ($d\Delta/dp$) inferior a 10^{-5} in/psi ($3,6 \times 10^{-4}$ cm/kgf/cm²) e da ordem de $0,3$ a $0,5 \times 10^{-5}$ in/psi ($1,1$ a $1,8 \times 10^{-4}$ cm/kgf/cm²) (Trollope & Lee, 1961) (fig.35). A diferença do valor encontrado por Kallstenius & Bergau (1956) foi atribuído ao efeito do atrito nas paredes laterais da câmara de ensaio utilizada por estes pesquisadores.

A flexibilidade do diafragma é mais crítica para tensões decrescentes do que para tensões crescentes (Lee, 1968). As observações durante o descarregamento levam às seguintes conclusões (Trollope & Lee, 1961): a histerese máxima aumenta linearmente com o aumento da flexibilidade do diafragma, e o efeito da histerese é muito menor em argila do que em areia (fig.34).

O valor para a flexibilidade do diafragma citado acima é, segundo Lee (1968), suficiente para se obter as mesmas características das curvas de carregamento e descarregamento em areia.

Estudos teóricos estimam, qualitativamente, que um decréscimo no módulo de deformação do solo fornece uma curva de calibração em solo mais próxima da curva de calibração em fluido. Esta estimativa foi comprovada experimentalmente, assim como

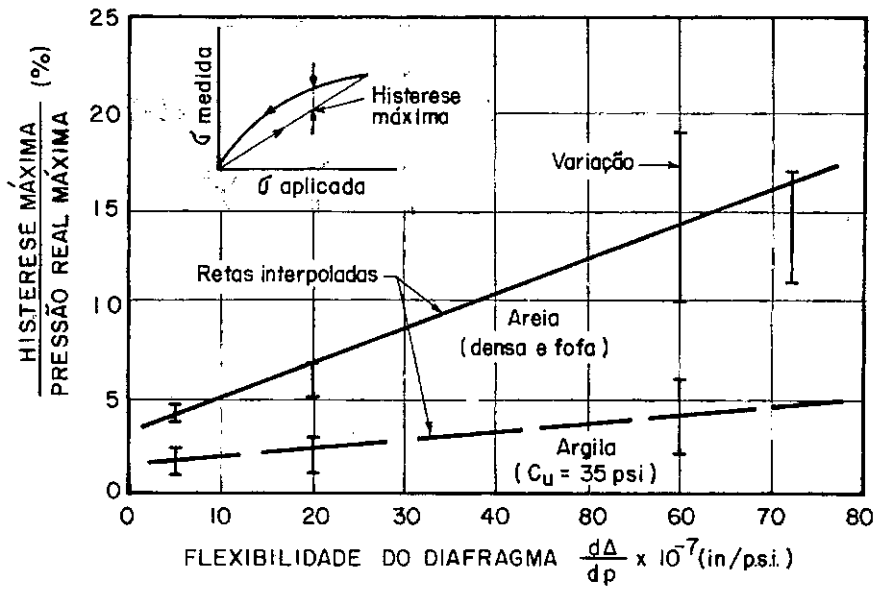


FIG. 34 — Efeito da flexibilidade do diafragma na histerese em areia e argila (LEE, 1968).

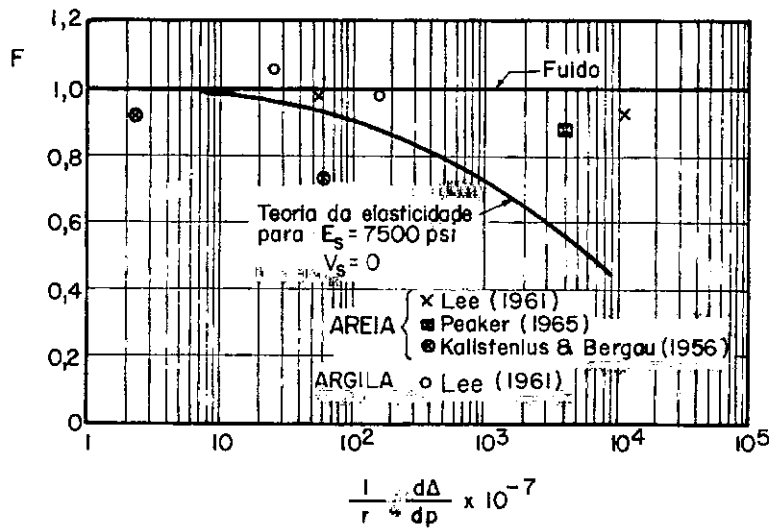


FIG. 35 — Efeito das características do diafragma na calibração em solo (LEE, 1968).

verificou-se menor efeito de histerese em argila. Para solos argilosos, o valor limite da flexibilidade do diafragma pode ser menor que aquele fixado para areia. Lee (1968) considera que o valor máximo para $d\Delta/dp$ para células em argila pode ser da ordem de 1×10^{-4} in/psi ($3,6 \times 10^{-3}$ cm/kgf/cm²).

Como Trollope & Currie (1960) observaram que o efeito da compressibilidade da célula é pequeno, e que o efeito mais sensível é o do movimento do diafragma, Trollope & Lee (1961) concluem que os resultados dos estudos sobre a influência do diafragma para células em fronteira podem ser extrapolados para células em solo.

c) Tipo de Solo

As conclusões de estudos teóricos baseados na teoria da elasticidade só devem ser consideradas do ponto de vista qualitativo, pelo fato do solo não ser um material elástico e do seu módulo de deformação ser função da trajetória de tensões.

A calibração de células sob diferentes pressões aplicadas por variação da camada de areia, feita por Trollope & Lee (1961), forneceu curvas de calibração linear, mas com a declividade da reta diferente da obtida na calibração em fluido. Este fato foi atribuído a variações locais da densidade da areia sobre as células devido a colocação da areia em cada ensaio. Estas pequenas variações de densidade produzem variações significativas no módulo da areia. Este fato faz com que a pressão em um plano horizontal no interior de uma massa de material granular

varie até $\pm 15\%$ da pressão aplicada uniformemente na superfície. Para se obter uma acurácia desejada, deve-se efetuar uma série de ensaios repetidos, e daí se obter uma curva de calibração média, que se aproximará bastante da curva de calibração em fluido. Com este procedimento Trollope & Lee (1961) conseguiram uma curva de calibração em areia cerca de 93% da curva em fluido. A diferença de 7% é atribuída à influência da flexibilidade do diafragma, pois ensaios posteriores com células de diafragmas mais rígidos fizeram com que se atingissem valores próximos de 100%.

O estado de tensão em qualquer solo pode variar quando o solo é sujeito a vibrações. As pressões medidas pelas células podem variar significativamente, e os valores medidos, que eram menores que a pressão no meio, podem passar a ser maiores (Kallstenius & Bergau, 1958).

Além disto, as dimensões dos grãos do solo também exercem influência nos valores medidos. Conforme citação anterior, Kallstenius & Bergau (1958) mostram, teoricamente, que quando se medem pressões com células tipo pistão, para se limitar este erro em $\pm 3\%$, deve-se empregar uma célula tal que o diâmetro médio dos grãos seja inferior a 2% do diâmetro da célula. No caso de células de diafragma, o tamanho máximo dos grãos pode ser pouco maior.

A medida de empuxos de material argiloso sobre estrutura oferece muito menos dificuldade do que em areia (Trollope & Lee, 1961). Já Benkelman & Lancaster (1940) haviam constatado em seus ensaios que, em argilas plásticas, as dimensões físicas

das células não influem significativamente nas pressões medidas. Trollope & Lee (1961) verificaram que o efeito de histerese em argila é muito menor que em areia.

CAPÍTULO IV - COMPORTAMENTO NO CAMPO

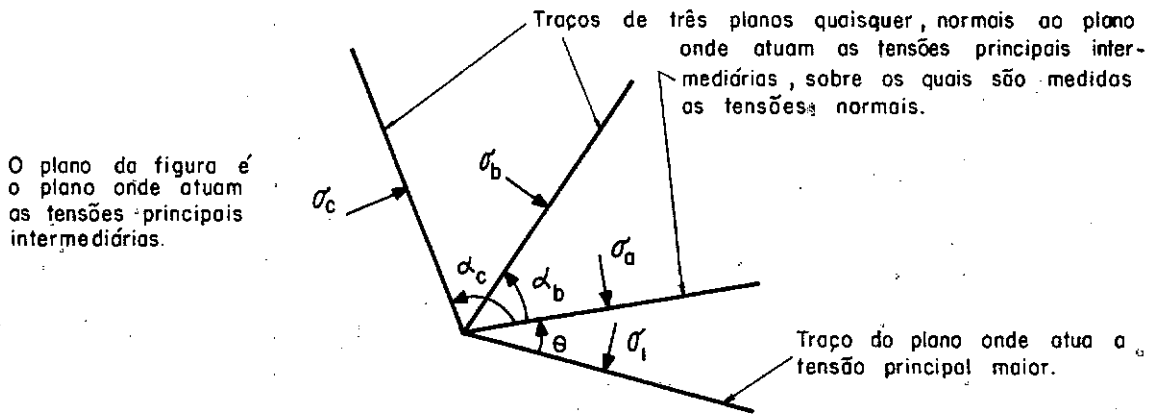
IV. COMPORTAMENTO NO CAMPO

4.1 - Instalações em Solo (aterros e pavimentos)

O estado de tensões em um ponto fica definido quando se conhecem as tensões (normais e cisalhantes) que atuam sobre três planos perpendiculares entre si, que passam pelo ponto. No caso de aterros e pavimentos, por exemplo, em que se pode admitir o estado plano de deformações, a seção transversal coincide com o plano da tensão principal intermediária. Nestes casos, uma célula de pressão total colocada no plano da seção transversal mediria a tensão principal intermediária, e seriam necessárias mais três células de pressão total para caracterizar o estado de tensões no ponto. Estas células devem ser posicionadas segundo três planos distintos e ortogonais ao plano da tensão principal intermediária. A instalação de uma célula em um outro plano, também normal ao plano da tensão principal intermediária, permite fazer uma checagem dos valores medidos. Para facilitar a interpretação dos valores medidos, costuma-se instalar as quatro células a intervalos de 45° .

A solução deste conjunto, ou seja, a determinação dos valores das tensões principais maior (σ_1) e menor (σ_3) e a direção do plano principal maior, deduzida por Taylor (1945), é mostrada na figura 36.

Instalando-se as células a intervalos de 45° , as somas das tensões medidas por células ortogonais entre si ($\sigma_a + \sigma_c$ ou $\sigma_b + \sigma_d$) devem ser iguais. Se houver diferença entre estas somas, a média das somas é o melhor valor ajustado para



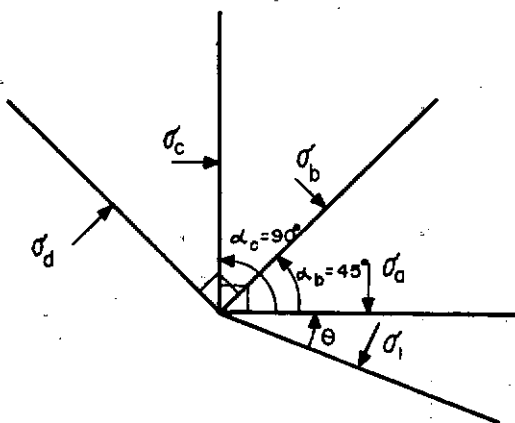
$\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$ — TENSÕES MEDIDAS

α_b, α_c — ÂNGULOS CONHECIDOS.

$$\begin{cases} \sigma_a = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \theta \\ \sigma_b = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 (\theta - \alpha_b) \\ \sigma_c = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 (\theta - \alpha_c) \end{cases}$$

$$\therefore \operatorname{tg} 2 \theta = \frac{2 \operatorname{Sen}^2 \alpha_c (\sigma_a - \sigma_b) - 2 \operatorname{Sen}^2 \alpha_b (\sigma_a - \sigma_c)}{\operatorname{Sen} 2 \alpha_c (\sigma_a - \sigma_b) - \operatorname{Sen} 2 \alpha_b (\sigma_a - \sigma_c)}$$

CÉLULAS INSTALADAS EM PLANOS A INTERVALOS DE 45°



$$\operatorname{tg} 2 \theta = \frac{(\sigma_a + \sigma_c) - 2 \sigma_b}{\sigma_a - \sigma_c}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_c - 2 \sigma_b)^2 + (\sigma_a - \sigma_c)^2}$$

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_a + \sigma_c$$

FIG. 36 — Solução para um conjunto de três células instaladas (Taylor, 1945).

$$(\sigma_1 + \sigma_3) = (\sigma_a + \sigma_c) \text{ (Taylor, 1945).}$$

As células a serem instaladas em aterros ou pavimentos devem ter sua locação, orientação e inclinação perfeitamente determinadas. O contato entre a célula e o solo deve ser íntimo e uniforme em toda a superfície da célula. A instalação deve ser feita de forma que estas condições mantenham-se imutáveis por toda a vida útil da célula.

Para instalação em pavimentos ou em aterros argilosos compactos, o procedimento normal é executar o aterro até ultrapassar a cota de instalação de 0,50 a 0,60m. Então, escava-se um buraco de forma que seu fundo seja plano na cota de instalação. Os taludes laterais devem ser suaves para que não ocorra arqueamento do solo sobre a célula. O WES (1944) sugere inclinações 1:10 (V, H). No entanto, Williams (1970), ao fazer ensaios em molde metálico de grande diâmetro (378mm) com células elétricas (\emptyset 2,5"), encontrou resultados inferiores aos esperados. As células eram instaladas no fundo de escavações tronco-cônicas e o material retirado era recompactado sobre a célula. Isto foi atribuído ao arqueamento do solo sobre a célula e o método de instalação foi alterado. Fez-se uma escavação em forma cilíndrica com o eixo longitudinal na vertical; e os resultados não apresentaram mais problemas. Este procedimento serviu de base para definir a metodologia de instalação no campo. Abria-se um buraco de forma cilíndrica circular de 375mm de diâmetro e a célula, com 63,5mm (2,5") de diâmetro, era instalada no fundo (figura 38).

Para as células a serem instaladas na horizontal, deve-se fazer pequena cavidade no fundo deste buraco, com diâmetro pouco maior que o da célula. Coloca-se areia no interior e

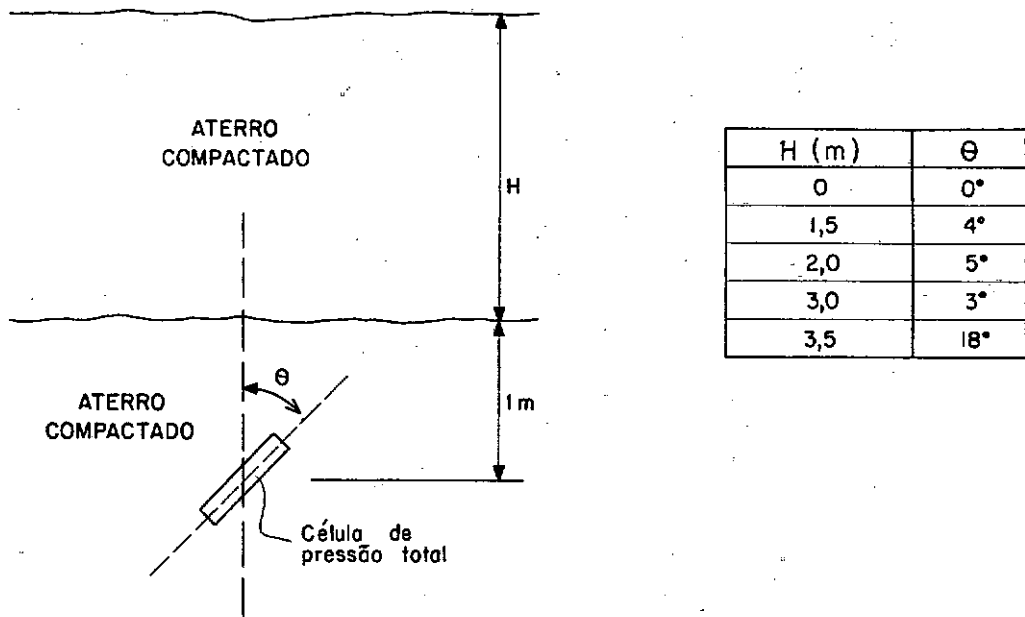


FIG. 37 — Variação medida da orientação de uma célula de pressão total instalada no núcleo de barragem, após compactação do aterro sobrejacente (Di Biagio, 1977).

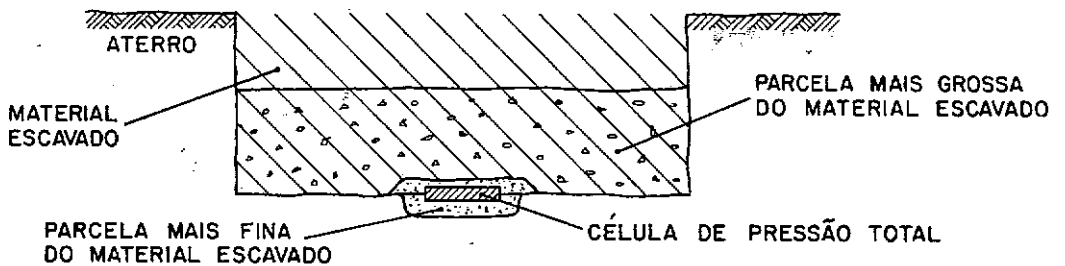


FIG. 38 — Esquema para instalação de células de pressão total em aterros e pavimentos (Williams, 1970).

a célula é posicionada de forma que sua face sensível fique no mesmo nível que o fundo do buraco (Hadala, 1967). A seguir, o solo retirado é recompactado, procurando-se obter a mesma densidade do solo envolvente. Como isto é muito difícil, Taylor (1945) sugere que se faça com que este solo recolocado fique com compressibilidade inferior à do solo envolvente. Assim, o erro de medida será menor do que no caso de o inverso ocorrer.. Taylor (1945) cita uma sugestão do Prof. Arthur Casagrande para instalação de células em barragens. Executa-se o aterro compactado até o nível onde se deseja instalar a célula. Então, coloca-se a célula apoiada na superfície horizontal plana, e solo fofo é colocado sobre ela, estendendo-se a uma distância de 6 a 12m para todos os lados. Esta camada deve ter uma espessura constante, da ordem de duas a três vezes a espessura especificada para compactação da barragem, com fim de evitar danos à célula e cabos conectores durante a compactação. Sugere, também, o uso de rolo compressor mais leve sobre a célula. Não é necessário que esta camada seja compactada ao mesmo grau que o resto da barragem, pois toda a camada ficará com compressibilidade constante, não provocando uma densificação de uma camada junto a área sensível da célula ("pocket action"). O fato da camada ficar com maior permeabilidade ou menor resistência ao cisalhamento não afetará a resistência da barragem como um todo, por serem estas características estritamente localizadas. Taylor, no entanto, não comenta as implicações desta camada ficar mais compressível e em desacordo com sua sugestão anterior.

Em materiais granulares as células devem ser colocadas em uma superfície plana e cobertas normalmente ou por simples colocação da areia ou por lançamento e vibração (Morgan &

Moore, 1968). Hadala e Holden (citados em Morgan & Gerrard, 1968) encontraram melhor repitibilidade em ensaios de laboratório quando as células eram instaladas em areia fofa.

Em materiais granulares grossos, a célula deve ser protegida por um material granular mais fino. Em duas instalações feitas para ensaios no WES (1951), foram usados como camada de proteção, areia em uma das instalações e uma parcela mais fina do material original na outra. Este segundo material forneceu os melhores resultados.

As células para medir tensões horizontais e tensões inclinadas devem ser colocadas em posição no centro da escavação e o solo recompactado manualmente em ambos os lados da célula (Griffith & Woodman, 1948; Wilson & Pimley, 1971). Este procedimento foi adotado pela CESP (1973) para instalar células G18tz1 na Barragem de Terra de Ilha Solteira. Muito cuidado deve ser observado nesta recompactação para que a célula não se desloque. Di Biaggio (1977) instalou, em núcleo argiloso de barragem na Noruega, células com inclinômetros miniatura montados sobre elas, para medir variações de inclinação das células durante a compactação do aterro sobre os instrumentos. O resultado típico obtido com uma célula instalada verticalmente é mostrada na figura 37.

Coppinger (citado em Gerrard & Morgan, 1972) obteve a melhor reprodutibilidade de resultados quando instalou as células inclinadas a 45° em areia sobre suportes especiais de resina Epoxi, eliminando a zona de baixa densidade que poderia se formar sob a célula. Já o WES (1954) utilizou um gabarito especial para instalar as células apoiadas diretamente sobre a areia. No en

tanto, após a aplicação da carga, constatou-se deslocamentos de até 7" (17,8cm) e rotação de até 6° a partir da posição original.

4.2 - Instalações em Fronteiras Solo-Estrutura

A instalação para medir o empuxo do solo sobre fronteira em geral é mais simples. As células devem ser instaladas de forma que sua face sensível fique no mesmo plano da superfície da fronteira solo-estrutura. O apoio da célula na estrutura rígida não deve permitir deslocamento da célula em relação à estrutura.

Em estruturas de concreto podem ser utilizados vários procedimentos. Se a parede não está concretada, fixa-se a célula à forma, com sua face sensível apoiada na forma. Concreta-se a estrutura normalmente, somente evitando-se que os vibradores trabalhem muito próximo à célula (Kruse, 1965). Outro procedimento é fixar, na posição de instalação, um gabarito que deixe um vazio necessário para a posterior fixação da célula. Após a concretagem, a célula é instalada, tomando-se cuidado para que a base da célula fique uniformemente apoiada. O espaço vazio ao redor é preenchido com argamassa (Mellios & Macedo, 1973). Trollope, Speedie & Lee (1963) envolveram a célula com um composto betuminoso. Na barragem de Catagunya (Wilkins, Fitzpatrick & Marshal, 1962, citado em Lee, 1968) anéis metálicos foram concretados nos pontos de medição. Após a concretagem as células foram fixadas a esses anéis.

