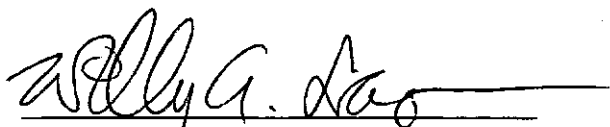


UMA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS CÉLULAS DE CARGA
E DOS PIEZÔMETROS PNEUMÁTICOS FABRICADOS PELA COPPE
PARA UTILIZAÇÃO NO METRÔ DO RIO DE JANEIRO

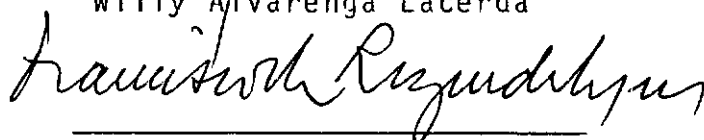
Fernando Fusaro

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 A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovado por:



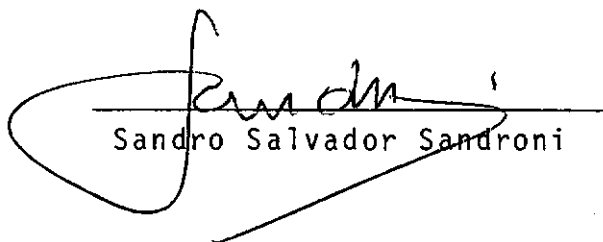
Willy Alvarenga Lacerda



Francisco de Rezende Lopes



Cláudio Fernando Mahler



Sandro Salvador Sandroni

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1983

FUSARO, FERNANDO

Uma Análise do Comportamento das Células de Carga e dos Piezômetros Pneumáticos Fabricados pela COPPE para Utilização no Metrô do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro 1983.

X, 230 p, 29,7 cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1983)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola de Engenharia.

1. Instrumentação I. COPPE/UFRJ II. TÍTULO (série)

Dedico este trabalho à memória de meu pai, que faleceu antes desta última satisfação, e à minha mãe, que com a eterna dedicação de pais nunca se furtaram em me apoiar e incentivar na conclusão deste estudo.

AGRADECIMENTOS

O autor do presente trabalho deixa registrado seu agradecimento ao Prof. Marcio Miranda Soares pela orientação desta tese, pelas sugestões feita ao trabalho original e pela bibliografia fornecida.

Ao Prof. Jacques de Medina que muito se esforçou junto ao DER para que se conseguisse executar a instalação de teste dos Piezômetros Pneumáticos.

Ao Prof. Willy Alvarenga Lacerda cujas poucas, porém entusiásticas intervenções, no fim deste trabalho, tornou possível o seu término no prazo previsto.

São prestados agradecimentos também, à firma Ronald Top pelo fornecimento dos piezômetros hidráulicos, ao DNER pela execução dos furos de sondagem para a instalação de teste dos Piezômetros Pneumáticos e ao Laboratório de Materiais de Construção pela cessão de sua prensa utilizada na calibração das Células de Carga.

Aos colegas abaixo o autor expressa sua profunda gratidão e reconhecimento pela colaboração prestada: (1) na parte de células de carga à Enga. Imaculada Conceição Soares e aos Tecnólogos Emilson Galvão Jacomo e Nefitaly Batista de Almeida Filho, (2) na parte de piezômetros também à Enga. Imaculada Conceição Soares e aos tecnólogos Sérgio Iório, Alvaro Delle Vianna e Elcio Gonçalves de Souza, ao Mestre Alvaro Maia da Costa pelo auxílio na revisão do texto e as Sras. Sandra Nogueira Leão e Maria de Fátima Al-

meida Seabra Cavalcanti pela execução da datilografia e dos dese
nhos.

O autor estende os agradecimentos ao pessoal e corpo docente da UFRJ que durante o curso de pós-graduação em mestrado muito contribuiu para que os conhecimentos do autor fossem aprimorados ao ponto de tornar possível a realização deste trabalho, e de modo especial ao Prof. Fernando Emmanuel Barata que conduziu o autor a este específico ramo da engenharia que é a Mecânica dos Solos.

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho de tese representa parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.) pela Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro - (UFRJ).

São estudados dois instrumentos produzidos pela COPPE sob contrato com a Coordenação do Metrô do Rio de Janeiro, as Células de Carga e os Piezômetros Pneumáticos, cujo emprego nas obras de escavação das galerias do Metrô permitiu análises do comportamento das estruturas conduzindo à economia dos escoramentos.

Pretende-se com o resultado destes estudos solucionar problemas de operação e/ou implementar alterações nos aparelhos de modo a torná-los mais eficazes na realização de suas funções.

SUMÁRIO

O presente trabalho se refere a parte do programa de pesquisas contratado à COPPE pela Companhia do Metrô do Rio de Janeiro, realizado junto com a construção das galerias subterrâneas do mesmo. Neste trabalho desenvolveu-se o estudo de dois tipos de instrumentos construídos pela COPPE para utilização na observação das escavações, que são as Células de Carga e os Piezômetros Pneumáticos.

As Células de Carga foram empregadas na avaliação dos esforços atuantes nas paredes diafragma, e resistidos pela estroncas, gerados pelo empuxo dos maciços arrimados, enquanto que os Piezômetros Pneumáticos foram utilizados para a quantificação das pressões neutras nos maciços adjacentes às paredes diafragma, bem como para avaliar pressões hidráulicas em fundos de cavas.

O desenvolvimento do presente trabalho envolveu, para cada um dos equipamentos analisados, a pesquisa dos diversos tipos de aparelhos similares, a descrição dos aparelhos desenvolvidos pela COPPE incluindo considerações sobre os materiais empregados em suas construções e processos de calibração, a análise do projeto executado e as conclusões e recomendações à respeito da qualidade e melhorias propostas a estes aparelhos.

Além disto, em anexos são apresentados tópicos de construção, calibração e a base de realização deste trabalho que foram as sucessivas calibrações das Células de Carga e a instalação de teste dos Piezômetros Pneumáticos.

ABSTRACT

This text refers to a part of the research program contracted to COPPE by the Rio de Janeiro Subway Company, for the instrumentation of excavations. In the text two instruments built by COPPE to be utilized in the field, are examined: Load Cells and Hidraulic Piezometers.

The Load Cells were utilized in the strutted diaphragm wall to measure the loads that were carried by the struts, while the Pneumatic Piezometers were utilized measurement of the pore-water pressure behind the walls and at the bottom excavation.

This work contains for each one of above instruments, a literature review of similar equipments, and the description of the COPPE developed instruments, including considerations about the quality of the construction materials, calibration process, final design analysis, conclusions and recommendations about the fitness of the instruments and proposed alterations.

The appendix contains topics about construction and calibration of Load Cells and field tests of the Pneumatic Piezometers.

I N D I C E

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 - Histórico

1.2 - Objetivo da Tese

1.3 - Instrumentos Construídos

CAPÍTULO 2 - Células de Carga

2.1 - Introdução

2.2 - Tipos de Células de Carga

2.2.1 - Células de Carga Mecânicas

2.2.2 - Células de Carga Elétricas

2.2.3 - Células de Carga Acústicas

2.2.4 - Células de Carga Fotoelásticas

2.2.5 - Células de Carga Hidráulicas

2.3 - Célula de Carga Fabricada na COPPE

2.3.1 - Descrição da Célula de Carga

2.3.2 - Materiais Utilizados e Construção

2.3.3 - Calibração da Célula de Carga

2.3.4 - Análise do Projeto

2.4 - Conclusões e Recomendações

CAPÍTULO 3 - Piezômetros Pneumáticos

3.1 - Introdução

3.2 - Tipos de Piezômetros

3.2.1 - Piezômetros Hidráulicos de Sistema Aberto

3.2.2 - Piezômetros Hidráulicos de Sistema Fechado

3.2.3 - Piezômetros de Diafragma

3.3 - Piezômetro Fabricado na COPPE

3.3.1 - Descrição do Piezômetro

3.3.2 - Materiais Utilizados e Construção

3.3.3 - Calibração do Piezômetro

3.3.4 - Resumo das Própriedades

3.4 - Conclusões e Recomendações

3.4.1 - Objetivo do Item

3.4.2 - Alterações no Projeto do Piezômetro

3.4.3 - Alterações no Aparelho de Leitura

APÊNDICE 1 - Princípio de Funcionamento Elétrico da Célula de Carga

APÊNDICE 2 - Projeto de Células de Carga

APÊNDICE 3 - Gráficos de Calibração das Células de Carga

APÊNDICE 4 - Gráficos de Calibração dos Piezômetros Pneumáticos

APÊNDICE 5 - Instalação de Teste dos Piezômetros

SIMBOLOGIA

BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

A construção do Metrô do Rio de Janeiro deparou com os problemas mais diversos, variando desde o remanejamento das redes de esgoto, telefone, luz, água e gás, até os problemas da engenharia civil propriamente ditos, visto que uma construção de tal porte, e especificamente esta, é pioneira nesta cidade.

A experiência advinda, mais ou menos de forma paralela da construção do Metrô em São Paulo somente pode ser aproveitada em parte, pois as diferenças marcantes de tipos de solos e a presença constante da água, implicaram em características próprias a construção de cada um.

Por outro lado, o crescente estrangulamento do sistema viário desta cidade incutiu a necessidade premente da obra, sendo esta iniciada com base em uma campanha de sondagens geológico geotécnicas ao longo do eixo do projeto, aliada à experiência de escoramento de valas e também à consulta da bibliografia da construção de obras semelhantes no exterior.

Estes fatores conduziram, inevitavelmente, a projetos e construção de alto custo e complexidade de execução, e como forma de alterar este balanço, se fez necessária a procura de parâmetros mais representativos de cálculo através da análise das

estruturas já construídas ou em construção.