O aterro junto à célula deve ser feito manualmente, para evitar danos, controlando-se o grau de compactação

(Mellios & Macedo, 1973). De acordo com Lee (1968), melhores resultados serão obtidos quando houver contato direto do aterro argiloso com a face da célula. Assim, a camada arenosa de proteção deve ser evitada.

Caso a parede de concreto já esteja pronta, deve ser feita uma cavidade na posição onde se vai instalar a célula. O fundo desta cavidade deve ser aplainado para receber a célula, de forma que haja contato perfeito em toda a base da célula. Outro procedimento seria fixar a célula por clips e parafusos à superfície da parede. Neste caso, os limites fixados pelas pesquisas anteriores, com respeito ao ressalto formado pela célula sobre a face da parede, devem ser observados.

A medida de empuxos sobre paredes de concreto executados em valas escavadas com bentonita ("slurry trench") é descrita por Uff (1969). Cada célula foi fixada à extremidade do pistão de um "macaco" hidráulico, através de uma esfera. O "macaco" foi preso transversalmente à alma de uma viga metálica fixada na vertical. Antes do início da concretagem foi aplicada pressão no macaco até encostar as células no terreno. Procedimento análogo a este foi utilizado pela COPPE/UFRJ para medir empuxos sobre as paredes diafragma do Metrô/Rio.

As células projetadas pelo NGI (1962) são fixadas às estacas pranchas metálicas por meio de parafusos, antes da cravação das estacas. A célula passa por um furo feito na estaca, de forma que sua face sensível fica no mesmo plano da face da estaca sobre a qual se quer medir os empuxos (Johannessen, 1958).

As células para medir pressão sob laje de fundação são instaladas com sua face sensível em contato íntimo e uniforme com o solo subjacente. Com o auxílio de formas de madeira, a região onde será instalada a célula é deixada sem concreto. A superfície do solo é preparada e a célula é firmemente fixada em posição (Sikso & Johnson, 1964). A seguir preenche-se o espaço com concreto, evitando vibradores próximo à célula. Na laje inferior do Metrô de Berlim (Müller-Haude & Scheibner, 1965), as células Glötzl e suas tubulações foram instaladas em "canais" feitos na laje posteriormente concretados. Neste mesmo programa de medições, empuxos horizontais do terreno sobre estruturas de contenção tipo perfil-pranchão foram medidos com células Glötzl. As células foram fixadas à face externa dos pranchões antes de serem posicionadas entre os perfis.

CAPÍTULO V - EXPERIÊNCIA DA COPPE/UFRJ

V. EXPERIÊNCIA DA COPPE/UFRJ5.1 - Instrumentações Executadas

Com a construção do Metrô - Rio, a COPPE tem sido chamada a colaborar no sentido de estudar e acompanhar o comportamento das estruturas de contenção das escavações para construção da galeria enterrada, abrangendo pesquisas em laboratório, estudos analíticos de situações especiais da obra e instrumentação de vários trechos para verificação da segurança da obra. Além destes serviços duas seções transversais da linha do Metrô, uma no lote 3, próxima à rua Uruguaiana, e outra no lote 9, em Botafogo, foram instrumentadas para estudo dos critérios de cálculo e dimensionamento das estruturas de contenção. Este trabalho tornou-se viável pelo fato de o perfil geotécnico nestes dois trechos apresentarem camadas bastante espessas de argila de baixa resistência. Neste tipo de terreno não se tem um conhecimento preciso do desenvolvimento de empuxos sobre a estrutura de contenção. Em ambas as seções instrumentadas, várias células de pressão total foram instaladas. Descrição do funcionamento, calibração, instalação e comportamento durante a obra serão vistos com alguns detalhes nos próximos capítulos.

No lote 3, próximo à rua Uruguaiana, onde está situada a primeira seção instrumentada, o perfil geotécnico apresenta uma camada de argila orgânica mole entre 9,5 e 18,5m de profundidade (fig.39). Subjacente a esta camada existe uma camada de argila siltosa até 26,5m de profundidade. Acima e abaixo destas camadas o solo é arenoso. Neste trecho a contenção da vala é em paredes diafragma com 1,0m de espessura e 20,0m de profundidade, com três níveis de escoramento em perfis metálicos.

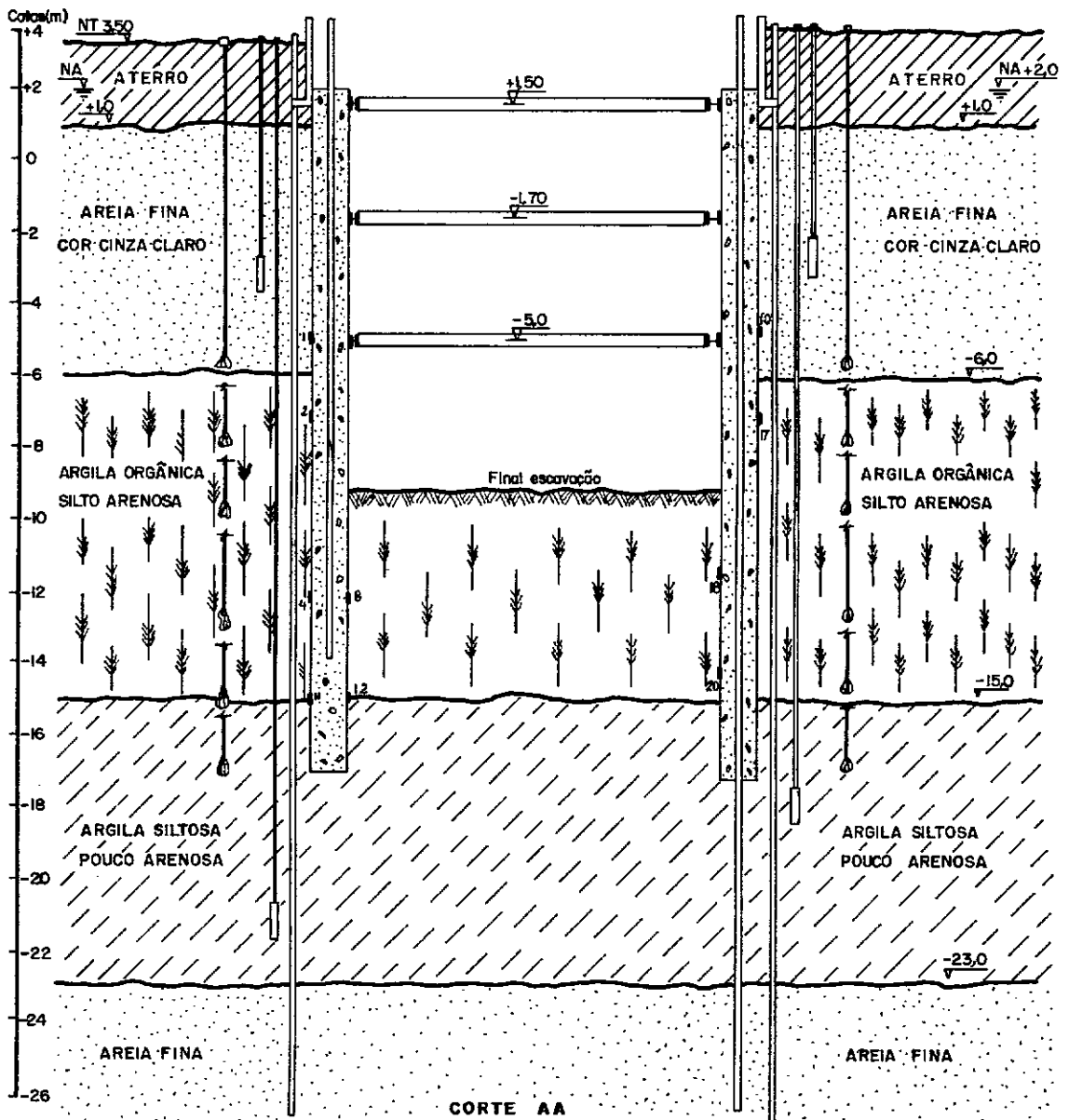
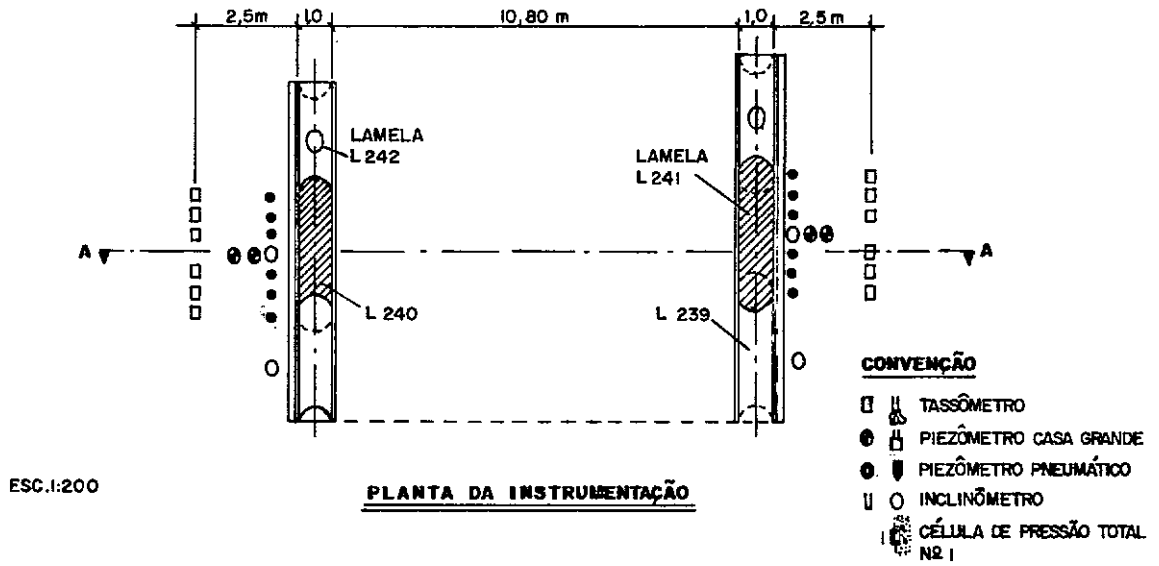


Fig.39 — Localização da instrumentação no lote 3 (Uruguaiana).

Foram instalados, em duas lamelas da parede diafragma, uma de cada lado da vala, extensômetros para medir a deformação do concreto e a carga na ferragem principal, e células de pressão total. Próximo a estas lamelas, no solo, foram instalados inclinômetros, tassômetros e piezômetros.

A segunda seção instrumentada está localizada no lote 9, em Botafogo. Neste trecho, existe uma camada de argila silto-arenosa de resistência variável entre 7,0 a 25,0m de profundidade (fig. 40). Acima desta camada encontra-se areia fina e média, e abaixo, areia grossa com pedregulho. A contenção da vala é em paredes diafragma com 1,20m de espessura e até 30,0m de profundidade, escoradas em dois níveis de estroncas metálicas. Em uma lamela desta parede foram instaladas células de pressão total e extensômetros para medir a deformação do concreto e a carga na armação. Foram instalados, também, piezômetros, tassômetros e inclinômetros no solo e pinos de recalque nos prédios próximos e ao longo da parede diafragma.

Além destas instrumentações, a COPPE, em convênio com o IPR/DNER, projetou e instrumentou um trecho experimental de pavimento, com vários subtrechos de diferentes estruturas, no qual também foram instaladas células de pressão total. A análise final do comportamento destes instrumentos ainda não foi levada a efeito, mas as primeiras conclusões indicam, a princípio, que o projeto de célula desenvolvido ou sua instalação não foi satisfatório.

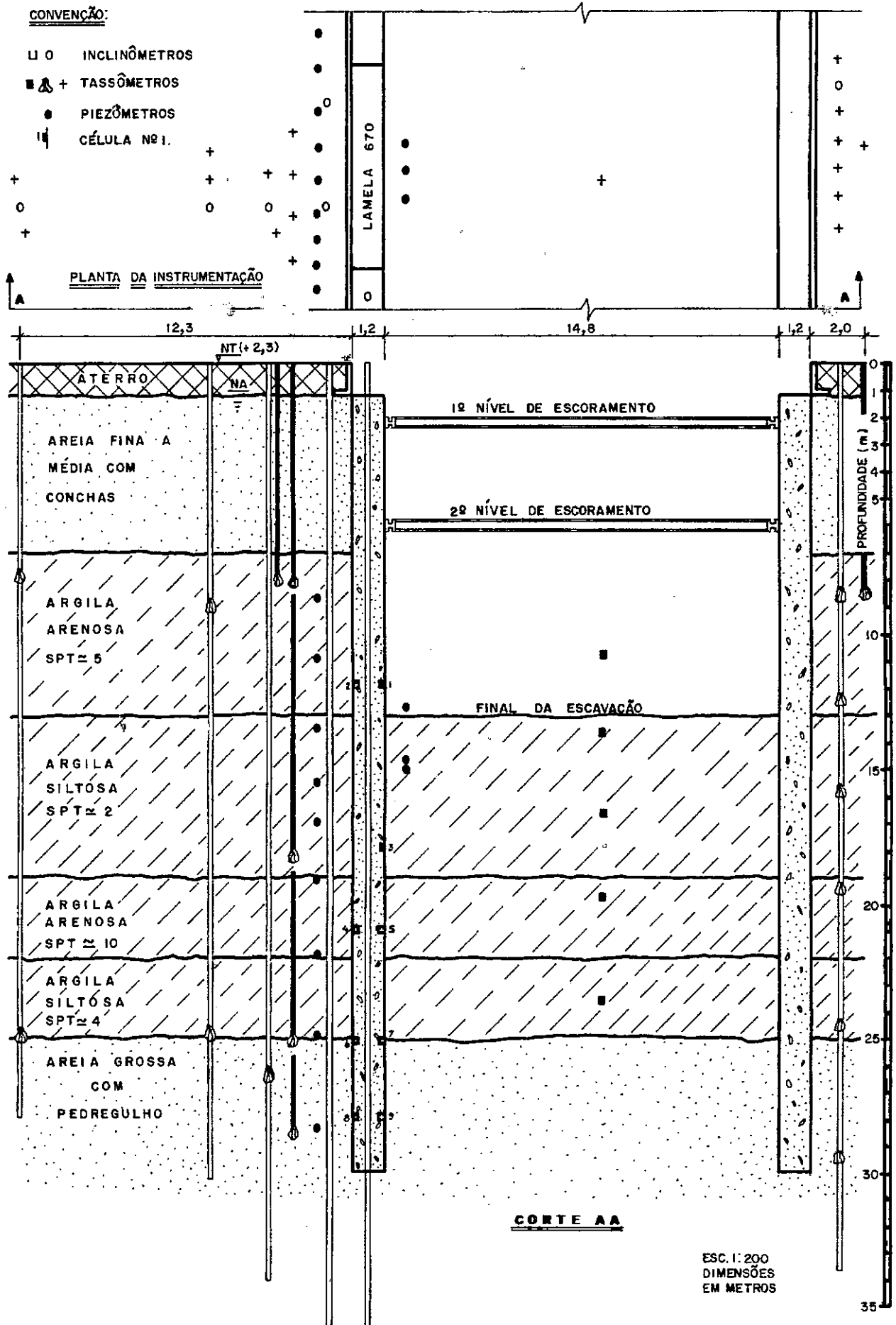


Fig. 40 — Localização da instrumentação no lote 9 (Botafogo).

5.2 - Células de Pressão Total Utilizadas

5.2.1 - Descrição e Calibração

a) Célula tipo diafragma apoiado com transdutor hidráulico contra-pressão

As células instaladas na seção do lote 3 foram fabricadas pelo "Centre d'Études et de Construction de Prototypes de Nantes" (França). Têm 230mm de diâmetro e 6,65mm de espessura (fig. 41 e foto 1). Podem medir pressões de até 6,0 kgf/cm² com uma precisão de $\pm 1\%$ do seu valor nominal.

Em uma placa circular rígida de 6,5mm de espessura são feitos dois orifícios, um central e outro lateral, aos quais são ligados tubos de nylon. Sobre esta placa é fixado, por meio de um anel rígido com 3,0mm de espessura e 19,5mm de largura, um fino diafragma de aço inoxidável de 0,15mm de espessura. Portanto a face sensível da célula fica com 191,0mm de diâmetro. A pressão de solo faz com que o diafragma vede o orifício central. Pelo orifício lateral é injetado um fluido (nitrogênio ou CO₂) com pressão crescente e controlada por um manômetro. Com isto, a pressão de solo é equilibrada, afastando o diafragma da placa rígida e permitindo o retorno do fluido pelo orifício central, cuja vazão é então medida.

Para a calibração destas células foi construído um recipiente, no interior do qual, cada célula foi colocada. O recipiente foi preenchido com água, aplicaram-se ciclos de pressão conhecida e fez-se a leitura na célula. Constatou-se que,

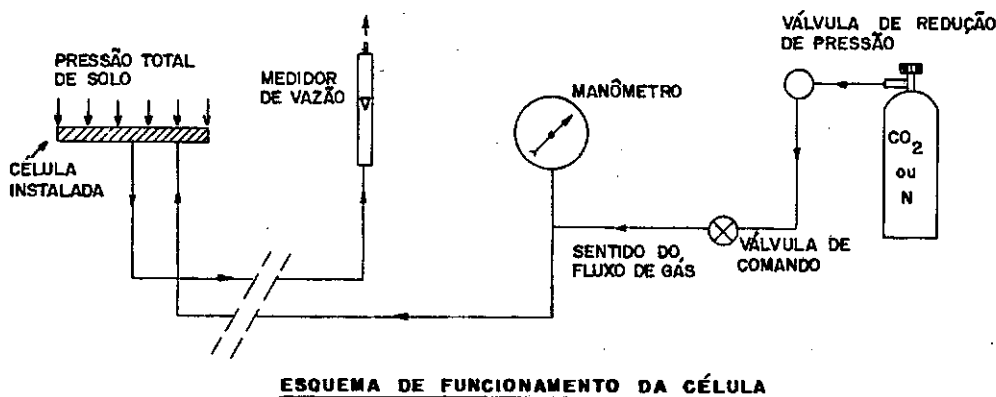
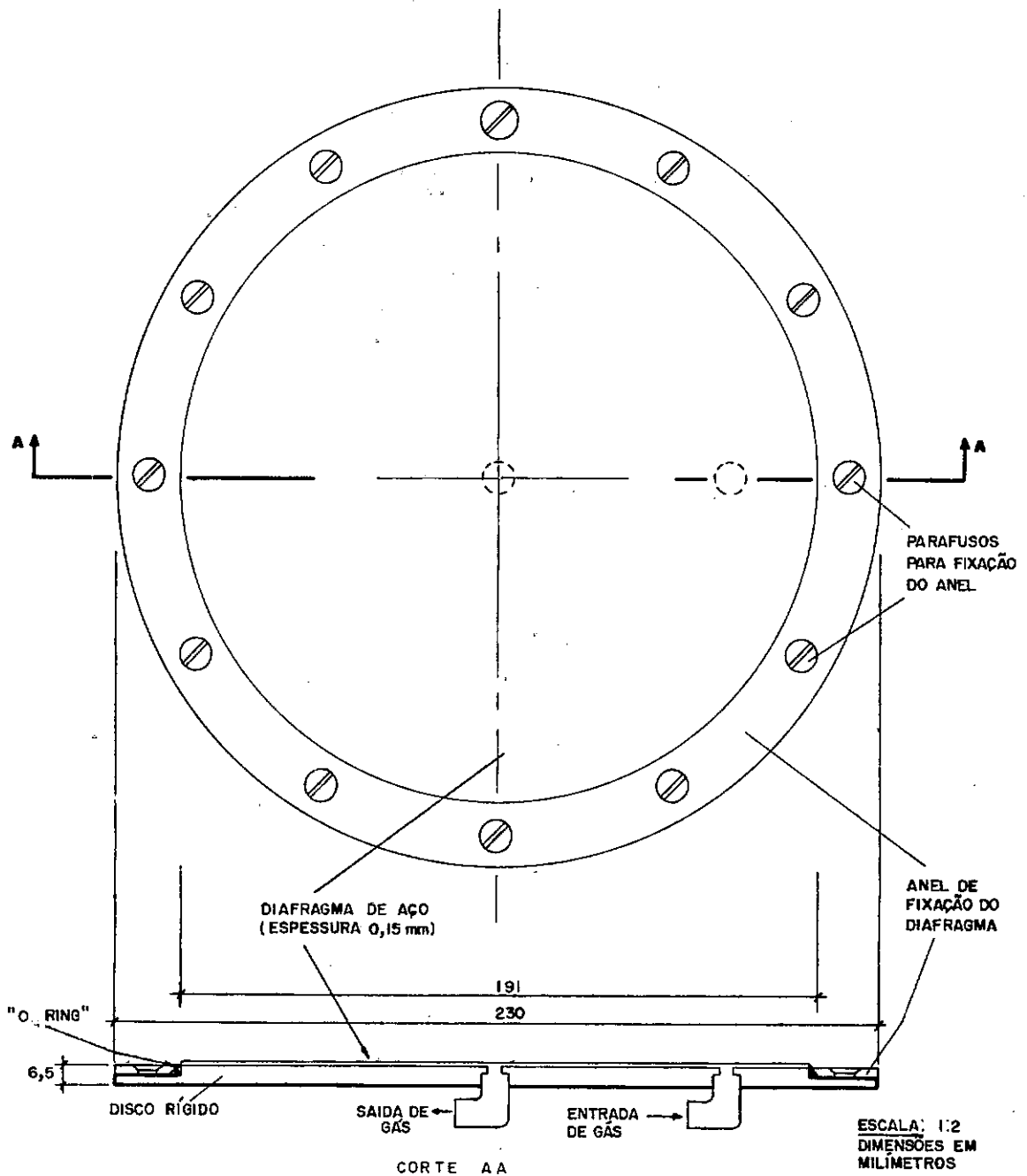


Fig. 41 — Célula de pressão total tipo diafragma apoiado com transdutor hidráulico contrapressão e esquema de funcionamento.