Com este fim foi firmado um contrato de prestação de serviços para avaliação de situações, instrumentação e coleta de dados, entre a COPPE e a Coordenação do Metrô do Rio de Janeiro, para a instrumentação de trechos da obra, e posterior análise e interpretação dos dados e resultados coletados.

Devido à necessidade premente da obtenção de instrumentos, e às dificuldades impostas à importação dos mesmos, tal contrato gerou, também, o desenvolvimento e construção destes instrumentos e a mesma premência de utilização implicou na não realização de um estudo conciso de verificação de seu comportamento durante as operações de funcionamento.

1.2 Objetivo da Tese

O presente estudo tem como objetivo a análise mais profunda de dois tipos de instrumentos construídos sob o referido contrato, que são as Células de Carga e os Piezômetros de Contra Pressão (pneumáticos), realizando uma comparação entre os dados anteriores e os obtidos no decorrer deste trabalho e, assim, procurando possíveis fontes potenciais de problemas.

Como resultado destas comparações é também objetivo deste estudo sugerir alterações nos instrumentos com o fito de lhes introduzir melhoramentos de modo a sanar os problemas porventura existentes.

1.3 Instrumentos Construídos

As Células de Carga foram projetadas e construídas para serem utilizadas na monitoração das obras de escoramento das escavações, com a finalidade de se determinar os esforços atuantes no sistema estroncas-parede diafragma, nos diversos níveis de escoramento.

O tipo de Célula de Carga considerado ideal para construção teria que atender aos requisitos de urgência, custo, viabilidade técnica e confiabilidade, pois não se dispunha de tempo nem de recursos financeiros para a aquisição de elevado número de aparelhos, teriam de ser construídos os de maior confiabilidade, e com técnica de construção e operação suficientemente dominada por nossos engenheiros e técnicos.

Assim foi adotado o sistema do carretel de reação, pois este é simplesmente uma peça de aço torneada em dimensões adequadas e, para a percepção de suas deformações foram empregados extensômetros elétricos que, apesar de serem importados, são de baixo custo e aquisição imediata, com grande confiabilidade de emprego além da larga experiência de utilização já existente.

Foram construídas Células de Carga para estroncas com 60,160 e 200t de capacidade de trabalho, e para tirantes com capacidade de 150t, que foram empregadas em dois trechos instrumentados da construção das galérias.

No primeiro trecho, junto ao Palácio Monroe, devido à proximidade com o prédio, que foi construído sobre fundações di-

retas, a preocupação maior era impedir que a escavação da vala causasse recalques na superfície com consequentes danos ao edifício. No segundo trecho, na Av. Presidente Vargas, devido a necessidade de criar uma maior praça de trabalho, as estroncas foram substituídas por tirantes ancorados em solo, e para avaliar a variação da carga com o tempo, foram instaladas células de carga vazadas de 150t.

Com os resultados obtidos destas instalações, foi possível efetuar uma retroanálise dos esforços de projeto, avaliando ao mesmo tempo a aplicação das hipóteses e dos modelos de cálculo. Estas considerações resultaram em economia para a obra com o projeto de paredes diafragma mais delgadas e diminuição da seção ou aumento do espaçamento dos perfis metálicos de estroncamento, ou mesmo a supressão de um nível de estroncas como o ocorrido em um trecho no bairro da Tijuca (Soares, 1979).

Os Piezômetros Pneumáticos foram construídos para a avaliação do desenvolvimento das pressões neutras do solo durante as obras de escavação, para a avaliação dos valores de empuxo de água contra as paredes diafragma bem como para a previsão de ruptura de fundo das galerias escavadas.

A adoção deste tipo de piezômetro se deu devido à sua facilidade de leitura em locais onde o ponto de instalação se situa em cota piezométrica inferior à do ponto de instalação do aparelho de leitura, o que, em um piezômetro de funcionamento hidráulico, causa o problema de se trabalhar com pressões negativas. Além disto seu custo de construção e facilidade de projeto são sensivelmente menores do que os de um piezômetro de funciona

mento elétrico.

Os piezômetros de contra pressão foram instalados na seção instrumentada para a escavação do Lote 9 em Botafogo, próximo a estação deste bairro, atual terminal.

CAPÍTULO 2

CÉLULAS DE CARGA

CAPÍTULO 2

CÉLULAS DE CARGA

2.1 Introdução

Os sistemas de medição de cargas são constituídos por instrumentos que tem como objetivo determinar os esforços normais a que estão submetidos os membros da estrutura onde estão aplicados ou da qual estão interceptando. Assim, a finalidade da instrumentação com medidores de carga, é aplicar dispositivos que permitam avaliar os valores reais das cargas a que as estruturas estão submetidas.

Os sistemas de medição de cargas, para esforços normais, podem ser separados em dois grupos: (a) células de carga e (b) transdutores de deformação aplicados a membros da estrutura.

Uma característica primeira das células de carga, que pode ser deduzida dos esquemas de aplicação é o seu posicionamento interceptando as partes da estrutura entre as quais os esforços atuantes se quer determinar. Isto implica de antemão que este dispositivo suporta a totalidade da carga ou da deformação envolvida, sendo portanto um medidor direto dos esforços.