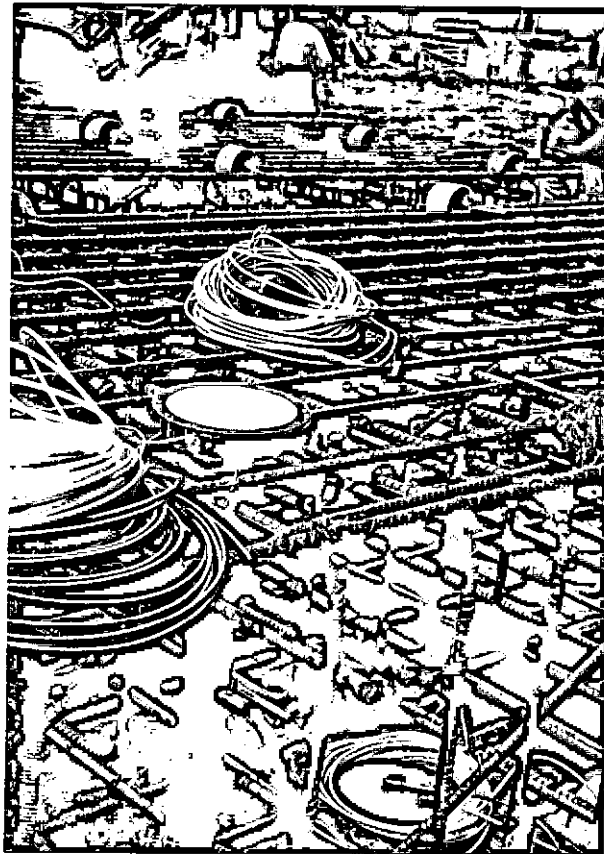


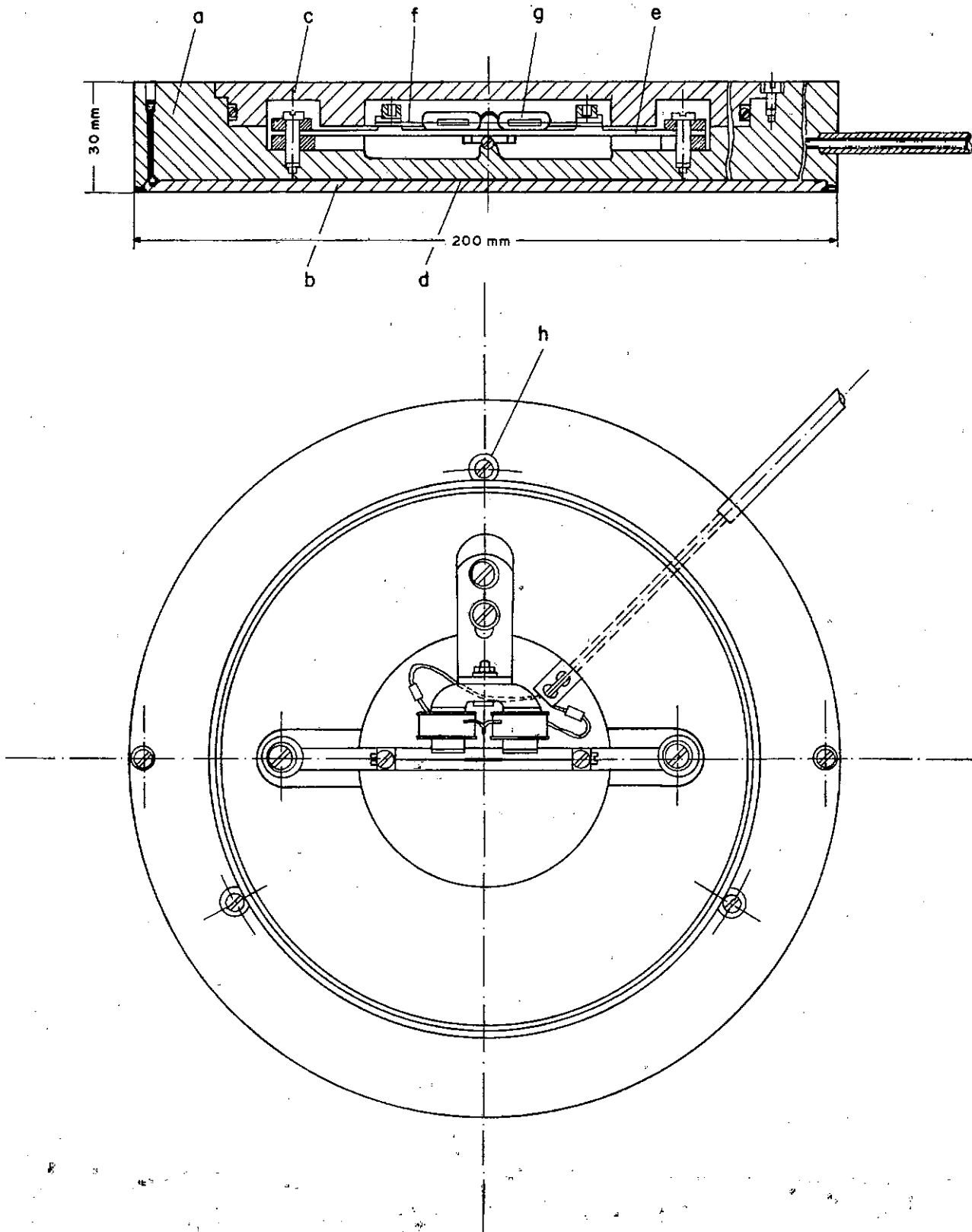
Foto 1 (Uruguaiana) - Célula de Pressão Total Fi
xada ao Macaco.

com uma vazão de retorno do fluido de 5,0 litros/hora, a pressão no manômetro da célula era igual à pressão d'água. Com isto, eliminou-se a necessidade de qualquer correção devido a perdas de carga no circuito. Como o fluido utilizado nas medidas é nitrogênio ou CO₂ não foram necessárias correções quanto à altura da coluna de gás e à influência da temperatura.

b) Células tipo fluido confinado com transdutor acústico

No lote 9, em Botafogo, foram instaladas células de pressão total fabricadas pela Maihak (Alemanha). Suas dimensões externas são: 200mm de diâmetro e 30mm de espessura (fig.42 e foto 2).

Ao corpo da célula é fixado um diafragma, formando uma câmara estanque de pequena espessura, a qual é preenchida com mercúrio. Quando a pressão atua sobre a face da célula, a pressão do fluido é alterada. Um segundo diafragma, de menores dimensões, construído no corpo da célula, em contato com o fluido, deforma-se com a variação da pressão, fazendo fletir uma viga fixada ao corpo da célula. Sobre esta viga está preso um fio metálico sob tensão (corda vibrante), que tem uma determinada frequência natural de vibração ao ser excitado por um magneto. Quando ocorre a flexão da viga, a tensão da corda metálica é alterada, o que faz variar a sua frequência natural de vibração. Esta variação é relacionada, por calibração, à variação de pressão atuante. O equipamento de leitura, fornecido pelo fabricante, transforma a frequência de vibração em uma corrente elétrica, registrando no mostrador digital um valor em miliamperes. Com is-



a - CORPO DA CÉLULA
b - DIAFRAGMA
c - TAMPA
d - MERCÚRIO

e - VIGA DE SUPORTE DA CORDA VIBRANTE
f - CORDA VIBRANTE
g - MAGNETO
h - PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA TAMPA

FIG. 42 — Esquema da célula de pressão total tipo fluido confinado com transdutor acústico.

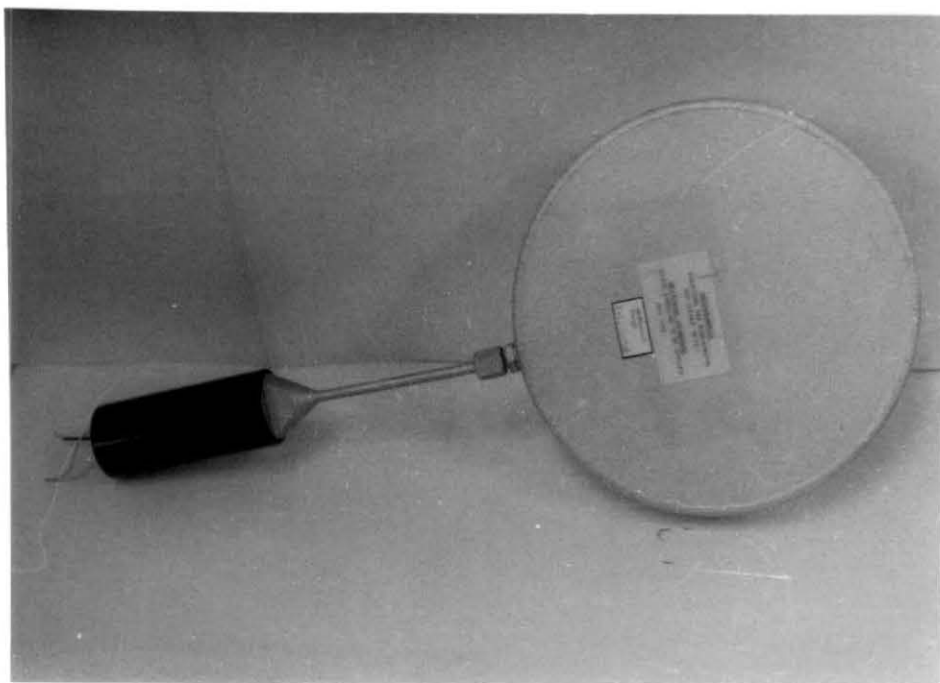


Foto 2 - Lote 9 (Botafogo) - Célula de Pressão Total Tipo Fluido Confinado Acústico.

to, obtêm-se linearidade entre a pressão e a variação deste valor lido.

Cada célula foi calibrada individualmente pelo fabricante sob pressão de fluido, obtendo-se uma constante de calibração.

No laboratório da COPPE elas foram recalibradas em areia fina uniforme ($D_{10} = 0,077$; $U = 2,1$) no dispositivo mostrado na figura 43. A superfície interna do cilindro metálico foi coberta por uma camada de vaselina e separada da areia por finas folhas de material plástico, com o objetivo de eliminar o atrito nas paredes da câmara de ensaio. A areia foi lançada do topo do cilindro, sem compactação, até atingir espessura desejada. A pressão na superfície da camada de areia foi aplicada por meio de uma placa rígida com 26,68cm de diâmetro.

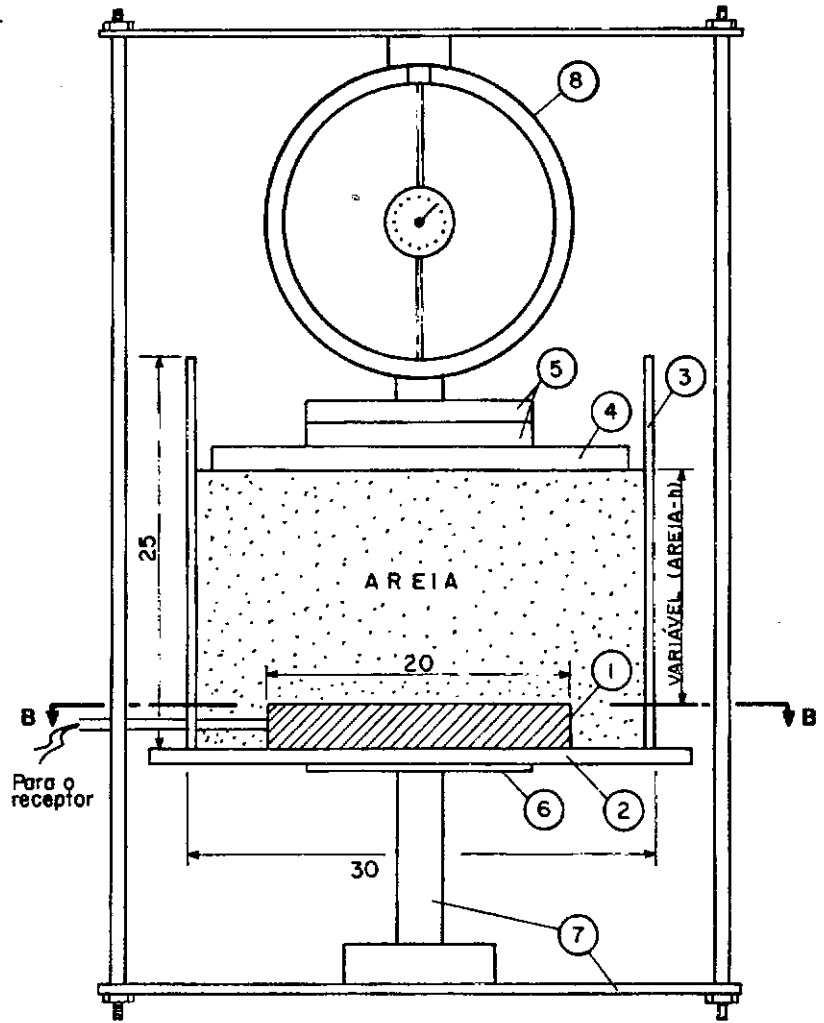
Nas figuras 44 e 45 estão representadas as curvas de calibração de uma célula, de acordo com a metodologia descrita acima. Esta célula foi instalada na parede diafragma, e após a escavação ter atingido a profundidade máxima, ela foi retirada e novamente ensaiada no dispositivo citado. Observou-se então que havia ocorrido um deslocamento do zero desta célula. As curvas da figura 44 foram obtidas com a célula simplesmente apoiada sobre a base da câmara de ensaio, fazendo variar a espessura da camada de areia acima da célula. Para se obter as curvas da figura 45, a célula foi apoiada sobre a base da câmara de ensaio e envolvida por parafina até o nível de sua face sensível.

Ao se fazer variar a altura da camada de areia a-

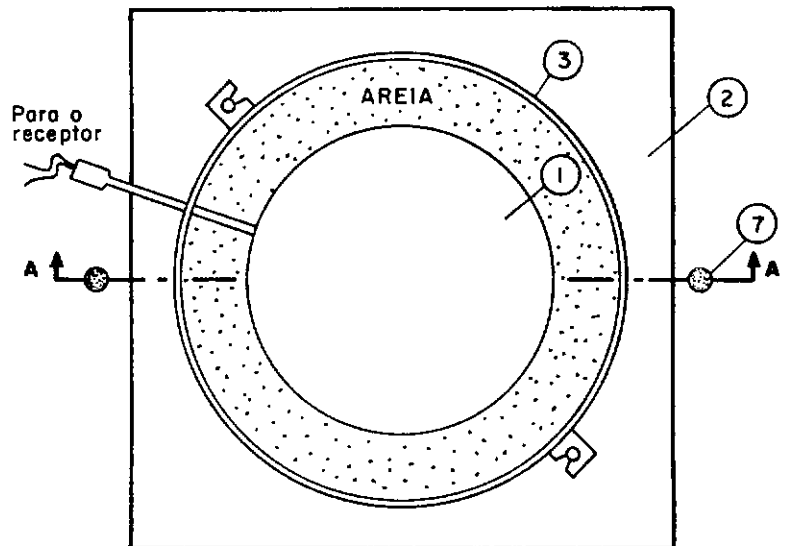
- 1 CÉLULA DE PRESSÃO TOTAL
- 2 PLACA DE APOIO
- 3 CILINDRO METÁLICO
- 4 PLACA DE CARGA
- 5 PLACAS ENRIJECEDORAS
- 6 PLACA DE APOIO
- 7 PRENSA
- 8 ANEL DINAMOMÉTRICO

Esc: 1:5

Dimensões em cm



CORTE AA



CORTE BB

FIG. 43 - Câmara para ensaio com as células de pressão total instaladas no Lote 9.

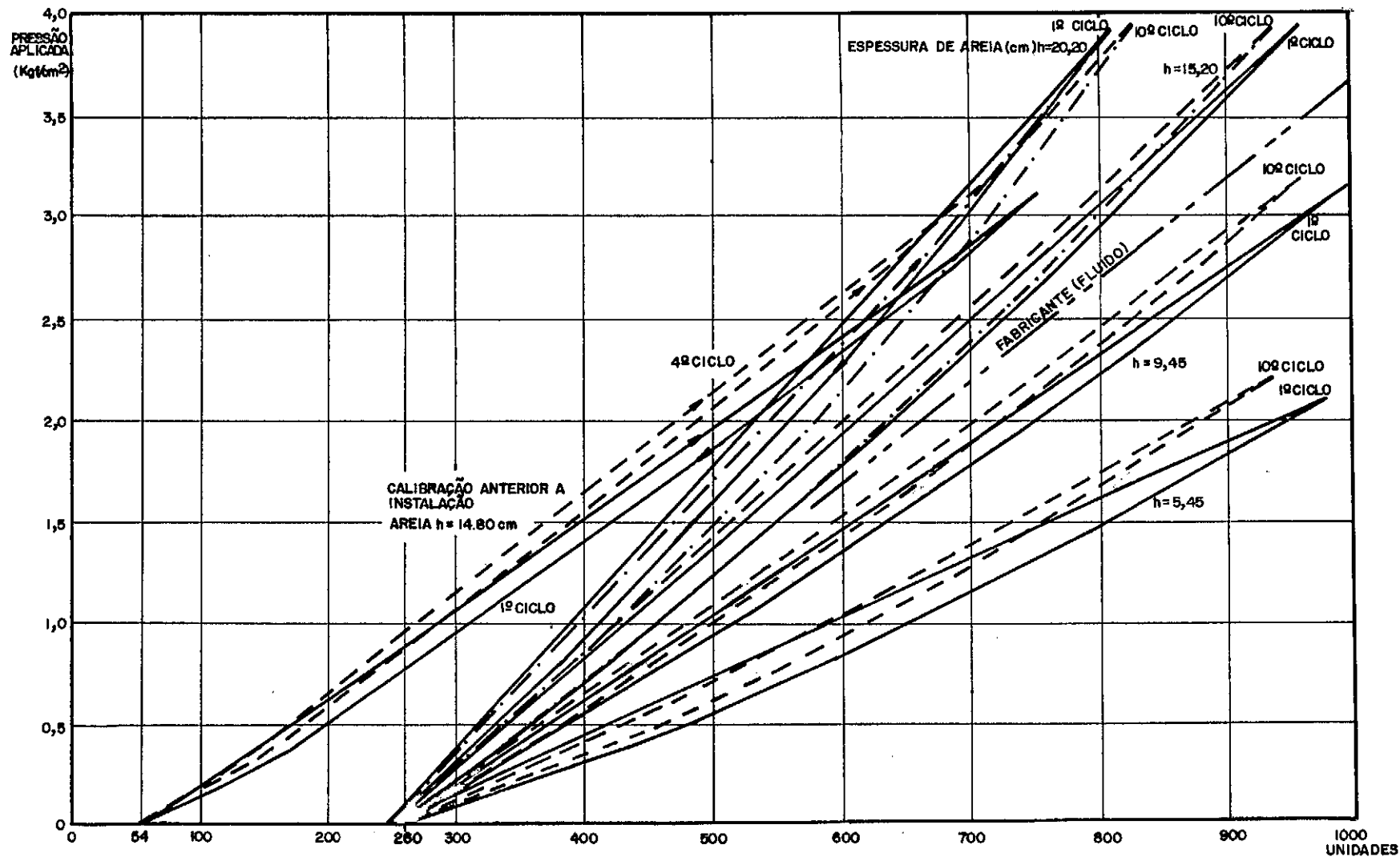


Fig. 44 — Curvas de calibração da célula de pressão total apoiada sobre a base.

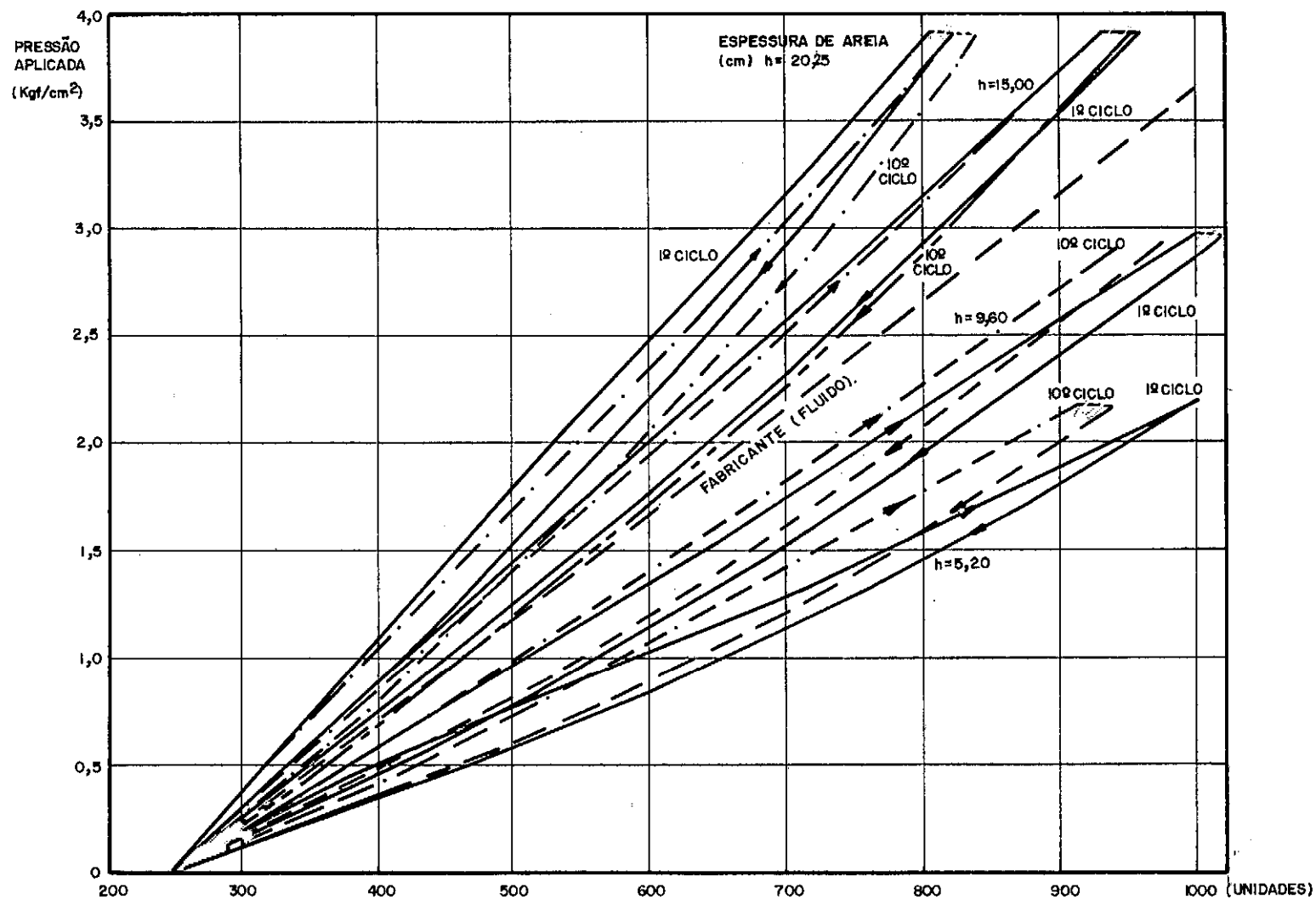


Fig. 45 — Curvas de calibração da célula de pressão total envolta por parafina.

cima da célula, observou-se, como era de se esperar, que quanto maior a altura da areia, menor o valor da leitura da célula, para uma mesma pressão aplicada na sua superfície (figuras 46.a e 47.a), com uma tendência a tornar-se independente da espessura de areia. Observa-se, também, que para as menores espessuras de areia, a leitura da célula, para uma mesma pressão aplicada na superfície, diminui com a aplicação sucessiva de ciclos de carregamento (figuras 46.b e 47.b). Este fato ocorre devido ao aumento progressivo da densidade da areia, elevando seu módulo de elasticidade. Esta tendência inverte-se à medida que aumenta a espessura da camada de areia.

A interseção entre as diversas calibrações efetuadas com a calibração em fluido (fabricante) ocorre para uma espessura de areia em torno de 13,0cm (figuras 46.a e 47.a). Este fato mostra que para esta espessura a pressão sobre a célula é igual à pressão aplicada na superfície da camada de areia. As figuras 46.b e 47.b indicam que para esta espessura não deve haver influência apreciável do número de ciclos de carregamento, pois que, como já salientado, o efeito do ciclo de carregamento inverte-se para uma espessura de areia também em torno de 13,0cm. Estas observações sugerem que para as condições de ensaio a espessura de areia de 13,0cm faz com que os diversos fatores que influem na calibração (atritos, arqueamento, distribuição de tensões...) se compensem.

A partir das calibrações em areia feitas com todas as células utilizadas nesta instrumentação, foi possível traçar o gráfico da figura 48. O valor de F é a relação entre a constante de calibração em areia e a em fluido (esta obtida pelo fa-

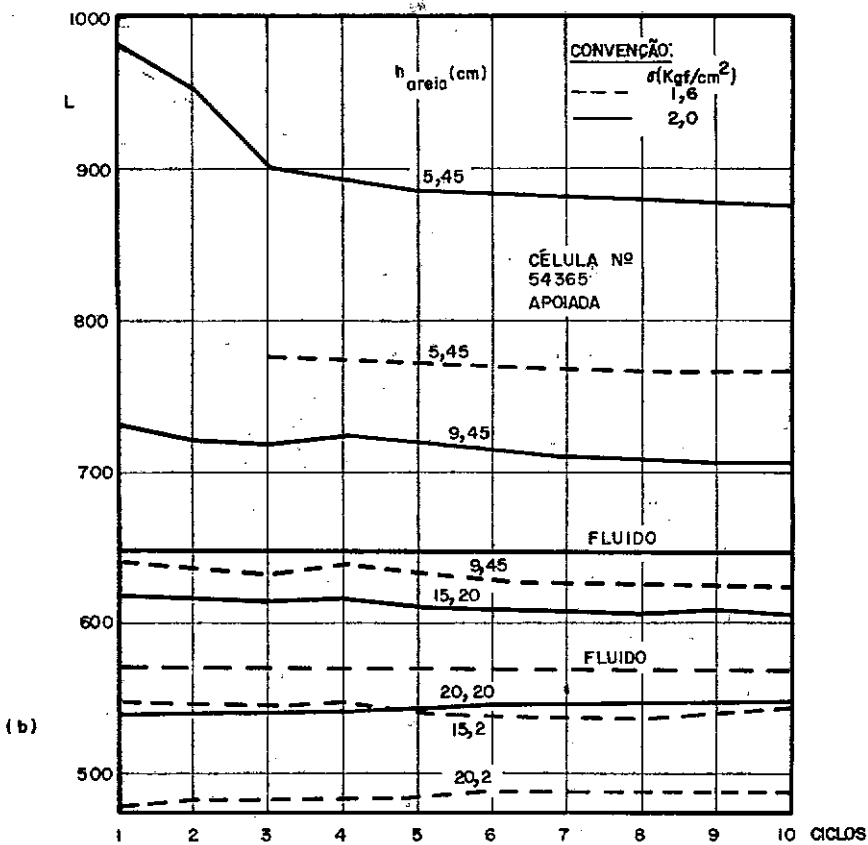
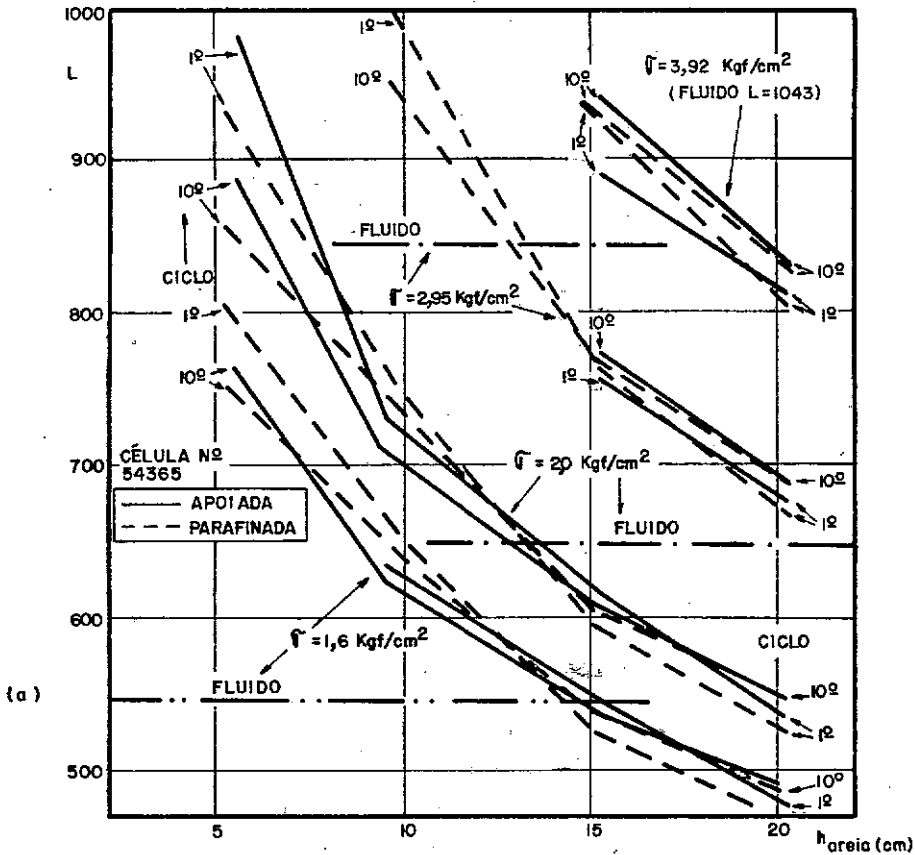


Fig. 46 — Influência da espessura da areia nas leituras com $\sigma=1,6$; 2,0; 3,0 e 4,0 kgf/cm^2 aplicada na superfície da areia.

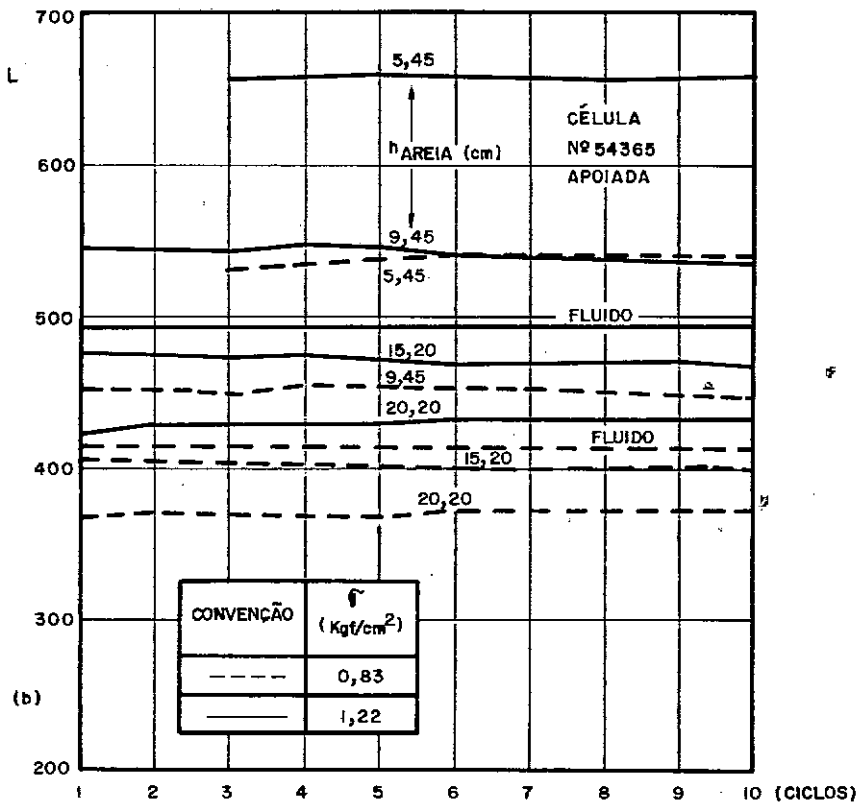
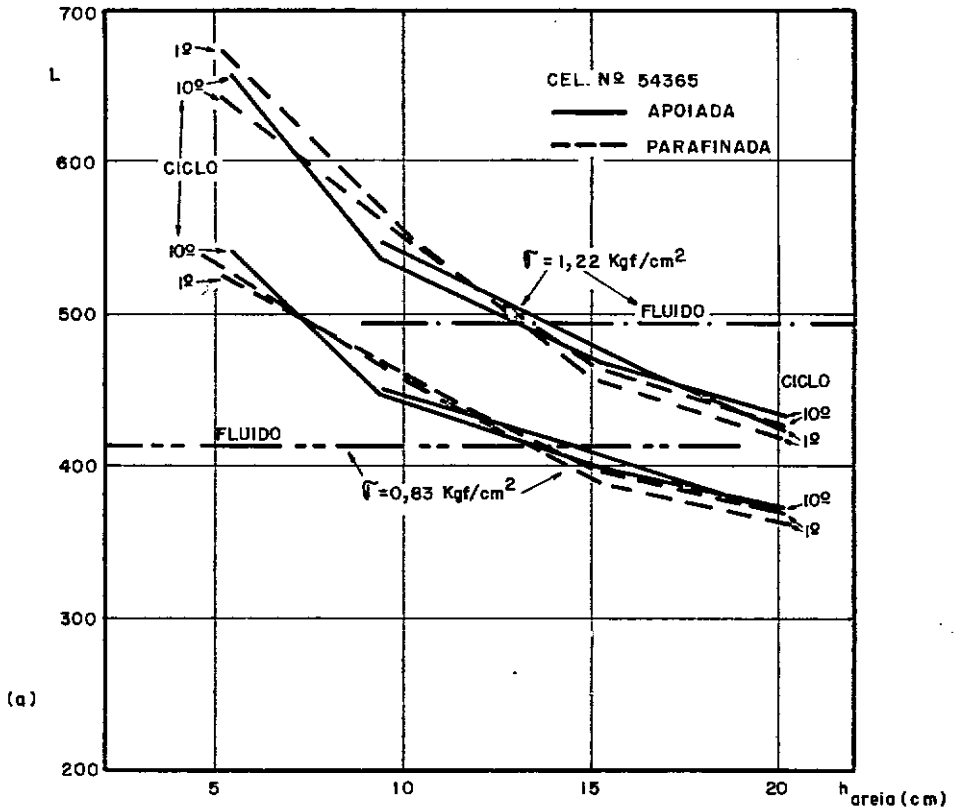


fig. 47 — Influência da espessura de areia nas leituras com $f = 0,83$ e $1,22 \text{ kgf/cm}^2$ aplicado na superfície da areia.

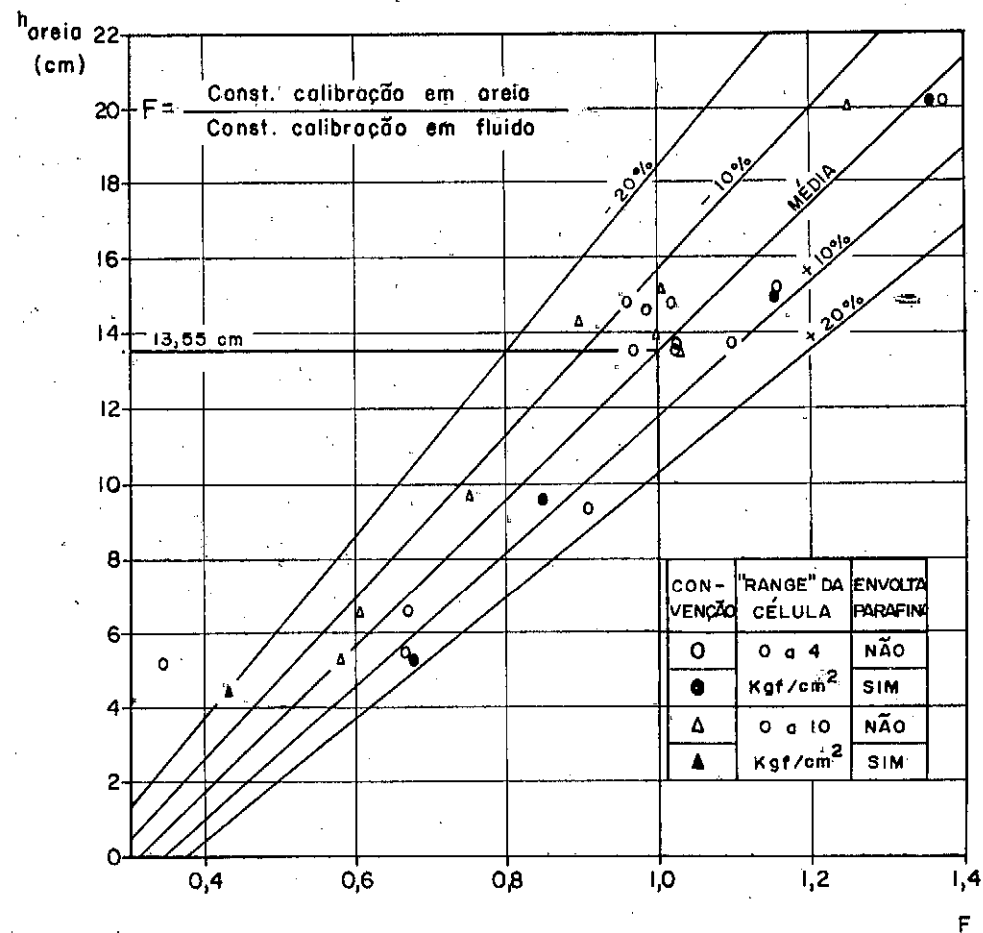


FIG. 48 — Variação de F com espessura de areia acima da célula.

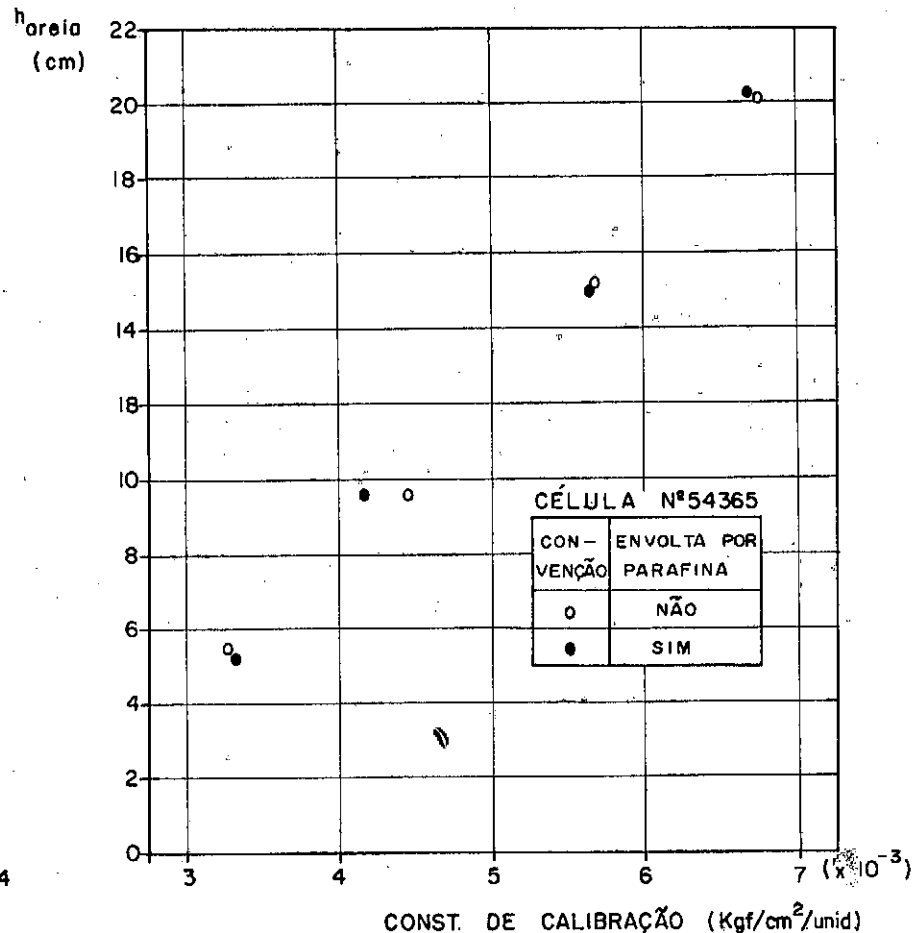


FIG. 49 — Variação da constante de calibração para célula formando e não formando resalto.

bricante). Nesta figura foi interpolada uma reta (média) pelo método dos mínimos quadrados e traçadas as retas correspondentes às variações de 10 e 20% do valor de F, em relação à média obtida.

Observa-se que a igualdade de calibrações ($F = 1$) seria obtida com uma camada de areia com 13,5cm de espessura, para as condições de ensaio adotadas.

Apesar de esta célula apresentar, quando apoiada sobre a base da câmara de ensaio, uma relação diâmetro - ressalto de 6,7, portanto bastante inferior ao valor 30 preconizado pelo WES (1944), não foi constatada diferença sensível entre as calibrações com a célula envolta por parafina e simplesmente apoiada, como pode-se ver na figura 49.

Em cada ciclo de carregamento no ensaio com a célula envolta por parafina, a carga máxima aplicada na superfície da areia foi mantida constante por um determinado tempo. Na figura 50 é mostrada a variação do comportamento da célula para os diferentes ciclos, com o tempo em que a carga permaneceu constante. Observa-se que as leituras sempre aumentaram com o tempo em cada ciclo, independentemente da espessura da camada de areia acima da célula. No entanto, quanto maior a espessura de areia, menor a variação da leitura com o tempo.