A aplicação das células de carga abrange os mais diversos tipos de necessidades, tendo sido utilizados para a aferição de cargas em tirantes de ancoragens, fundações, arrimo de solos, etc., como pode ser exemplificado pelos esquemas da figura 2.1.

2.2 Tipos de Sistemas de Medição de Cargas

A medição dos esforços normais envolvidos em estruturas é re

relativamente fácil, pois a construção de células de carga ou transdutores é bem simples, existindo um bom número de tipos comercializados. A escolha do tipo mais adequado para uma determinada função, já que instrumentos com diferentes princípios de funcionamento, leitura e graus de sofisticação são disponíveis, é definida geralmente pelos seguintes fatores (Hanna, 1973):

- a) valores esperados das cargas a serem medidas, bem como a sua natureza estática ou dinâmica e possível excentricidade dos esforços;
- b) características do local de utilização das células de carga, tais como facilidade de acesso para leitura, temperatura e umidade ambientes, meios agressivos, possibilidade de choques e danos, etc.;
- c) acurácia necessária para os valores lidos das cargas; e
- d) disponibilidade de recursos a serem dispendidos com a instrumentação.

O propósito deste subitem é apresentar os tipos de sistemas de medição de cargas existentes mais comumente utilizados em instrumentação, seus procedimentos de calibração, suas vantagens e desvantagens, incluindo problemas potenciais de ocorrerem no campo. nas fases de instalação e leitura.

A maioria dos tipos descritos é disponível comercialmente por quem as desenvolveu ou empresas autorizadas, mas como são instrumentos geralmente produzidos no exterior,

é desejável projetar e construir no Brasil estes sistemas, tanto para as necessidades gerais quanto para aplicações particulares, o que ocorre também quando os custos e os prazos de obtenção dos equipamentos nos locais de origem se tornam inviáveis.

Em quase todos os sistemas de medição de cargas existentes é utilizado o princípio da deformação de um corpo metálico para a avaliação da força aplicada. Esta peça pode ser a própria estrutura que vai sofrer os esforços ou um elemento que se adapta interceptando a estrutura. Em qualquer um dos casos, entretanto, o elemento fundamental é o transdutor da deformação deste sensor.

A peça metálica empregada para suportar a deformação advinda dos esforços aplicados deverá ser dimensionada para trabalhar sempre em sua fase de comportamento elástico para que o fenômeno possa ser mais facilmente controlado. Quanto ao tipo de transdutores de deformação empregados, estes podem ser mecânicos, elétricos, acústicos e fotoelásticos conforme a deformação seja avaliada, respectivamente, por dispositivos mecânicos, por engrenagens ou braços, por elementos resistivos, vibrantes, ou por processos fotoelásticos.

Outro princípio de avaliação de cargas é o que emprega um sistema hidráulico com medida das mesmas por manômetro de precisão ou transdutor de pressão hidráulica.

A seguir são descritos os sistemas de medição de cargas mais comuns, classificados em relação ao princípio de funcionamento e ao tipo de transdutor de deformação ou pressão empregada.

do para a avaliação do esforço suportado.

2.2.1 Sistemas de Medição de Cargas

a) Elementos Mecânicos Aplicados Diretamente à Estrutura-através do conhecimento das características da peça que está submetida a esforços (área da seção transversal e módulo de elasticidade do material), podemos determinar o valor do esforço atuante com a medida direta da deformação da peça em relação a uma base de medidas.

Existem diversos tipos de dispositivos para a avaliação das deformações, sendo que a maioria deles utiliza um extensômetro mecânico para efetuar as medidas. Alguns dispositivos mecânicos desenvolvidos para este fim podem ser vistos nas figuras 2.2a a 2.2g.

A base de medidas é fixada na peça antes de seu carregamento, por meio da colagem ou solda de pequenas peças de metal, na qual são pressionados orifícios ou cravadas esferas como mostrado na figura 2.2h, de acordo com o dispositivo mecânico disponível para a leitura. Utiliza-se sempre uma barra de referência para a verificação das medidas, e são possíveis boas acurácias, por exemplo de 1×10^{-3} cm para uma base de medida de 40 cm para o modelo fabricado pelo LNEC mostrado na figura 2.2c (LNEC-1970).

A maioria dos modelos constantes da figura 2.2 fornece diretamente as leituras das deformações, a menos dos medidores Huggenberger de fixação e do Tensostat, os quais possuem dispositivos mecânicos de ampliação do movimento, fornecendo preci-

são de aproximadamente 1µe (Domingues, e Nagato, 1977).

Apesar da boa qualidade destes medidores, seu emprego é bastante restrito aos laboratórios, devido aos cuidados de instalação, manutenção, e principalmente, de realização das leituras, devido à necessidade de um bom posicionamento do operador, que deverá ser qualificado. Além disto, estes dispositivos somente permitem leituras estáticas, também não sendo possível a monitoração contínua do fenômeno que se quer estudar.

b) Anéis Dinamométricos - os anéis dinamométricos , mostrados na figura 2.3, são instrumentos para medida de carga de precisão, sendo usualmente aplicados em prensas mecânicas ou hidráulicas. São utilizados no campo, tanto na aferição de esforços de tensão e compressão quanto em ensaios de placa, carga em estacas, medidas de CBR em leitos rodoviários e outras aplicações.