5.3 - Instalação e Valores Medidos

5.3.1 - Lote 3 (Rua Uruguaiana)

A parede diafragma para contenção da escavação é

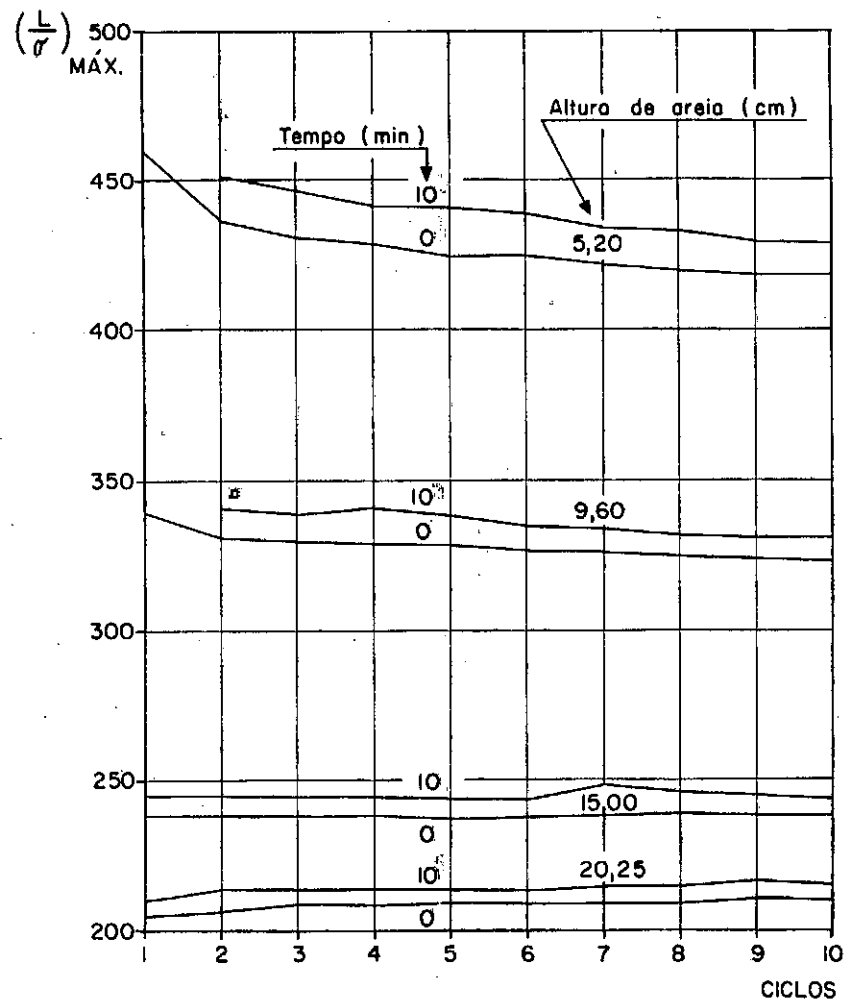
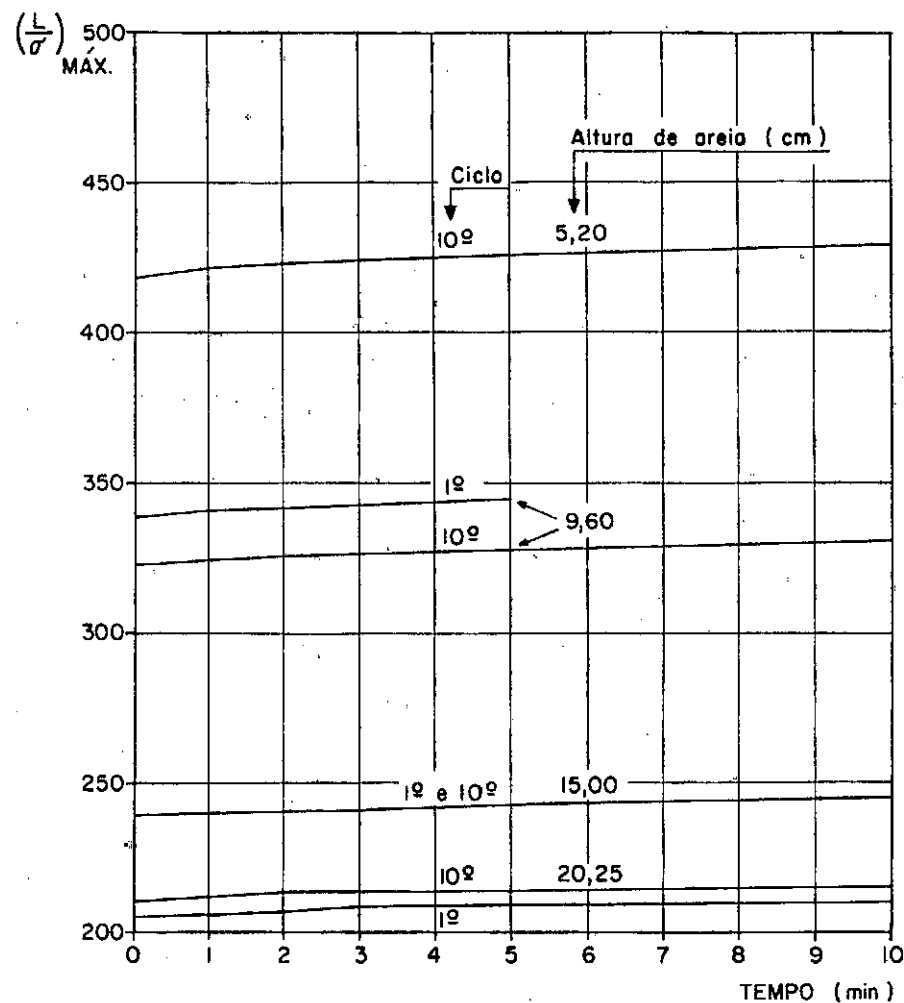


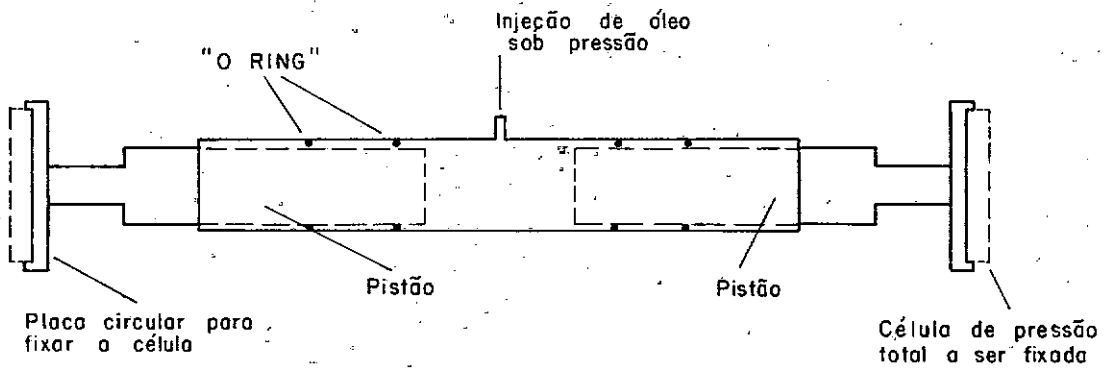
FIG. 50—Influência do tempo de aplicação de carga e dos ciclos de carregamento na calibração da célula nº 54365 envolta por parafina.

construída em lamelas sucessivas, concretadas "in situ" em uma vala escavada nas dimensões projetadas e preenchida com bentonita, após a colocação, na vala, das armaduras ("gaiolas") que são montadas no canteiro de obra.

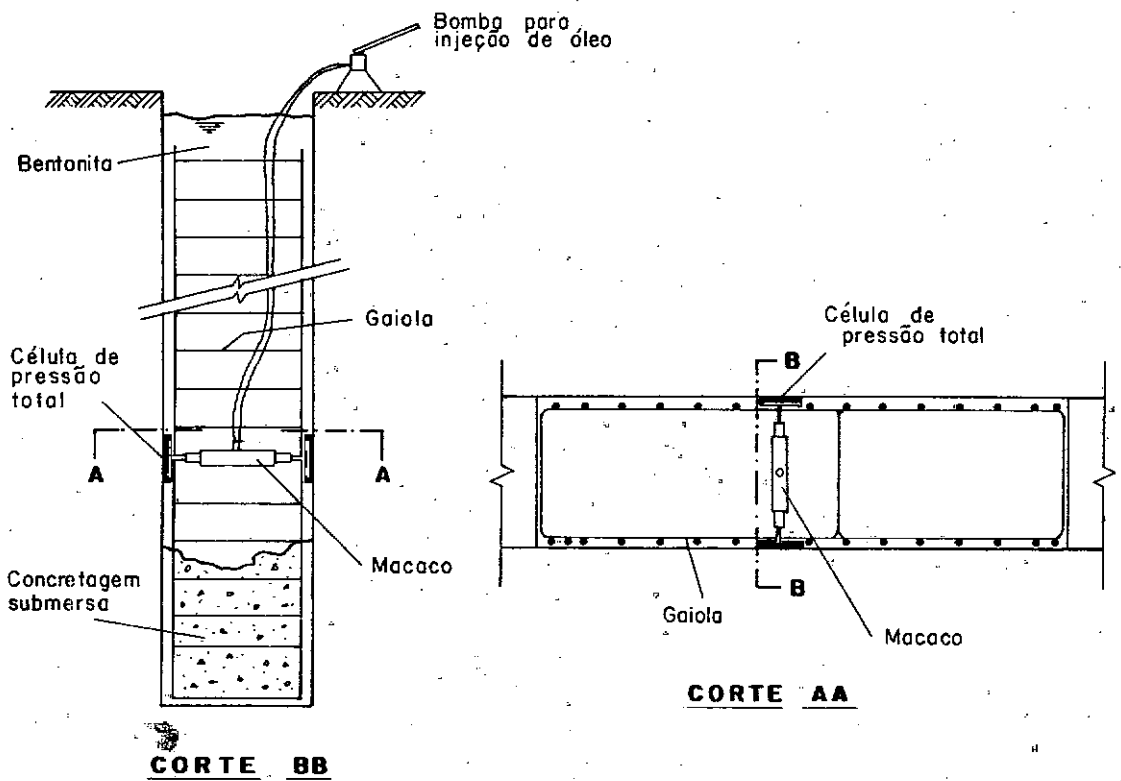
Desta forma, torna-se impossível o acesso ao local de instalação das células. Foi necessário, então, utilizar um dispositivo auxiliar que permitisse fixar a célula em posição e fazê-la encostar no terreno, evitando a penetração, durante a concretagem, de argamassa de cimento entre a face sensível da célula e o terreno. O dispositivo projetado consta de um cilindro oco de aço (fig. 51), no interior do qual deslocam-se dois pistões, quando se injeta óleo sob pressão no cilindro. Na extremidade de cada pistão é fixado, por meio de uma rótula, uma placa circular de aço. Estes dispositivos, chamados de macacos hidráulicos, foram presos à ferragem ("gaiola") da lamela nas posições desejadas, transversalmente ao eixo vertical da gaiola. As células de pressão total foram soldadas, em dois pontos, à placa circular. Após o posicionamento da gaiola, injetou-se óleo sob pressão no interior do macaco, pressionando as células contra a superfície vertical da escavação.

A rótula de ligação permitia, caso necessário, uma rotação da célula, de modo a que melhor se adaptasse à superfície lateral da lamela escavada.

Na instrumentação do lote 3 foram instaladas 10 células em duas lamelas, uma de cada lado da escavação, nas posições mostradas na figura 39. Após o posicionamento da gaiola,



Esquema do macaco para instalação das células.



Esquema do posicionamento do macaco fixado a gaiola da lamela instrumentada.

FIG. 51 - Instalação das células de pressão total na lamela instrumentada.

quando as células ficaram imersas somente em bentonita, observou-se seu bom funcionamento pelas leituras feitas (fig.52.a). A pressão atuando em cada célula nesta etapa era somente devido à altura de bentonita acima da célula. Da declividade da reta ajustada obtém-se para o peso específico da bentonita o valor de $0,97 \text{ tf/m}^3$.

As lamelas instrumentadas foram concretadas em Junho/1976 e a escavação da vala na seção só começou em Setembro/1977. Neste período, quatro das células instaladas deixaram de dar leituras, devido a entupimentos e rupturas irreversíveis nos tubos de injeção de gás. Das outras seis, duas (células nºs 4 e 10) apresentaram aumento inesperado da pressão medida (fig.52.b) e as demais apresentaram uma redução dessas pressões medidas. As pressões medidas pela célula 4 tornaram-se excessivamente elevadas, levando a concluir que provavelmente esta célula não estava em contato com o solo.

Também observa-se que as pressões medidas por esta célula aumentaram durante o período de escavação da vala, apesar de a parede ter se deslocado para o interior da vala. As pressões medidas pelas células 1, 10 e 17 diminuíram neste período, aproximando-se do valor estimado para o empuxo ativo (na camada de argila, calculado com resistência não drenada) nas profundidades de instalação.

As células medindo o empuxo passivo do solo (números 8 e 18) também mostraram uma redução da tensão horizontal, devido à escavação da vala. Logo, a tensão vertical da camada argilosa decresceu até um valor pouco superior àquele equivalente à altura de solo acima da célula, considerando a escavação no seu estágio final.

PRESSÕES MEDIDAS EM
BENTONITA.
(LAMELA 241)

PRESSÕES MEDIDAS APÓS INSTALAÇÃO

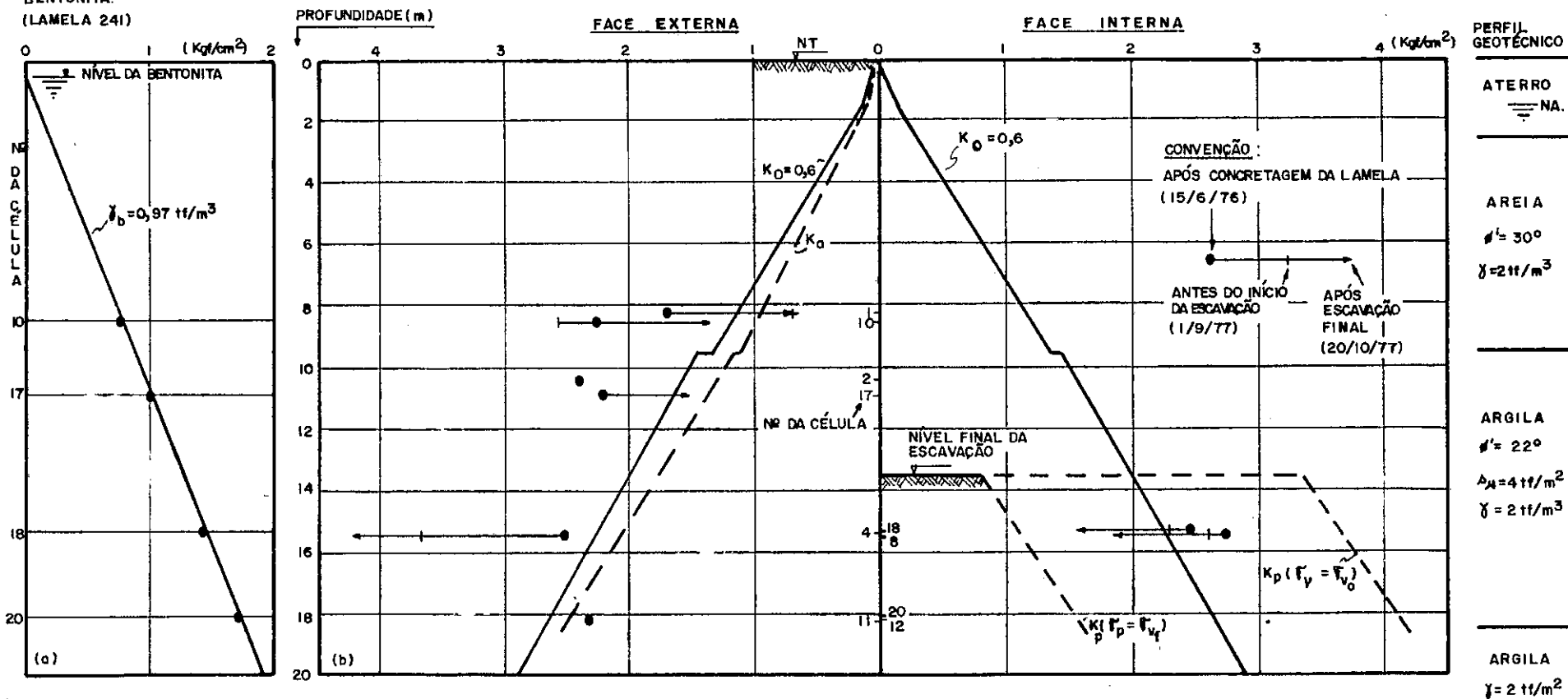


Fig.52 — valores medidos pelas CPT instaladas no lote 3 (Rua Uruguiana) do METRÔ/RIO.

Como estas células estavam apoiadas em uma rótula, que permitia uma rotação da placa de apoio da célula em torno do eixo do pistão, não houve garantia da inclinação final das faces sensíveis das células. Assim, as células podem ter ficado com sua face sensível num plano diferente do plano vertical, não medindo, então, as tensões horizontais no solo.

5.3.2 - Lote 9 (Botafogo)

A contenção da escavação neste trecho é semelhante à empregada no lote 3, isto é, parede diafragma executada em lamelas sucessivas concretadas "in situ" em valas escavadas com lama bentonítica.

O procedimento para instalar as células na parede diafragma foi idêntico ao empregado no lote 3. Somente o "macaco hidráulico" foi construído com pequenas modificações. Entre elas, a principal foi a supressão da rótula de apoio da placa suporte da célula (fig.51). Esta placa foi rigidamente fixada à extremidade do pistão. Como o macaco foi soldado à gaiola transversalmente a seu eixo vertical, garantiu-se a verticalidade da face da célula. Este objetivo foi alcançado, pois ao ser recuperada a célula citada anteriormente, verificou-se que esta estava com sua face num plano vertical e sem formar ressalto acima da superfície de concreto da parede diafragma. Observou-se, também, que havia contato íntimo e uniforme da face sensível da célula com o solo, assim como da base da célula com a parede diafragma (foto 3).

Após o posicionamento da gaiola na vala, e antes do início da concretagem, as células ficaram imersas em bentonita. Na figura 53 estão representadas as pressões medidas pelas

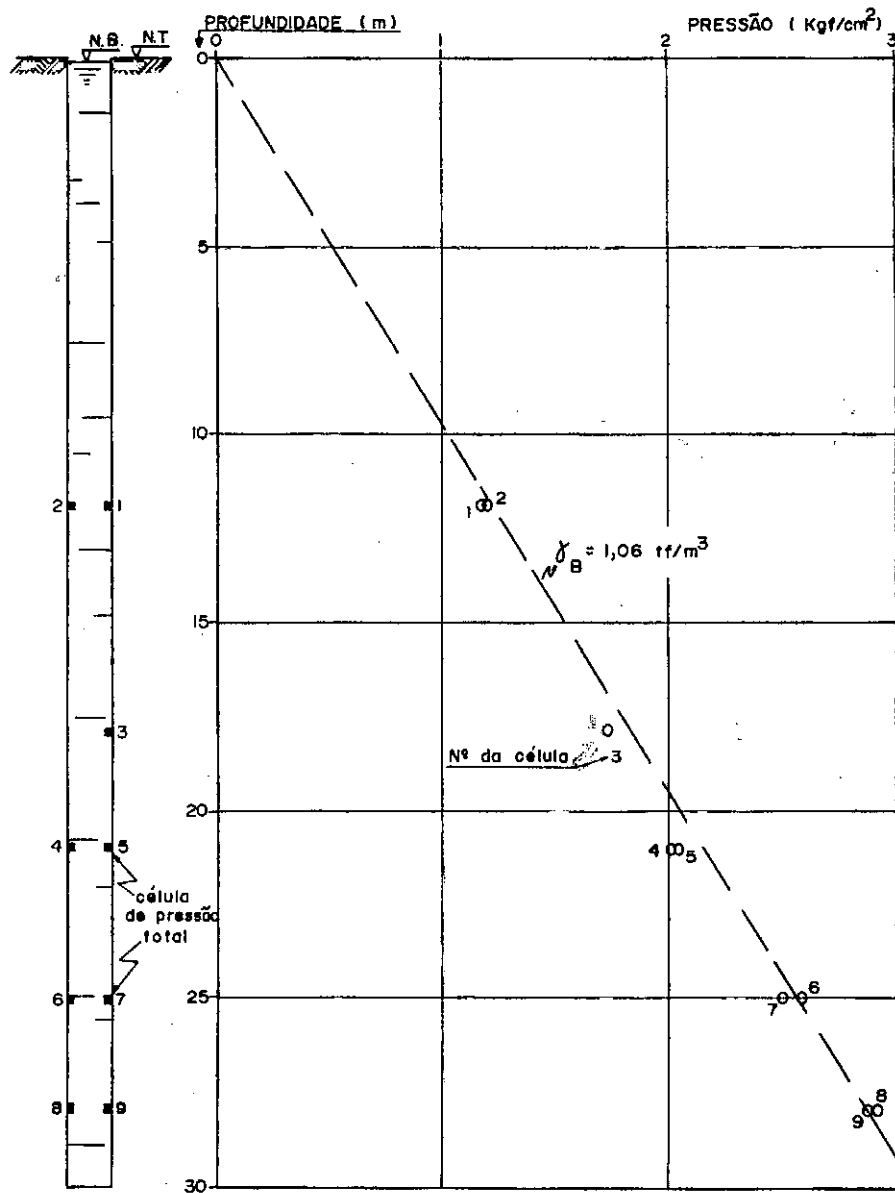


FIG. 53 - Pressões medidas pelas células de pressão total imersas em bentonita - Lote 9 (Botafogo).

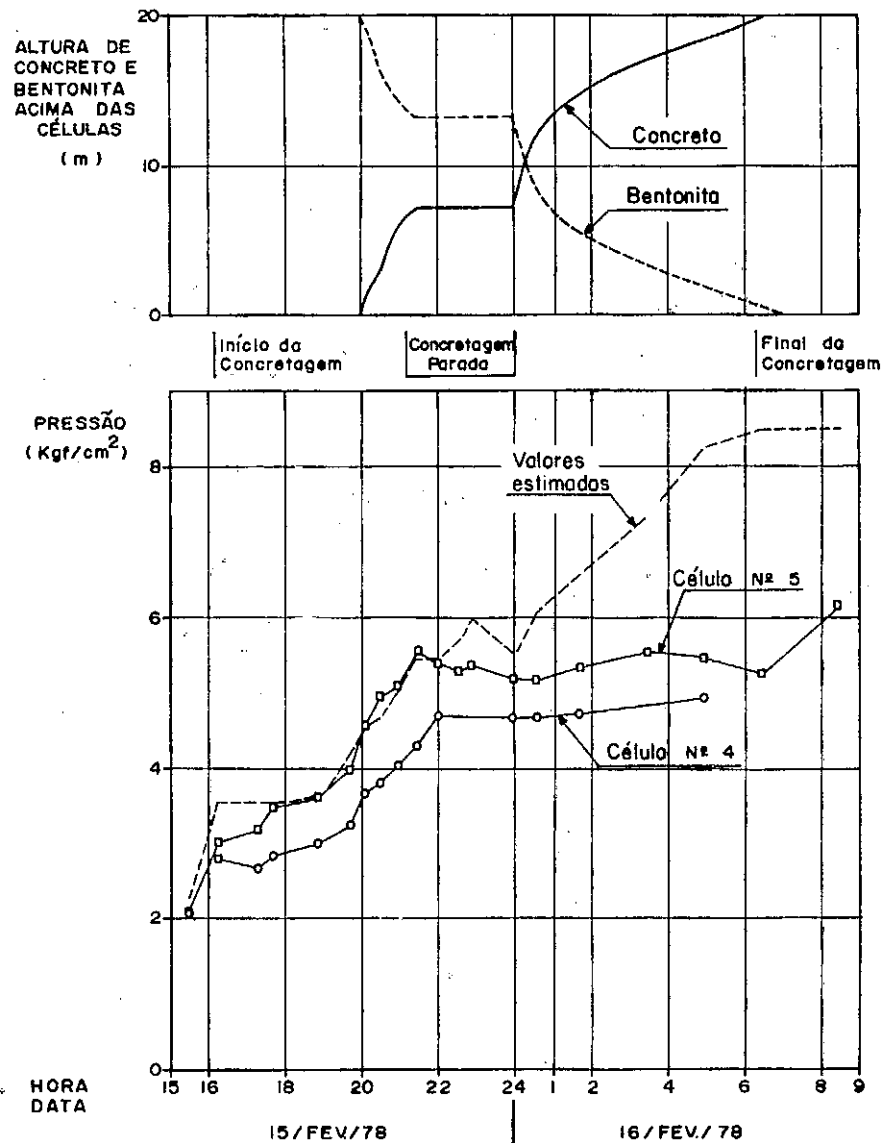


FIG. 54 - Comportamento das células de pressão total durante a concretagem da lamela - Lote 9.