Os anéis dinamométricos são geralmente construídos em aço de alta qualidade e as cargas são aplicadas diametralmente sobre bases paralelas que podem ser isoladas ou fundidas ao anel em uma só peça. O segundo tipo apresenta uma estabilidade maior, reduz a frequência de calibrações, porém o trabalho mais complexo de fundição representa um maior custo. A utilização racional de um anel de bases isoladas pode reduzir esta desvantagem, pois se nota que a maioria das células de carga em uso é deste tipo, reservando-se o emprego das células fundidas em uma só peça aos serviços de calibração de maior responsabilidade (Hanna, 1973).

As bases de apoio podem ser planas, côncavas, ou rebaixadas para a instalação de uma bilha metálica proporcionando melhor centralização da carga, de acordo com as mais diversas aplicações. Para cargas de tração, são aparafusados nas bases, adaptadores com apoios esféricos para assegurar ao anel a axialidade dos esforços.

A aplicação da carga, quer de tração quer de compressão, produz uma alteração diametral no anel, que é medida por um extensômetro mecânico ou micrômetro, que deve ser posicionado firmemente no anel. A maioria destas células já possui um sistema incorporado para a instalação do aparelho, o que resulta em excelente repetibilidade das leituras.

Na maioria dos anéis dinamométricos são utilizados extensômetros mecânicos, que oferecem a vantagem da leitura direta, mas para trabalhos onde maior acurácia é necessária, são utilizados micrômetros (Hanna, 1973).

Os anéis dinamométricos podem, em princípio, ser fabricados para qualquer carga sendo o limite prático controlado pelo tamanho e peso envolvidos quando as cargas máximas se tornam elevadas. O Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Rio de Janeiro possui um anel dinamométrico de precisão, para a calibração de suas prensas hidráulicas, que suporta 300t de carga máxima, com as seguintes características físicas aproximadas: altura de 30 cm, diâmetro de 25 cm e peso de 25 kg.

De forma geral, devido à espessura do aço de construção, os anéis dinamométricos possuem sensibilidades proporcio-

nais às suas cargas máximas.

A calibração dos anéis dinamométricos é realizada em prensas mecânicas ou hidráulicas. Para trabalhos de alta precisão utilizam-se as prensas mecânicas onde as cargas são aplicadas por contrapeso, e para trabalhos de campo utilizam-se as prensas hidráulicas previamente aferidas por uma célula de carga padrão. O resultado é uma curva deformação contra carga aplicada como mostrado na figura 2.3c. Como a utilização de um gráfico deste tipo não é prático de se trabalhar, fornece-se um fator de calibração que representa a relação da carga aplicada pela deformação. Este fator, normalmente assumido como uma constante, na realidade varia, e para trabalhos de maior precisão deve-se usar diretamente o gráfico ou plotar um que relacione a deformação com o fator de calibração, também mostrado na figura 2.3c.

A variação de temperatura influencia pouco a elasticidade do aço, e somente nos casos em que alto grau de acurácia é necessário se faz esta correção. Nestes casos, se a calibração de laboratório for feita a uma temperatura de $T_1^{\circ}\text{C}$, a correção para uma temperatura de campo de $T_c^{\circ}\text{C}$ se daria de acordo com a expressão:

$$\Delta L_{T_1} = \Delta L_{T_c} [1 - \lambda(T_c - T_1)]$$

onde: ΔL_{T_1} - é a deformação corrigida para a temperatura de calibração de laboratório a $T_1^{\circ}\text{C}$;

ΔL_{T_c} - é a deformação obtida no campo a $T_c^{\circ}\text{C}$;

λ - é o coeficiente do anel função da temperatura e que

depende do aço empregado;

T_c - é a temperatura de campo; e

T_l - é a temperatura de laboratório.

A utilização dos anéis dinamométricos no campo os sujeita a um tratamento rude o que torna necessária a sua calibração frequente, antes e após o emprego, podendo-se somente desta forma garantir a acurácia das leituras efetuadas. A maior desvantagem de sua utilização no campo é a dificuldade de se assegurar a axialidade das cargas, e se não forem tomados os devidos cuidados de fixação poderão resultar erros elevados. Além disto, os anéis são grandes e pesados, requerem acesso para as leituras e são bastante susceptíveis a danos.

c) Blocos de Medição de Cargas - são instrumentos mecânicos que consistem de uma peça torneada a partir de um cilindro sólido de aço até se transformar em duas bases unidas por quatro pilares, como pode ser visto na figura 2.4. Desde que a carga aplicada não ultrapasse o limite de elasticidade das vigas, podemos determiná-la pela média dos encurtamentos das vigas e por suas características geométricas e elásticas. Um extensômetro mecânico é utilizado para realizar as medidas de encurtamento das vigas.

Estas células têm algumas vantagens sobre os anéis, principalmente no que diz respeito à estabilidade e, sendo muito mais leves, podem ser fabricados blocos de capacidade até 1000t, mas requerem maior cuidado de leitura e pessoal habilitado.

d) Células de Deformação de Abertura - estas células consistem, como pode ser visto na figura 2.5, de um dispositivo que tende a se deformar no sentido de fechar a abertura entre as partes superior e inferior, quando submetidas a esforços externos. Esta deformação provoca uma variação angular no braço que suporta o medidor causando a alteração de sua leitura.

Para evitar problemas de excentricidade da aplicação das cargas e atrito, o apoio pode ser feito sobre rolamentos de aço ao invés de ser rígido na célula, e neste arranjo os erros são minorados, conseguindo-se acurácia melhor para a carga máxima.

A maior limitação destes dispositivos é a necessidade de acesso ao extensômetro para a leitura, e a sua possibilidade de dano, entretanto pode-se adaptar dispositivos para leituras remotas eliminando esta desvantagem.

e) Células de Mola Prato - estas células de carga têm um elemento elástico em forma de prato que trabalha como uma mola, fixando entre um apoio e uma placa, conforme mostrado na figura 2.6a, defletindo quando solicitado por carregamento externo. Um deflectômetro mecânico mede a variação da distância entre o apoio e a placa, sendo o sistema protegido por anéis de borracha. Para registros remotos, sistemas elétricos ou eletrônicos podem ser adaptados em lugar do defletômetro mecânico.

Estas células são usualmente encontradas com capacidade de 25t a 500t, e possuindo acurácia da ordem de 0.5% (Interfels-

1972). A mola prato apresenta histerese, além disto parte da curva de calibração, como pode ser visto na figura 2.6b, não é linear, devendo-se portanto operar somente até o limite indicado como carga de trabalho.

Estas células de carga são simples, robustas e com mecanismos de proteção contra as intempéries que lhes permitem serem empregadas em ensaios de longa duração, não necessitando de pessoal especializado tanto para a instalação quanto para a leitura das deformações.

2.2.2 Células de Carga Elétricas

a) Elementos Elétricos Aplicados Diretamente à Estrutura - da mesma forma que os elementos mecânicos, através do conhecimento das características da estrutura podemos determinar o valor do esforço atuante pela aplicação direta de elementos elétricos. O mais comum é o extensômetro elétrico, basicamente um fio de liga metálica adequada, cuja resistência varia linearmente com o seu alongamento ou encurtamento.

A parte sensível do extensômetro elétrico pode ser formada por um fio ou lâmina de uma liga metálica. Sendo formado por fio, de diâmetro da ordem de 0,01mm a 0,02mm, este é enrolado em forma de serpentina ou hélice e fixado sobre uma base plástica ou de papel. Sendo formado por lâmina, de espessura menor que 0,02mm, é recortado em forma de serpentina e fixado em uma base. O recorte da lâmina é feito por processo químico, após gravação ótica, ou por punção da lâmina metálica.

Para a parte condutora dos extensômetros elétricos , são empregadas ligas metálicas, sendo muito usadas as denominadas Constantan (57% cobre e 43% níquel), Isoelastic (36% níquel, 8% cromo, 0,5% molibidênio e 55,5% ferro) e Nicrome (80% níquel e 20% cromo), enquanto que para a base podem ser empregados produtos fenólicos (baquelite), à base de epóxi, ou mesmo o papel, tudo dependendo das características das deformações esperadas e das condições de utilização.

Os extensômetros elétricos são aplicados à peça que se deseja analisar de acordo com os procedimentos de colagem específicos e seu princípio elétrico de funcionamento e modos de emprego mais utilizados estão descritos no Apêndice 1.

b) Células de Carga de Extensômetros Elétricos - o princípio de operação deste tipo de células de carga é o emprego dos extensômetros elétricos em uma base de metal a ser deformada com a aplicação das cargas externas. A célula de carga compõe-se basicamente de uma peça metálica torneada em forma de carretel, em cuja reentrância os extensômetros elétricos são colados. A aplicação da carga no carretel resulta em uma deformação de sua parte central, proporcional às características elásticas do material metálico.

Este princípio de funcionamento é empregado em todas as células de carga deste tipo e as suas diferenças principais são quanto à forma da célula, quantidade e disposição dos extensômetros elétricos e técnicas e equipamentos de medida do sinal fornecido pelos extensômetros.

A figura 2.7a mostra uma célula de carga na qual são empregados quatro extensômetros elétricos no carretel de aço. Nesta célula os extensômetros 1 e 3 estão colados ao longo de geratrizes opostas do cilindro enquanto que os extensômetros 2 e 4 estão colados na direção de sua circunferência. Quando o sistema é submetido ao esforço axial, as resistências dos extensômetros 1 e 3 diminuem devido ao seu encurtamento enquanto que as dos extensômetros 2 e 4 aumentam devido ao seu alongamento.