Foto 3 - Lote 9 (Botafogo) - Célula após instalação
na parede diafragma.

células nesta fase. Observa-se que nenhuma das células foi danificada durante as operações de posicionamento da gaiola.

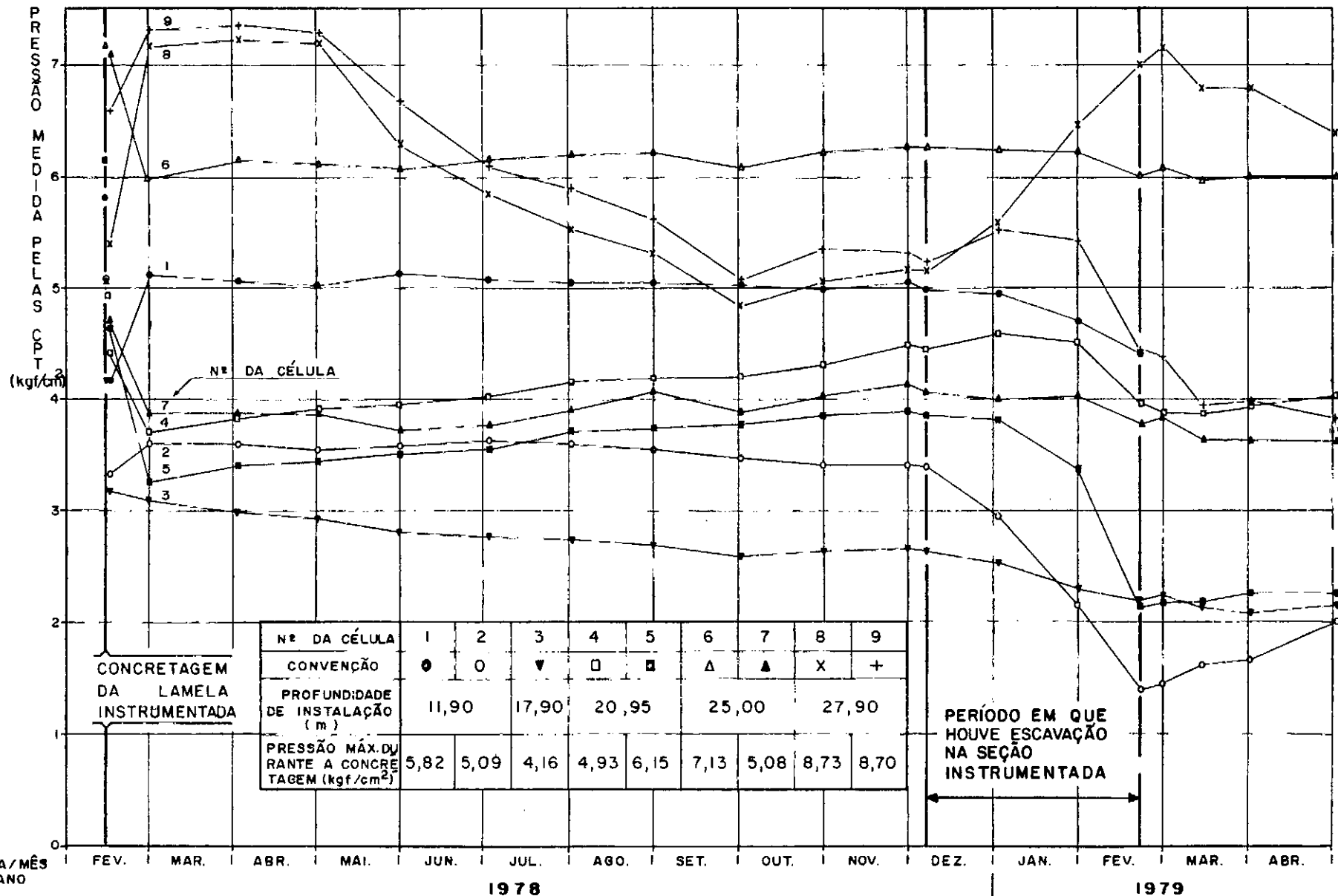
Durante a fase de concretagem, os macacos foram acionados por injeção de óleo sob pressão. Foram feitas leituras das pressões registradas pelas células durante a concretagem "submersa" da lamela. Assim, à medida em que aumenta a altura de concreto acima da célula, diminui a altura de bentonita, que é retirada da vala por bombeamento.

Na fig.54 estão representadas as pressões medidas por duas células durante a concretagem. Este comportamento foi típico para todas as células. A pressão estimada foi calculada a partir das alturas de concreto e bentonia acima das células, considerando o concreto na fase fluida (pressões hidrostáticas) e da pressão do óleo do interior do "macaco". Observa-se que os valores medidos e previstos praticamente coincidem no início da concretagem e se afastam posteriormente em razão do processo de pega do concreto.

Após a concretagem, todas as células apresentaram uma variação aleatória de pressões durante cerca de 7 dias, tendendo à estabilização. Este comportamento é atribuído a uma influência mecânica, sobre a célula, da variação da temperatura de cura do concreto.

No período de março a dezembro de 1978, apesar de não se ter escavado em frente à lamela 670, os serviços de escavação desenvolveram-se próximo à região instrumentada, chegando a se escavar até a 30,0m de distância da lamela. Neste período, as pressões registradas pelas células (fig.55) registraram variações de $-0,50$ a $+0,75$ kgf/cm², provavelmente devido à influência

FIG. 55 - Evolução das pressões medidas pelas células de pressão total no Lote 9.



das escavações executadas próximas à área instrumentada. As células 8 e 9, instaladas na camada inferior de areia acusaram uma redução de 2,0 kgf/cm² nas pressões medidas. Este fato deve-se a que, superpondo-se ao efeito acima mencionado, foi executado um alívio de pressões no lençol d'água na camada inferior de areia, com o fim de prevenir possível ruptura hidráulica do fundo da vala. Este alívio, executado por meio de bombas instaladas em poços profundos, foi correspondente a uma coluna d'água de 10,0m de altura.

Uma comparação entre os valores medidos e pressões estimadas para diversas situações da obra pode ser observada na figura 56. Nesta figura, o empuxo no repouso da camada argilosa foi calculada com um coeficiente $K_0 = 0,7$, valor este estimado em função das propriedades da camada. O empuxo ativo na camada argilosa foi calculado por:

$$\sigma_{h_a} = \sigma_v - 2 s_u$$

os valores de s_u utilizados foram os obtidos de vários ensaios "in situ" e de laboratório.

Para o cálculo do empuxo passivo, foram consideradas duas situações para a tensão vertical. Na primeira, a tensão vertical (σ_v) é igual a tensão devido a altura de solo acima da profundidade considerada quando a escavação atingiu sua cota final (σ_{vf}), ou seja, $\sigma_v = \sigma_{vf}$. Na segunda, a tensão vertical é igual à tensão vertical inicial antes do início da obra (σ_{v_0}), ou seja, $\sigma_v = \sigma_{v_0}$ (isto é, não há alívio de σ_v devido à escavação). Observa-se que os valores medidos após o final da escavação tendem a se aproximar da primeira situação ($\sigma_v = \sigma_{vf}$).

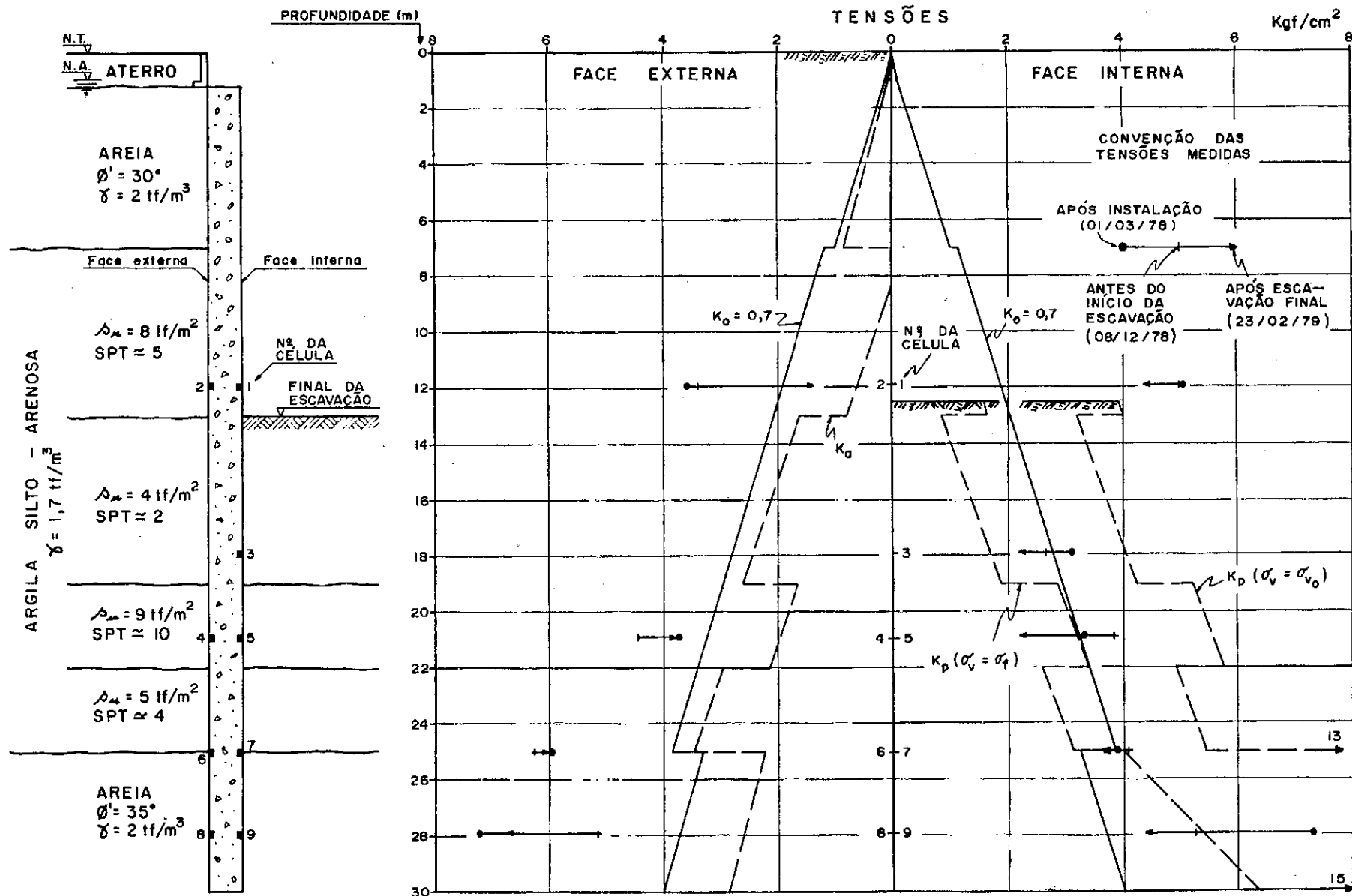


FIG. 56 - Tensões medidas e estimadas no Lote 9 (Botafogo) do Metrô/Rio.

Considerando a variação de pressões medidas, mostrada na figura 57, pode-se, a partir destes dados, estimar o valor da resistência não drenada da camada argilosa.

Admitindo que o empuxo ativo tenha sido totalmente mobilizado sobre a face externa da parede, pode-se escrever que:

$$\Delta\sigma = \sigma_{h_a} - \sigma_{h_0}$$

onde: $\Delta\sigma$ é a variação de pressões medidas pelas células;

σ_{h_0} é o empuxo horizontal no repouso: $\sigma_{h_0} = (\sigma_{v_0} - u_0)K_0 + u_0$. Este valor pode ser calculado, adotando-se $K_0 = 0,7$;

σ_{h_a} é o empuxo horizontal no estado ativo: $\sigma_{h_a} = \sigma_{v_0} - 2 s_u$. Calculado na situação não drenada, devido à rapidez com que foi executada a escavação.

Assim, temos:

$$\Delta\sigma = (\sigma_{v_0} - 2 s_u) - [(\sigma_{v_0} - u_0)K_0 + u_0]$$

$$\therefore 2 s_u = (\sigma_{v_0} - u_0)(1 - K_0) - \Delta\sigma$$

E obtemos os valores do quadro a seguir, em tf/

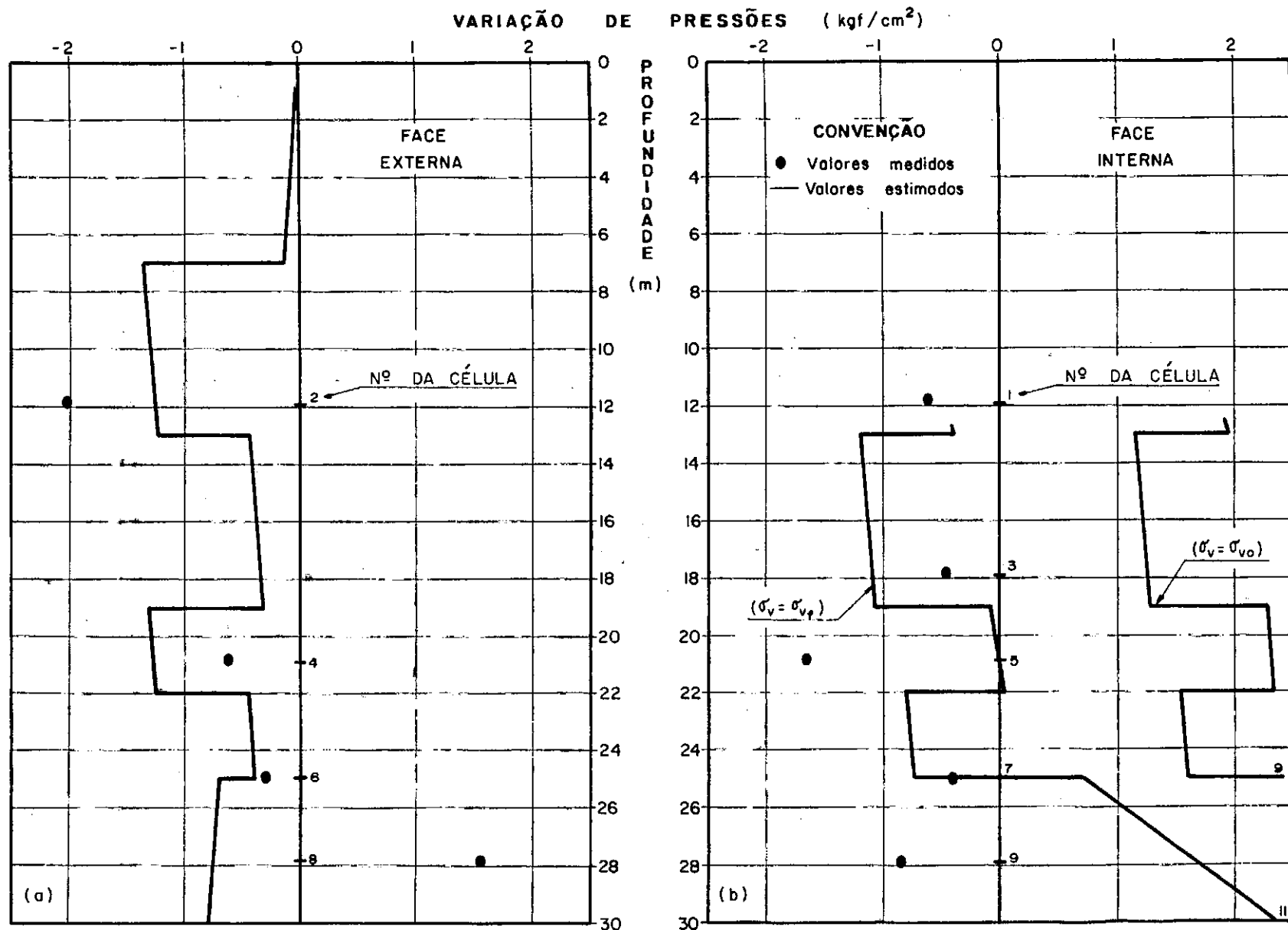


FIG. 57 - Variação de pressões medidas e estimadas devido a escavação da vala.

Célula nº	Profun- didade (m)	σ_{v_0}	u_0	$\Delta\sigma$	s_u	Valores Adotados de s_u
2	11,90	22,3	10,9	-20,1	11,8	8
4	20,95	37,7	19,9	- 6,2	5,8	9
6	25,00	44,6	24,0	- 2,7	4,4	5

Agora se considerarmos que houve mobilização to
tal do empuxo passivo do solo sobre a face interna da parede, te
mos:

$$\Delta\sigma = \sigma_{h_p} - \sigma_{h_0}$$

sendo,

$$\sigma_{h_p} = \sigma_{v_0} + 2 s_u \quad \text{para} \quad \sigma_v = \sigma_{v_0}$$

$$\text{ou } \sigma_{h_p} = \sigma_{v_f} + 2 s_u \quad \text{para} \quad \sigma_v = \sigma_{v_f}$$

logo,

$$\Delta\sigma = \sigma_{v_0} + 2 s_u - \left[(\sigma_{v_0} - u_0) K_0 + u_0 \right]$$

$$\therefore 2 s_u = \Delta\sigma - (\sigma_{v_0} - u_0)(1 - K_0)$$

$$\text{ou } \Delta\sigma = \sigma_{v_f} + 2 s_u - \left[(\sigma_{v_0} - u_0) K_0 + u_0 \right]$$

e obtemos os valores a seguir em tf/m^2 .

Célula nº	Profundidade (m)	σ_{V_0}	u_0	σ_{V_f}	$\Delta\sigma$	s_u		Valores Adotados de s_u
						$\sigma_V = \sigma_{V_0}$	$\sigma_V = \sigma_{V_f}$	
1	11,90	22,3	10,9	0	-6,3	-4,9	6,3	8
3	17,90	32,5	16,9	8,3	-4,6	-4,6	7,5	4
5	20,95	37,7	19,9	13,5	-16,7	-11,0	1,1	9
7	25,00	44,6	24,0	20,4	-4,1	-5,1	7,0	5

Observa-se que quando se considera que não há alívio de pressões verticais devido à escavação ($\sigma_V = \sigma_{V_0}$), os valores de s_u calculados ficam negativos, o que não é possível. Por esta hipótese ocorre um aumento das tensões horizontais a partir do repouso (fig.57.b), e na verdade, conforme as medições feitas, as tensões horizontais diminuem devido à escavação, mesmo com o deslocamento da parede na direção da escavação.

CAPÍTULO VI - COMENTÁRIOS FINAIS

VI - COMENTÁRIOS FINAIS

Após o estudo do funcionamento mecânico de inúmeras células projetadas e construídas, citadas na bibliografia mundial, as células de pressão total foram agrupadas nos seguintes tipos:

- pistão;
- diafragma - livre
 - apoiado;
- fluido confinado.

A cada um destes tipos, podem ser ligados qualquer dos transdutores existentes: mecânico, elétrico, acústico ou hidráulico, conforme as necessidades de precisão, acurácia, rapidez de resposta e tempo de utilização, além de se considerar a disponibilidade, exeqüibilidade e custo.

As células de pressão total são empregadas, na maioria das vezes, para medir a pressão de solo em duas situações distintas: medir a pressão atuando em um ponto no interior de uma massa de solo e medir o empuxo sobre estruturas de contenção de terra ou sob lajes de fundação de estruturas (fronteira rígida).

No primeiro caso, medida da tensão no interior de um maciço, verificou-se que, devido à inclusão de um elemento estranho ao meio, com diferentes características de compressibilidade, é impossível se conseguir a medida do valor real da tensão

atuando naquele ponto. Isto porque uma inclusão mais rígida do que o solo, no caso a célula de pressão total, provoca uma concentração de tensões sobre sua face sensível, com consequente alívio de tensão na região do solo próxima à célula. O projeto de uma célula, para este fim, deve ser dirigido no sentido de se obter uma medida de pressão pouco diferente daquela que atuaria naquele ponto do solo na ausência da célula. Procura-se, também, que, no projeto, a diferença entre estes dois valores, estimado por calibração, não seja sensivelmente influenciado pelas variações das propriedades do solo.

No caso de medida de empuxos sobre fronteira rígida, pode-se obter o valor real da pressão atuando no ponto onde foi instalada a célula. Para isto, é necessário que a célula apresente baixa compressibilidade e que seja instalada de forma que sua face sensível fique no mesmo plano da fronteira rígida, isto é, não forme ressalto sobre a fronteira.

O procedimento para instalação das células também influi no valor medido. Ao se adotar um método de instalação, deve-se empregá-lo para todas as células a serem instaladas num mesmo programa de medição. Desta forma, os erros relativos dos valores medidos por diferentes células serão minimizados e os valores obtidos serão coerentes.