Se os extensômetros são conectados em uma ponte de Wheatstone, como mostrado na figura 2.7b, com a compressão do cilindro, o sinal medido entre os pontos B e D variará, e através de uma curva de calibração poderemos obter uma proporcionalidade do sinal com a carga aplicada.

São encontradas também células de carga com a utilização de oito extensômetros elétricos colados no cilindro, sendo a disposição usual a de quatro grupos em forma de "T", igualmente espaçados ao longo da circunferência do cilindro, de acordo com a figura 2.7c, sendo o esquema de ligação dos mesmos em uma ponte de Wheatstone como mostrado na figura 2.7d.

Em princípio o elemento metálico pode ter uma forma qualquer, retangular, quadrada ou tubular, mas a mais comum é a cilíndrica sólida, ou vazada para emprego com tirantes. Para trabalhos de alta precisão, o carretel é usinado de uma só peça, sendo as bases polidas e tratadas com desempenho para evitar excentricidade das cargas atuantes.

A célula é usualmente envolvida por um anel de aço e a vedação contra a umidade é assegurada por anéis de borracha. O espaço interno é deixado vazio, mas pode ser também preenchido com óleo para assegurar uma equalização mais rápida da temperatura ao longo da célula e, conseqüentemente, dos extensômetros. As conexões elétricas são feitas por um cabo que penetra na célula em um orifício vedado, ou é conectado em um terminal em sua parede.

As células de carga para a medida de esforços de tração são similares às para esforços de compressão, as bases e o cilindro são torneados de uma só peça, possuindo conexões auto-alinhantes para a eliminação de esforços não axiais.

Encontram-se células de carga de um só elemento de reação com capacidade até 500t ou mais, sendo que são projetadas para suportar uma sobrecarga de 150% de sua capacidade nominal, sendo possível de se obter acurácia melhor do que 0,2% com células de alta precisão. (Hanna, 1973).

Com o objetivo de construir células de capacidade mais alta, com baixa espessura, e ainda que tenham facilidade em compensar cargas excêntricas, podem ser empregados vários elementos de reação. Por exemplo, projetos deste tipo têm sido realizados por Whitaker, criando células de carga de alta capacidade para a instrumentação de estacas escavadas, variando de 50t a 600t e com 8 a 24 elementos de reação. Nos projetos de 8 elementos de reação, estes são igualmente dispostos ao longo de uma circunferência, conforme mostrado na figura 2.8, enquanto que nos projetos de 18 e 24 elementos de reação, eles são dispostos ao longo de

duas circunferências, o que pode ser visto na figura 2.9. Segundo o projetista este tipo de célula de carga tem comportamento bastante satisfatório na instrumentação de estacas (Whitaker, - 1963).

A principal característica das células de carga de extensômetros elétricos é a sua simplicidade, e como estes são muito sensíveis, pequenas deformações são necessárias para desenvolver a carga máxima, podendo-se fazer cilindros de reação muito rígidos, e portanto células muito estáveis. A resposta ao carregamento é rápida sendo possível a monitoração de esforços dinâmicos através de registradores contínuos.

A sensibilidade destas células pode ser pré-determinada durante a fase de projeto pela escolha do número e da disposição dos extensômetros elétricos. São necessários cuidados durante a construção para assegurar que todos os extensômetros estejam corretamente posicionados e colados, e que a célula seja completamente impermeável.

O sinal elétrico obtido no desbalanceamento da ponte de Wheatstone formada pelos extensômetros elétricos, quando a célula é carregada, é da ordem de 1/1000 da voltagem de excitação, e depois de ampliado pode ser medido diretamente ou registrado em aparelhos contínuos. A voltagem de excitação deve ser suprida à célula por bateria ou por transformador de corrente contínua com regularizador de voltagem para evitar flutuações de sinal.

2.2.3 Células de Carga Acústicas

a) Cordas Vibrantes Aplicadas Diretamente à Estrutura - as cordas vibrantes são medidores mecânicos simples, usualmente uma corda de piano esticada entre dois pontos que se aproximam ou se separam com o efeito das cargas aplicadas, de tal forma que a sua frequência de vibração é alterada quando ela se contrai ou se dilata, ou seja, quando a tensão a que está submetida é alterada.

Próximo à corda tensionada são posicionados dois eletromagnetos, sendo um para produzir excitação à corda que, ao oscilar, induz o aparecimento de corrente alternada no outro magneto. A alternância da corrente produzida terá sua frequência equivalente à oscilação da corda, e este sinal após ampliação, pode ser medido em frequencímetros ou gravado em registradores adequados.

O esforço aplicado à peça com a corda vibrante pode ser calculado teoricamente a partir de suas dimensões físicas, módulo de elasticidade do metal e das frequências de vibração da corda, com e sem carga, de acordo com a expressão (Hanna, 1973):

$$\epsilon = C \frac{4 L \rho^2}{E g} (f^2 - f_0^2)$$

onde: C - constante função do projeto;

L - comprimento da corda vibrante;

ρ - densidade do material da corda;

E - módulo de deformação do material da corda;

g - constante da gravidade;

f - frequência de vibração da corda tensionada; e

f_0 - frequência de vibração da corda sem tensão.