Nas instrumentações desenvolvidas pela COPPE/UFRJ, verificou-se que a metodologia empregada levou à medição de pressões muito altas em alguns pontos. No entanto, quando se considera a variação das tensões durante a escavação da vala do Metrô,

os valores apresentaram-se bastante coerentes. Este procedimento para instalação de células em valas com bentonita mostrou ser eficiente no que diz respeito ao posicionamento final das células. O valor da pressão medida pela célula após a instalação, quando a célula é pressionada contra o solo, deve ser melhor estudado, procurando isolar a parcela decorrente do empuxo do solo daquela de instalação. Isto poderá ser feito, medindo-se, durante a fase de instalação, o deslocamento da célula contra o solo juntamente com o valor da pressão atuante sobre a célula.

CAPÍTULO VII - PROJETO DE UM PROTÓTIPO - SUGESTÕES PARA PESQUISAS

VII. PROJETO DE UM PROTÓTIPO - SUGESTÕES PARA PESQUISAS

Como foi visto nos capítulos anteriores, existem dois problemas distintos de medição de pressão de solo: medir tensões no interior de um maciço e medir o empuxo de solo sobre fronteiras rígidas. Cada uma destas situações exige que a célula apresente determinadas características de comportamento mecânico. Portanto, uma célula que se aplique a ambos os casos deve atender a todas as exigências.

Além disto, o tipo de solo com que estará em contato a face da célula pode condicionar uma de suas dimensões - o diâmetro. Através dos ensaios e estudos teóricos desenvolvidos por diversos pesquisadores, concluiu-se que as maiores dificuldades surgem quando o solo é arenoso. Assim, se uma célula se comporta bem com este solo, seguramente não apresentará problemas quando em contato com solo argiloso.

Procura-se a seguir definir as características que devem apresentar uma célula para aplicação geral. Assim, para um bom desempenho, exige-se:

- a) dimensões: para se obter valores constantes e em torno de 100 a 120% da tensão no interior do solo, a célula deve apresentar uma relação $D/2B > 5$.

Para as células a serem instaladas em fronteira,

a única exigência de dimensões se refere ao diâmetro da célula, condicionado ao tipo de solo em contato com sua face sensível, conforme será visto adiante.

b) compressibilidade: células tipo pistão, tipo fluido confinado e tipo diafragma apoiado registrarão pressões constantes, de cerca de 120 a 150% da tensão no solo, quando a compressibilidade geral, definida pela deflexão δ da face sensível, atender às seguintes relações:

a) célula instalada no interior da massa de solo: $D/\delta > 2000$;

b) célula instalada em fronteira rígida: $D/\delta > 1000$.

Além disto, a pressão registrada por células instaladas em massa de solo será independente de variações do módulo de elasticidade do meio quando: $E_c/E_s > 10$.

Para células tipo diafragma livre, a rigidez do diafragma deverá satisfazer à relação $E_s d^3/E_c t^3 < 1$, para que o valor registrado seja independente de variações de E_s . Também, com relação à deflexão central do diafragma (δ_{centro}), deve-se obter a relação $D/\delta_{\text{centro}} > 1950$ a 2600.

A flexibilidade do diafragma deverá ser tal que apresente valores para $d\Delta/dp < 1,1$ a $1,8 \times 10^{-4}$ cm/kgf/cm² para emprego em solos arenosos e

$d\Delta/dp < 36 \times 10^{-4} \text{ cm/kgf/cm}^2$ em solos argilosos.

- c) área sensível: para que o valor medido não seja influenciado pelas altas tensões desenvolvidas na periferia da célula, deve-se ter, para uma célula com diâmetro máximo de 100mm, do tipo fluido confinado, a relação $a/A < 0,25$, e para uma do tipo diafragma livre, a relação $a/A < 0,45$.

Para células com maior diâmetro, é necessário pesquisar a região de influência das tensões de bordo, para definir a largura necessária para o anel envolvente.

- d) solo: quando a célula está em contato com solo granular, o seu diâmetro fica condicionado à dimensão dos grãos. Assim, uma célula tipo pistão deve ter um diâmetro superior a 50 vezes o diâmetro máximo das partículas em contato com sua face sensível. Para células tipo diafragma livre, esta relação pode ser reduzida, no entanto não existe valor fixado. Assim, se for utilizada esta relação, não surgirão problemas de vido ao tipo de solo.

Se, num projeto de célula, forem atendidas as condições citadas, obter-se-á, por meio de ensaios de calibração adequados, um fator de influência da célula (F) próximo de 1 e,

praticamente invariável.

Tendo em mente estas exigências e limitações, pretende-se apresentar o projeto de um primeiro protótipo para medir pressões no interior do solo e de empuxos sobre estruturas, que, como se viu, são as duas principais aplicações destes instrumentos. Pelo fato de ser um primeiro protótipo não tem a ousadia de afirmar que será realmente inalterável, e, portanto, deverá ser modificado e adaptado em função dos ensaios a serem efetuados.

Além de se ter como base os requisitos acima citados, o projeto foi orientado no sentido de se ter condições de executá-lo sem recorrer a equipamentos importados.

O projeto da célula teve como objetivo sua aplicação em aterros e em estruturas de arrimo que desenvolvam pressões máximas da ordem de 10 kgf/cm^2 . Admitir-se-á que sua aplicação será em solos arenosos, siltosos e argilosos nos quais o diâmetro máximo da partícula seja de 4,0mm.

Iniciando-se por definir o diâmetro do protótipo, encontra-se o valor de 200mm, de acordo com o estabelecido em função do diâmetro máximo da partícula.

A figura 58 apresenta a geometria final do protótipo projetado. Duas placas metálicas com 200mm de diâmetro e 4,0mm de espessura apresentam uma cavidade com 0,5mm de profundidade e 140mm de diâmetro. Estas placas são fixadas uma à outra por meio de parafusos, formando uma câmara estanque de 1,0mm de

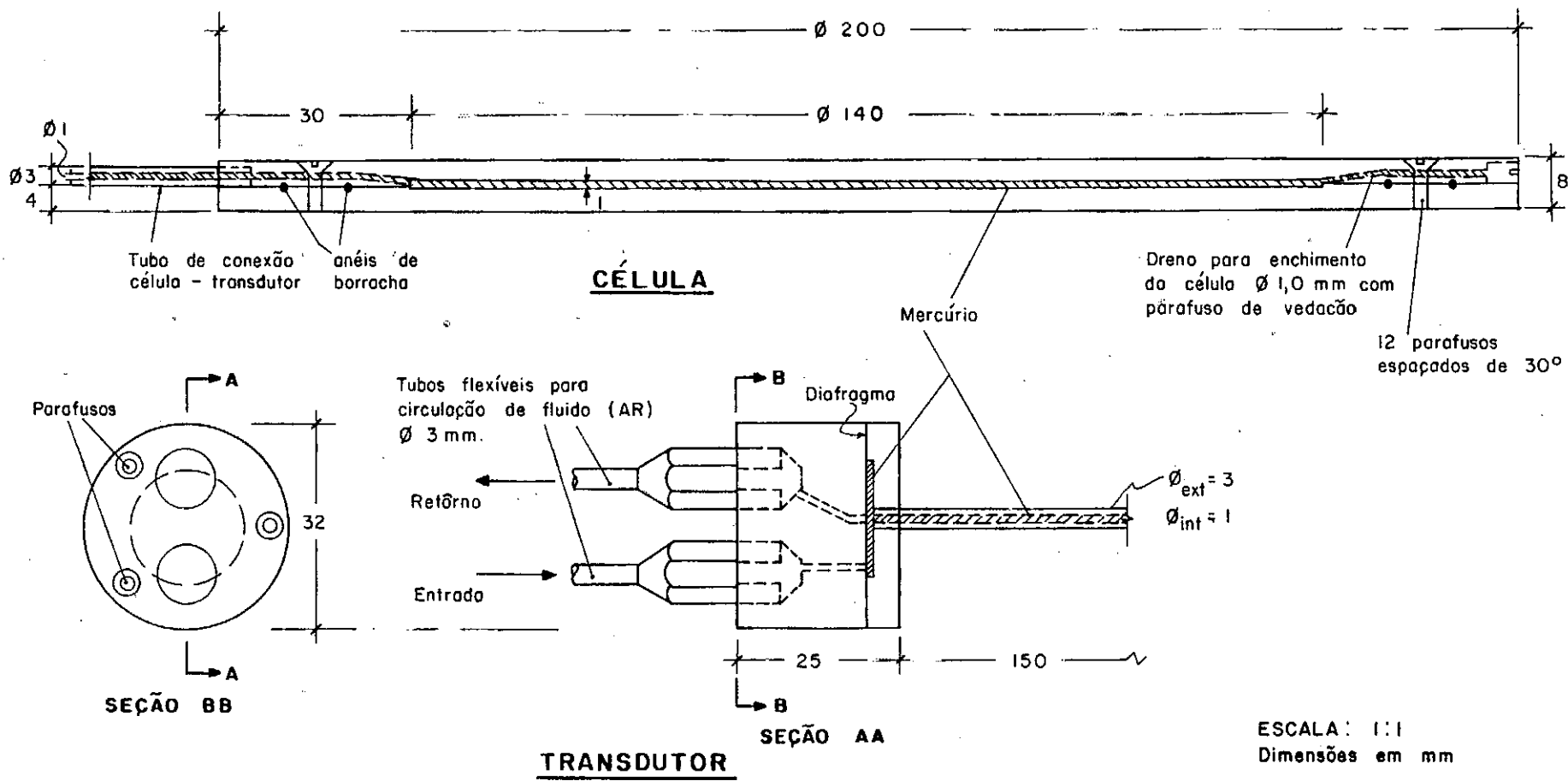


FIG. 58 - Protótipo de célula de pressão total proposto.

espessura que será preenchida com mercúrio. A vedação desta câmara é feita com dois anéis de borracha com diferentes diâmetros. Um fino tubo, do mesmo material das placas circulares, e com 1,0 mm de diâmetro interno e 3,0mm de diâmetro externo faz a ligação da câmara com o transdutor.

Este protótipo apresenta uma rigidez bastante grande, não ficando sujeito a torção devido a pressões não uniformes. Como sua deformação será semelhante à de um disco rígido, os estudos de Monfore (1950) e de Krizek e outros (1974) são aplicáveis. Baseado nestes estudos foi que fixou-se a largura do anel rígido envolvente em 30mm. Verifica-se do estudo de Krizek e outros, que empregaram células com 127,0mm (5") de diâmetro (fig. 15), que a influência da concentração de tensões estende-se até uma distância máxima de $0,3 \cdot R$ a partir do bordo para o interior da célula. Deve-se observar que os resultados obtidos por estes pesquisadores foi para células com diâmetros de 63,5mm (2,5") a 127,0mm (5"), portanto, a largura ideal do anel rígido para o protótipo da célula deve ser determinada em ensaios de laboratório adequados.

Destes mesmos estudos verifica-se que a influência da célula no campo de tensões do meio estende-se até a uma distância de $0,3 \cdot R$ além do bordo da célula. Assim, o comprimento do tubo de ligação do fluido entre o transdutor e a célula deve ser de 30mm, no mínimo.

O protótipo tem as seguintes dimensões:

diâmetro: $D = 200\text{mm}$;

espessura: $2B = 8\text{mm}$;

espessura do diafragma: $t = 3,5\text{mm}$;

diâmetro do diafragma: $d = 140\text{mm}$.

Com estes dados obtem-se:

$$\frac{D}{2B} = \frac{200}{8} = 25 \text{ (o valor mínimo fixado é 5 para células em solo).}$$

Como a célula é preenchida com mercúrio, que é bastante incompressível, a rigidez será elevada, sofrendo somente as deformações elásticas do material com que é construída, as quais são desprezíveis para o nível de pressão para o qual foi projetada. No entanto, o diafragma é bastante flexível para que a pressão que atue sobre ele seja totalmente suportada pelo mercúrio, pois uma pressão de $2,3 \text{ kgf/cm}^2$ sobre a célula mobilizará toda a deflexão admissível para a célula em solo, dada pela relação $D/\delta > 2000$, caso o diafragma se deformasse livremente. Como o diafragma é impedido de se deformar pelo mercúrio, este sofrerá a mesma variação de pressão que ocorrerá na face da célula.

O transdutor projetado é do tipo hidráulico contra-pressão, cujo funcionamento foi descrito no item 2.3.4.a.

O protótipo deve ser impermeável e, mais do que isso, deve ser estanque, para que não sejam alteradas as condições de pressão do fluido no seu interior. Quanto a isto, espera-se que o sistema de vedação previsto seja eficiente. Deve-se

dar especial atenção à vedação nos pontos de entrada dos tubos e conexões.

O protótipo deverá ser executado com material resistente à corrosão (aço inoxidável, alumínio, titânio, liga metálica) e suficientemente robusto para resistir a solicitações provenientes do meio onde será instalado, e também do manuseio e instalação. A definição do material dependerá do comportamento desses protótipos quanto à sensibilidade, efeito da temperatura, custo e histerese.

A sensibilidade será função basicamente do material, da pressão do fluido interior e do transdutor. Essa propriedade será definida a partir das calibrações, fazendo uma interação entre os diversos fatores, de maneira a se atingir a sensibilidade pretendida.

A princípio espera-se que a célula satisfaça a condição de reprodutibilidade, isto é, a curva de calibração seja estável com o tempo e independente da posição em que a célula será instalada, possibilitando medir tensões em diversas direções.

Conforme concebido, o protótipo é de fabricação e montagem simples e sua leitura não oferece maiores dificuldades.

CAPÍTULO VIII - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a) Referências citadas no texto:

1. ASKEGAARD, V. (1963), "Measurement of Pressure in Solids by Means of Pressure Cells", Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Bulletin nº 17.
2. ATTEWEL, P.B. & EL-NAGA, N.M.A. (1977), "Ground Lining Pressure Distribution and Lining Distortion in Two Tunnels Driven Through Stiff, Stony/Laminated Clay", Ground Engineering. 10 nº 3.
3. BENKELMAN, A.C. & LANCASTER, R.J. (1940), "Some Important Considerations in the Design and Use of Soil Pressure Cells", Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Highway Research Board, Dezembro, 1940; também em Public Roads, Vol.21, nº 12 (Febr. 1941).
4. BROWN, S.F. & PELL, P.S. (1967); "Subgrade Stress and Deformation under Dynamic Load", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceeding of the ASCE, SM 1, January,
5. BROWN, S.F. (1977); "State of the Art Report on Field Instrumentation for Pavement Experiments", TRR 640.

6. BUCK, G.F. (1961), "An Interim Report on the "Cell Action" Studies Connected with the Research on Pressure Measurements in Sands", Proceeding of the Midland Soil Mechanics and Foundations Engineering Society, Vol. 4.
7. CARDER, D.R. (1976), "Finite Element Analysis of the Performance of Rigid Plate Soil Pressure Cells", Ground Engineering, 9, nº 8, November.
8. CARLSON, R.W. (1939), "Development and Analysis of a Device for Measuring Compressive Stress in Concrete", Unpublished Dr's Thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts.
9. CESP (1973), "Células Glötzl de Pressão Total Instaladas na Barragem de Terra de Ilha Solteira - Problemas Encontrados, suas Soluções e Apresentação de Leituras", Laboratório de Solos, Relatório S-13/73.
10. CONVERSE, F.J. (1933), "Distribution of Pressure under a Footing", Civil Engineering, Vol.3, nº 4, April.
11. COUTINHO, A. (1949), "Théorie de la Détermination Expérimentale des Contraintes par une Méthode n'Exigeant pas la Connaissance Précise du Module d'Élasticité", Memoires "Association Internationale des Ponts et Charpentes", Vol. 9, p.. 83-103.

12. DI BIAGGIO, E. (1977), "Field Instrumentation - A Geotechnical Tool", Proc. 1st. Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol I; também NGI Publication n° 115, Oslo.
13. DUNN, C.S. & BILLAM, J. (1966), "A Study of the Response Characteristics of a New Miniature Earth Pressure Cell", Civil Engineering and Public Works Review, n° 61, February.
14. EVANS, W.H. (1940), "Dynamometer for Measuring Ground Pressures", Engineering (London) 141, n° 3876, April.
15. FRANZ, G. (1958), "Mesures Directes des Contraintes dans le Beton et les Sols de Fondation", Der Bauingenieur, n° 5, traduction 69T6 du LCPC, November, 1970.
16. GERRARD, C.M. & MORGAN, J.R. (1972), "Initial Loading of a Sand Layer under a Circular Pressure Membrane", Geotechnique, Vol. 22, n° 4.
17. GLÖTZL, F. (1958), "Un Nouveau Procédé Hydraulique de Mesure a Distance des Contraintes et des Pressions Mécaniques", Sonderdruck aus dem Archiv Für Technisches Messen, Lieferung 265, Februar 1958; Traduction 69 (49) T 89 du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, December, 1972.

18. GOLDBECK, A.T. & SMITH, E.B. (1916), "An Apparatus for Determining Soil Pressures", Proceedings of the ASTM, 1916.
19. GOLDBECK, A.T. (1920), "Soil Pressure Cell Measures Accurately to Tenth of Pound", Public Roads, n° 3-28.
20. GRIFFITH, J.M. & WOODMAN, E.H. (1948), "Instrumentation for Field Measurements of Deflections and Pressures for Airport Pavements", Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1948, Vol. 15.
21. HAMILTON, J.J. (1960), "Earth Pressure Cells, Design, Calibration and Performance", National Research Council, Canada, Division of Building Research, Technical Paper n°109, Ottawa, November.
22. HAST, N. (1943), "Measuring Stresses and Deformations in Solid Materials", Dissertation: Kungliga Tekniska Hogskolan, Stockholm, 1943; The Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceedings n° 178, September, 1944.
23. HOSKING, A.D. (1968), "Subsurface Testing with Particular Reference to Embedded Instrument", Proceedings of the Australian Road Research Board, Vol. IV, Part 2.

24. HUNTINGTON, W.C. & LUETZELSCHWAB, E.J. (1936), "New Type of Pressure Cell for Granular Material", Engineering News Record, January 2, 1936.
25. HVORSLEV, M.J. (1976), "The Changeable Interaction between Soils and Pressure Cells; Test and Reviews at the WES", Soils and Pavements Laboratory - US Army Engineer, Waterways Experiment Station, Technical Report S 76-7, Final Report. - -
26. INGRAM, J.K. (1965), "The Development of a Free-Field Soil Stress Gage for Static and Dynamic Measurements", Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM, STP-392.
27. IRWIN, M.J. (1974), "Instruments Developed by the TRRL for Studying the Behaviour of Earthworks", Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Butterworths, London.
28. JOHANNESSEN, I.J. (1958), "Test Section and Installation of Test Equipment, Oslo Subway", Brussel's Conference on Earth Pressure Problems, Vol. II.
29. KALLSTENIUS, T. & BERGAU, W. (1956), "Investigations of Soil Pressure Measuring by Means of Cells", Royal Swedish Geotechnical Institute, Proceedings n° 12, Stockholm.

30. KENNARD, M.F., PENMAN, A.D.M. & VAUGHAN, P.R. (1967), "Stress and Strain Measurement in the Clay Core at Balderhead Dam", Proceedings of the I.C.O.L.D., 9th Congress on Large Dams, Istanbul, September; and BRS Current paper n° 49/68, June, 1968.
31. KRIZEK, R.J., FARZIN, M.H., WISSA, A.E.Z. & MARTIN, R.T. (1974), "Evaluation of Stress Cell Performance", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, GT12, December.
32. KRUSE, G.H. (1965), "Measurement of Embankment Stresses on a Hundred-Foot - High Retaining Wall", Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM, STP 392.
33. LEE, I.K. & BROWN, E.B. (1957), "Design and Construction of a Laboratory Earth Pressure Cell", Australian Journal of Applied Sciences.
34. LEE, I.K. (1968), "Field Measurements at a Soil - Structure Interface", Proceedings of the Australian Road Research Board, Vol. IV, Part 2.
35. LEVILLAIN, J.P. (1972), "Capteur de Pression Totale à Contre-Pression Pneumatique et Débit Contrôlé", Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées, n° 58, Mars-Avril.

36. MAC MAHON, T.F. & YODER, E.J. (1960), "Design of a Pressure-Sensitive Cell and Model Studies of Pressures in a Flexible Pavement Subgrade", Proceedings Highway Research Board, National Research Council, Washington D.C., Vol. 39.
37. MELLIOS, G.A. e MACEDO, S.S. (1973) - "Instrumentação da Barragem de Terra de Ilha Solteira. Observações sobre o Comportamento. Recomendações", IX Seminário Brasileiro de Grandes Barragens.
38. MONFORE, G.E. (1950), "An Analysis of the Stress Distributions in and Near Stress Gages Embedded in Elastic Solids", Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior, Res. Report SP-26, June.
39. MORGAN, J.R. & GERRARD, C.M. (1968), "Free Field Measurements of Stresses and Strains in Soils", Australian Road Research Board, Proceedings of the 4th Conference.
40. MORGAN, J.R. & MOORE, P.J. (1968), "Experimental Techniques", in "Soil Mechanics-Selected Topics" by I.K.LEE, Butterworths, London, Cap. 5.
41. MORRIS, S.A.H. (1953), "The R.R.L. Piezoelectric Soil Pressure Gauge", Road Research Laboratory, Research Note n° RN/1896, January; revised by Research Note RN/4043/SAHM, September, 1961.

42. MULLER-HAUDE, H.C. & SCHEIBNER, D. (1965), "Nouvelle Methode de Measure des Pressions de Sol dans Fouilles et les Tunnels du Metro de Berlin". Die Bautechnik, 42, 1965; et Traduction 69 (49) T88 du Laboratoire Régional d'Angers, Fevrier 1973.
43. NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE (1962), "Vibrating - Wire Measuring Devices Used at Struttred-Excavations", Technical Report n° 9, Oslo.
44. PARKIN, B.R. (1961), "Impact Waves in Sand: Theory Compared with Experiments on Sand Columns", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 87, SM3, June.
45. PEAKER, K.R. (1965), "A Hydraulic Earth Pressure Cell", Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM, STP 392.
46. PEATTIE, K.R. & SPARROW, R.W. (1954), "The Fundamental Action of Earth Pressure Cells", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 2.
47. PLANTEMA, G. (1953), "A Soil Pressure Cell and Calibration Equipment", Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich.

48. POTTER, J. F. MAYHEW, H. C. & MAYO, A. P. (1969), "Instrumentation of the Full Scale Experimental on A-1 Trunk Road at Connington, Hunts", Road Research Laboratory Report L.R. 296
49. REDSHAW, S.C. (1954), "A Sensitive Miniature Pressure Cell" Journal of Scientific Instruments, Vol. 31. December.
50. ROWE, P.W. (1954), "A Soil Pressure Gauge for Laboratory Model Research", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 80, December.
51. SEAQUIST, W.H. (1934), "Accuracy of Goldbeck Cell in Laboratory Tests", Engineering News Record, June 7.
52. SELIG, E.T. (1964), "A Review of Stress and Strain Measurement in Soil", Proceedings of the Symposium on Soil-Structure Interaction, Tucson, Arizona, September.
53. SIKSO, H.A. & JOHNSON, C.V. (1964), "Pressure Cell Observations Garrison Dam Project", JSMFD, ASCE, Vol. 90, SM 5, September.
54. SMITH, T.W., NORDLIN, E., WEBER, W.G., SHIRLEY, E.C. & BARTON, J.E. (1968), "Evaluation of Commercial Soil Pressure Cells" State of California, Department of Public Works, Division of Highways, Materials and Research Department, Research Report 636.342, May.
55. SPANGLER, M.G. (1938), "Horizontal Pressures on Retaining Walls Due to Concentrated Surface Loads", Bulletin nº 140, Iowa Engineering Experiment Station.

56. SPARROW, R.W. & TORY, A.C. (1966), "Behavior of a Soil Mass under Dynamic Loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 92, SM 3, ASCE, May.
57. STAIN, V.M. (1971), "Determination of Earth-Pressure on the Membrane of a Pressure Cell Embedded in a Rigid Foundation", Soil Mechanics and Foundation Engineering (translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, n° 6, p.9-10, November, December, 1971).
58. TAYLOR, D.W. (1945), "Review of Pressure Distribution Theories, Earth Pressure Cell Investigations and Pressure Distribution Data", Soil Mechanics Fact Finding Survey: Triaxial Shear Research and Pressure Distribution Studies on Soils: Progress Report.
59. TERZAGHI, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, Inc., New York.
60. TORY, A.C. & SPARROW, R.W. (1967), "The Influence of Diaphragm Flexibility on the Performance of an Earth Pressure Cell", Journal of Scientific Instruments, Vol. 44, February.
61. TOSTICARELLI, J.R. (1972), "Sobre la Medicion de Presiones en Suelos, Diseño, Construcción y Funcionamiento de una Célula de Presión Total de Bajo Costo", Memoria de la Tercera Reunion Argentina de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, Bahia Blanca, Octubre.

62. TROLLOPE, D.H. & LEE, I.K. (1957), "The Performance of a Laboratory Earth Pressure Cell", Australian Journal of Applied Sciences.
63. TROLLOPE, D.H. & CURRIE, D.T. (1960), "Small Embedded Earth-Pressure Cells-Their Design and Calibration", Proceedings of the 3rd Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
64. TROLLOPE, D.H. & LEE, I.K. (1961), "The Measurement of Soil Pressures", Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris.
65. TROLLOPE, D.H., SPEEDIE, M.G. & LEE, I.K. (1963), "Pressure Measurements on Tullaroop Dam Culvert", 4th Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Adelaide.
66. UFF, J.F. (1969), "In Situ Measurements of Earth Pressure for a Quay Wall at Seaforth, Liverpool", Proceedings of the Conference on In Situ Investigation in Soils and Rocks, British Geotechnical Society, London.
67. WATERWAYS EXPERIMENT STATION (1944), "Soil-Pressure Cell Investigation" U.S. Corps of Engineers, W.E.S., Vicksburg Mississippi; Technical Memorandum n° 210-1.

68. WATERWAYS EXPERIMENT STATION (1951), "Investigation of Pressures and Deflexions for Flexible Pavements, Report n° 2. Pilot Tests on New Four - Gage Cell", U.S. Corps of Engineers, W.E.S., Vicksburg, Mississippi, Technical Memorandum n° 3-323.
69. WATERWAYS EXPERIMENT STATION (1954), "Investigation of Pressures and Deflexions for Flexible Pavements. Report n° 4. Homogeneous Sand Test Sections", U.S. Corps of Engineers, W.E.S., Vicksburg, Mississippi, Technical Memorandum n° 3-323.
70. WHIFFIN, A.C. & SMITH, R.T. (1951), "A Gauge for Measuring Sustained Stresses in Soil", The Engineer, July 6.
71. WHIFFIN, A.C. & MORRIS, S.A.H. (1962), "Piezoelectric Gauge for Measuring Dynamic Stresses Under Roads", The Engineer, April, 27.
72. WILLIAMS, A.A.B. (1970), "The Use of Small Earth Pressure Cells in Some Road Experiments", Unpublished Report n° R.S./3/70, National Institute for Road Research, Pretoria, CSIR.
73. WILSON, D.S. & PIMLEY, B. (1971), "Earth Pressure Meassurements in Pulverised Fuel Ash Behind a Rigid Retaining Wall", Road Research Laboratory, Department of the Environment, R.R.L. , Report LR 392.

74. WONG, H.Y. (1974), "Some Design and Performance Considerations of Diaphragm Type Pressure Cells Using Strain Gauges", Geotechnique, Vol. 24, nº 1, March.
75. WOODMAN, E.H. (1955), "Pressure Cells for Field Use", Bulletin nº 40, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi.

b) Referências citadas e não consultadas no original

1. ALLWOOD, R.J. (1956), "An Experimental Investigation of the Distribution of Pressures in Sand", Ph. D. Thesis, University of Birmingham.
2. ASKEGAARD, V. (1961), "Measurement of Pressure Between a Rigid Wall and a Compressible Medium by Means of Pressure Cells", Acta Polytechnica Scandinavica, Ci 11; também Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Bulletin nº 14, Copenhagen.
3. BATES, R.C. (1969), "SMRL Soil Stress Cell", Proc. Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, University of Idaho, Moscow, Idaho.

4. CARDER, D.R. & KRAWCZYK, J.V. (1975), "Performance of Cells Designed to Measure Soil Pressure on Earth Retaining Structures". Department of the Environment, TRRL 689, Crowthorne.
5. COPPINGER, F.J. (1967), "Stress and Strain Measurements in a Sand Mass", M. Eng. Sc. Thesis, University of Melbourne.
6. HADALA, P.F. (1967), "Effect of Placement Methods on the Response of Soil Stress Gauges", Proc. Int. Conf. Wave Propagation Dynamic Properties Earth Materials 255, Univ. of New Mexico Press.
7. HOLDEN, J.C. (1967), "Stresses and Strains in a Sand Mass Subjected to a Uniform Circular Load", Ph. D. Thesis, University of Melbourne.
8. KÖGLER, G. & SCHEIDIG, A. (1927), "Druckverteilung im Baugrunde", Die Bautechnik, n° 29, July 1.
9. LAIDLAW, D.N. (1965), "An Experimental Investigation into the Effects of Stress Ratio on the Calibration of an Embedded Earth Pressure Cell in Sand", M. Eng. Sc. Thesis, University of Melbourne.

10. McNULTY, J.W. (1965), "An Experimental Study of Arching in Sand", Technical Report nº 1-674, U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, USA.
11. WILKINS, FITZPATRIC & MARSHALL (1962), "Catagunya Prestessed Dam - Structural Model of Anchorage", J. Instrum. Engrs., Aust., 32,275.

c) Outras referências consultadas

Além dos dados obtidos pelo autor para o estudo apresentado no capítulo V "Experiência da COPPE/UFRJ", foram utilizados os dados constantes de diversos relatórios feitos na COPPE para o Metrô-Rio (como parte do convênio de prestação de serviços), e de trabalhos publicados em Congressos (referências nºs. 60, 61 e 62 abaixo). Diversas outras referências não citadas no texto, foram consultadas para a elaboração deste trabalho. A relação destas referências é apresentada a seguir.

1. AGARWAL, S.L. & VENKATESAN, S. (1965), "An Instrument to Measure Skin Friction and Normal Earth Pressure on Deep Foundations", Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM, STP 392, 1965.
2. AHLVIN, R.G. (1954), "Direct Measurement of Shear Stress in Soil Mass", Highway Research Board, Proceedings of the 33rd Annual Meeting.

3. ARTHUR, J.R.F. & ROSCOE, K.H. (1961), "An Earth-Pressure Cell for the Measurement of Normal and Shear Stresses", Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 56, n° 659, June.
4. BARTKUS, E.A. & VEY, E. (1956), "Granular Earth Pressures on Steel Tunnel Lining", Highway Research Record, Bulletin n° 141.
5. BJERRUM, L., KENNEY, T.C. & KJAERNSLI, B. (1965), "Measuring Instruments for Strutted Excavations", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, SM 1, January.
6. BOBYLEV, L.M. (1965), "Appareillage pour Mesurer a Distance les Contraintes et les Deformations dans les Sols", Avtomobil' nye Dorogi, URSS, n° 3; tradução do L.C.P.C. n° 65-T-36, Septembre 1965.
7. BUCK, G.F. (1963), "Distribution of Stresses in Soils", Proceedings of the Midland Soil Mechanics and Foundation Engineering Society, Vol. 5, Paper n° 27.
8. BUNDRED, J. (1973), "In Situ Measurements of Earth Pressure and Anchor Forces for a Diaphragm Retaining Wall", Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Butterworths.

9. CESP (1970), "Instalação do Conjunto de Células Glotzl, Maihak e Carlson-Kyowa da Estaca 130 da Barragem de Terra Margem Direita - Usina de Ilha Solteira", Laboratório de Solos, Relatório S-40/70.
10. CLÉDAT DE LA VIGERIE (1964), "Etude de Capteurs de Pression à Membrane pour Utilization dans les Sols", L.C.P.C., Electronique Rapport Interne XCV/HM/219, 22 de setembro, 1964.
11. COLINAS, A. (1964), "Compte Rendu des Essais Effectues à l'aide de Capteurs de Pressions sur la Plaque d'Essais de l'Autoroute Mulhouse-Bale", L.C.P.C., Mecanique des Chaussees, Rapport Interne, AC/VM - n° 379, Août.
12. COOLING, L.F. (1962), "Field Measurement in Soil Mechanics", Second Rankine Lecture, Geotechnique, 12 n° 2.
13. CRUZ, P.T., BEZERRA, D.M. MORUZZI, C. & FREITAS, J.R. (1973), "Uma Nota Sobre o Comportamento de Aparelhos de Auscultação em Barragens da CESP", IX Seminário de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, Novembro.
14. DELMAS, F., GANDAIS, M., HABIB, P., JOSSEAUME, H., LUONG, M. P., & PILOT, G. (1977), "Comportement d'un Soutènement en Paroi Moulée", IX International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, Tokyo.

15. DiBIAGGIO, E. & ROTI, J.A. (1972), "Earth Pressure Measurements on a Braced Slurry - Trench Wall in Soft Clay", V European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. I, Madrid; também, NGI Publication 91.
16. DURELLI, A.J. & RILLEY, W.F., (1961), "Performance of Embedded Pressure Gages Under Static and Dynamic Loadings", Special Technical Publication, nº 305, A.S.T.M.
17. EDEN, W.J. & BOZOZUK, M. (1969), "Earth Pressures on Ottawa Out Fall Sewer Tunnel", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, nº 17.
18. EVANS, H.E. (1962), "An Electromagnetic Gauge for the Measurement of Soil Pressure", Civil Engineering and Public Works Review, May.
19. FITZPATRICK, M.D. (1963), "Arthurs Lakes Rockfill Dam-Foundation Pore Pressure and Total Foundation Pressures", 4th Austrália - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Adelaide.
20. FREITAG, D.R. & KNIGHT, S.J. (1962), "Stresses in Yielding Soils Under Moving Wheels and Tracks", HRB Bulletin nº 342.

21. GOLDBECK, A.T. (1917), "Distribution of Pressure Through Earth-Fills", Proceeding of the A.S.T.M., Vol. 17 - 2.
22. HANNA, T.H. (1973), "Foundation Instrumentation", Trans Tech Publications, First Edition, Chapter 4.
23. HEATH, D.L., SHENTON, M.J., SPARROW, R.W. & WATERS, J.M. (1972), "Design of Conventional Rail Track Foundations", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, February.
24. HSU, S.J.C. (1970), "Alguns Aspectos Básicos de Instrumentação nas Barragens de Terra e Enrocamento", IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro.
25. JANUSKEVICIUS, C.K. & VEY, E. (1965), "Stresses and Strains in Triaxial Specimens", Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM, STP 392.
26. JONES, C.J.F. (1973), "Field Measurements of Earth Pressures Against Motorway Retaining Walls and Bridge Abutments", Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Butterworths, London.

27. KENNEY, T.C. (1967), "Field Measurements of In-Situ Stresses in Quick - Clays", Proc. Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks, Oslo; e NGI Publication n° 76.
28. KJAERNSLI, B. (1958), "Test Results, Oslo Subway", Brussels' Conference on Earth Pressure Problems. Vol. II.
29. KRIVOROTOV, A.P. (1971) "Procedures for Measuring Soil Pressures", Osnovaniya , Fundamenty e Mekhanika Gruntov, n° 1. Jan-Feb, 1971; traduzido em Soil Mechanics and Foundation Engineering, n° 1, Jan-Feb.
30. LACROIX, Y. (1966), "Observational Approach and Instrumentation for Construction on Compressible Soils", Highway Research Record Bulletin n° 133.
31. LAZEBNIK, G.E. (1970), "Investigation of Soil-Pressure Distribution Under Foundation Mats of Buildings", Soil Mechanics and Foundation Engineering, translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov n° 6, November-December 1970.
32. LAZEBNIK, G.E., SMIROV, A.A. & SIMAKOV, V.I. (1967), "Experimental Determination of the Coefficient of Lateral Pressure and Poisson's ratio for noncohesive Soils", Soil Mechanics and Foundation Engineering, translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov n° 4, July-August 1967.

33. LEDOUX, J.L. & BRUN, Y. (1973), "Utilisation de la Cellule de Contrainte Totale Glötzl", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 68, Nov-Dec.
34. LEE, I.K. & MORGAN, J.R. (1966), "Stress and Deflection Measurement in Sub Grade Materials", Proceedings of the Australian Road Research Board, Vol. III, Part 2.
35. LEVILLAIN, J.P. (1973), "Mesures Pneumatiques des Pressions. Le Problème des Pertes de Charge", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Pontes et Chaussées n° 67, Sept-Oct.
36. LEVILLAIN, J.P. (1973), "Mesure des Pressions à l'Arrière et Sous un Mur de Quai", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 67, Sept-Oct,
37. MACKEY, R.D. (1966), "A Three Dimensional Pressure Cell", Civil Engineering and Public Works Review, December.
38. McNARY, J.V. (1925), "Earth Pressure Against Abutment Walls Measured with Soil Pressure Cells", Public Roads, 6:102.
39. MARSAL, R.J. & ARELLANO, L.R. (1967), "Performance of El Infiernillo Dam, 1963-1966", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, SM4, July.
40. MASSARCH, R. (1973), Discussion in "Field Instrumentation in Geotechnical Engineering", Butherworth, London.

41. MASSARCH, R. (1975), "New Method for Measurement of Lateral Earth Pressure in Cohesive Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, n° 1.
42. MEAD, C.F. (1963), "Measurement of Earth Pressures on a Sheet Pile Breastwork", 4th Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Adelaide.
43. ØIEN, K. (1958), "An Earth Pressure Cell for Use On Sheet Piles: Oslo Subway", Brussel's Conference on Pressure Problems, Vol. II.
44. O'ROURKE, J.E. (1978), "Soil Stress Measurement Experiences", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, GT12, December.
45. PAKDAMAN, K. (1959), "Contribution à L'étude des Contraintes au Sein d'un Massif Pulvéulent Semi-Infini et Homogène", Faculté des Sciences de L'Université de Paris, 8 juin; et Cahiers de la Recherche, Ed. Eyrolles n° 13.
46. PEATTIE, K.R. & SPARROW, R.W. (1955), "A Review of the Design of Earth-Pressure Cell", Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 50, August.
47. PEJOAN, J. (1965), "Compte Rendu des Essais Effectues à L'aide de Capteurs de Pression sur la Plaque d'Essais en Grave-Ciment", L.C.P.C., Mecanique des Chaussées, Rapport Interne PL/VN n° 65/536, 7 Avril.

48. PENMAN, A.D.M. (1969), "Instrumentation for Earth and Rockfill Dams", B.N.C.O.L.D. News and Views May; and BRS Current Paper 35/69, September, 1969.
49. PLANTEMA, G. (1953), "Soil Pressure Measurements During Loading Tests in a Runway", Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich.
50. POIROT, R. (1971), "Measurements of Stresses and Deformations in a Mine-Fill", Proceedings of the 4th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Budapest.
51. POTTS, E.L.J. (1954), "Stress Distribution, Rock Pressures and Support Loads", Colliery Engineering, Vol. 31, n° 365 e 366.
52. POTTS, E.L.J. (1957), "Underground Instrumentation", Quaterly of the Colorado School of Mines, Stress Instrumentation and Interpretation.
53. PRANGE, B. (1964), "Capteurs de Pression Avec Transmission Sans Fil des Valeurs de Mesures et Resultats des Mesures de Repartition des Contraintes dans le Sous-Sol", Traduction 66.T.88 du L.C.P.C.

54. RATHMAYER, H. (1977), "Vertical Buffer Plates Simplify Bridge Abutments", Proc. IX International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. I, Tokyo.
55. RICHARDS, B.G. (1977), "Pressures on a Retaining Wall by an Expansive Clay", Proc. IX International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. I, Tokyo.
56. ROWE, P.W. & PEAKER, K. (1965), "Passive Earth - Pressure Measurements", Geotechnique, 15.
57. SCOTT, J.D., WILSON, N.E. & BAUER, G.E. (1972), "Analysis and Performance of a Braced Cut in Sand With Large Deformations", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9.
58. SHANON, W.L., WILSON, S.D. & MEESE, R.H. (1962), "Field Problems, Field Measurements", in "Foundation Engineering", by G.A. LEONARDS, Chapter 13, Mac Graw - Hill.
59. SHELSON, W. (1958), "Soil-Pressure Gage", Ontario Hydro Research News, July-September.
60. SOARES, M.M. (1978), "Análise Preliminar de Medições em uma Parede-Diafragma Instrumentada no Metrô-Rio", 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro.

61. SOARES, M.M., CARIM, P.V., RIBAS, J.B.M., BRAUTIGAM, V. M. (1979), "Instrumentação de Escavações no Metrô/Rio", 6º Congresso Panamericano de Mecânica de Suelos e Ingenieria de Cimentaciones, Seção Especial sobre Metrôs e Túneis, Lima, Perú.
62. SOARES, M.M. e RIBAS, J.B.M. (1979), "Resultados Iniciais de uma Seção Instrumentada do Metrô/Rio", 6º Congresso Panamericano de Mecânica de Suelos e Ingenieria de Cimentaciones, Seção Especial sobre Metrôs e Túneis, Lima, Perú.
63. SOWERS, G.F., ROBB, A.D., MULLIS, C.H. & GLENN, A.J. (1957), "The Residual Lateral Pressures Produced by Compacting Soils", Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. II, Londres.
64. SOWERS, G.F. & VESIC, A.B. (1962), "Vertical Stresses in Subgrades Beneath Statically Loaded Flexible Pavements", Bulletin 342, Highway Research Board, National Research Council, Washington D.C.
65. SPANGLER, M.G. (1941), "Wheel Load Stresses Distribution Through Flexible Type Pavements", Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 21.

66. SPANGLER, M.G. & MICKLE, J.L. (1956), "Lateral Pressure on Retaining Walls due to Backfill Surface Loads", Highway Research Record, Bulletin n° 141.
67. TAYLOR, D.W. (1948), "Field Measurements of Soil Pressures in Foundations, in Pavements and on Walls and Conduits ", Proc. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. VII, Rotterdam.
68. TAYLOR, D.W. (1948), "Measurements of Pressures and Deformations: Discussion", Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Rotterdam, Vol. III.
69. THOMAS, H.S.H. & WARD, W.H. (1969) "The Designs Construction and Performance of a Vibrating Wire Earth Pressure Cell", Geotechnique Vol. 19 (1), March; also BRS Current Paper 14/69, May, 1969.
70. TROLLOPE, D.H., LEE, I.K. & MORRIS, J. (1962), "Stresses and Deformation in Two Layer Pavement Structures Under Slow Repeated Loading", Proceedings of the Australian Road Research Board, Vol. I, Part 2.
71. TSCHEBOTARIOFF, G.P. (1948), "Determination from Bending Strain Measurements of the Distribution of Lateral Earth Pressures Against Model Flexible Bulkheads", Geotechnique, Vol. I, n° 2.

72. URIEL, S. & OTEO, C.S. (1977), "Stress and Strain Besides a Circular Trench Wall", Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. I, Tokyo.
73. WAMBEK, A. & RENARD, J. (1972), "Détermination Expérimentale des Pressions de Terre à l'Intérieur d'un Massif et Contre un Mur Emboué", European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Madrid.
74. WIKRAMARATNA, P.H.D.S. (1961), "A New Earth Pressure Cell", Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Paris.
75. WILLIAMS, A.A.B. & BROWN, S.F. (1971), "The Use of Earth Pressure Cells in Some Road Experiments", 5th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luanda, Angola.
76. WILSON, A.H. (1961) "A Laboratory Investigation of a High Modulus Borehole Plug Gage for the Measurement of Rock Stress", Proceedings of the 4th Symposium on Rock Mechanics, Pennsylvania State University.
77. WILSON, S. D. (1967). "Investigation of Embankment Performance", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 93, SM4, July.

78. WILSON, S.D. & SQUIER, R. (1969), "Earth and Rockfill Dams", State of the Art volume 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico.
79. WONG, H.Y. (1973), "Field Instrumentation of Vibroflotation Foundation", Symposium on Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Part I, London.