O Norwegian Geotechnical Institute desenvolveu uma célula para montagem rápida que é fixada em dois suportes previamente soldados na superfície da peça a ser carregada. As características gerais desta célula estão mostradas na figura 2.10a. Um lado da corda vibrante é preso e o outro ajustado durante a montagem por meio de um parafuso de calibração. A corda vibrante fica protegida por um tubo de aço inoxidável e acurácias da ordem de 5% são garantidas pelo fabricante (N.G.I - Catálogos).

Para compensar problemas de flambagem da peça tensionada utiliza-se o artifício do emprego de duas destas células, uma de cada lado da alma da estrutura ao longo de seu eixo neutro, montadas como mostrado na figura 2.10b. A média das deformações da estrutura fornecerá o esforço aplicado.

b) Células de Carga de Cordas Vibrantes - este tipo de célula de carga tem sido muito empregado. A forma mais comum é a utilização de uma seção de tubo de aço de parede grossa, e as cordas vibrantes são instaladas em pequenos orifícios abertos na parede do tubo paralelamente à sua geratriz, conforme mostrado na figura 2.11. (Bjerrum, et al, 1965) sendo pretensionadas e fixadas por dispositivos fixadores especiais. É usual o emprego de três cordas vibrantes dispostas em ângulos de 120º em relação ao eixo da peça para as células de carga de alta capacidade, e de seis ou mais cordas vibrantes quando existe a possibilidade de ocorrerem carregamentos excêntricos.

Após a instalação e protensão das cordas vibrantes os orifícios são selados com a finalidade de evitar a penetração da umidade e da sujeira. A seção do tubo de aço que contém as cordas vibrantes é envolvida por um anel de aço que proporciona uma protensão adequada contra danos físicos. As ligações elétricas de cada corda vibrante são conduzidas a uma conexão neste anel externo, para ligação em forma de plug na unidade de leitura.

O esforço aplicado à célula de carga pode ser calculado teoricamente a partir de suas dimensões físicas, módulo de elasticidade do metal e das frequências de vibração das cordas com e sem carga, mas são usualmente empregadas curvas de calibração como nas demais células de carga.

Uma outra forma de emprego das cordas vibrantes é a utilizada pelo N.G.I., na qual três cordas vibrantes são montadas dentro de um cilindro de aço vedado por cima e por baixo com chapas soldadas, como mostrado na figura 2.12. As conexões elétricas são efetuadas através de um orifício na parede do tubo onde são feitas as ligações com a unidade de leitura (N.G.I. - Catálogos).

Principais vantagens da utilização de células de carga de cordas vibrantes na medição de esforços: (1) são aparelhos acurados, sensíveis e estáveis; (2) sua forma de construção é robusta, ficando o elemento protegido em um local à prova de danos e umidade; (3) a operação de instalação é simples; (4) é possível o reparo de uma corda vibrante danificada e (5) é fácil o acoplamento de unidades de leitura remotas.

As células de carga que utilizam cordas vibrantes têm sido aceitas como método confiável de medida de cargas, podendo ser fabricadas com diferentes formas e tamanhos. A célula de carga de cordas vibrantes é disponível comercialmente para cargas até 1000t ou mais, sendo que a sua espessura, na maioria dos casos não ultrapassa 15 cm, variando somente o seu diâmetro espessura da parede do anel que contém as cordas vibrantes e o número destas.

O problema da excentricidade das cargas fica resolvido de modo prático pelo uso de 3 ou mais cordas vibrantes dispostas de maneira equidistante ou pela utilização de placas centralizadoras de esforços, nas quais rebaixos para encaixe da célula fixam as posições de modo a garantir a centralização e distribuição dos esforços. Também podem ser construídas células de carga para medir esforços de tração desde que a célula seja instalada solidária à estrutura, e da mesma forma podem ser observadas esforços de impacto, bastando que se utilize como monitor um registrador contínuo do sinal emitido pelas cordas vibrantes.

2.2.4 Células de Carga Fotoelásticas

O princípio de operação destas células de carga é o de que, quando um cilindro de vidro ótico é deformado pela aplicação de esforços, são visíveis no cilindro de vidro padrões de franja de interferência fotoelástica se este é iluminado por luz polarizada. O padrão observado representa uma medida direta da carga aplicada.

Como um cilindro de vidro seria facilmente danificado caso fosse solicitado diretamente, utiliza-se um corpo cilíndrico metálico que suporta a totalidade da carga. A deformação do aço, proporcional às suas características físicas e aos esforços aplicados é que deforma o cilindro de vidro que é instalado diametralmente na peça metálica, de acordo com o mostrado na figura 2.13a.

Para a leitura do padrão de franjas, utiliza-se um visor polarizado especial e uma lâmpada de luz monocromática, mas em alguns projetos tal sistema já vem incorporado. As aberturas do visor (figura 2.13b) possuem uma escala angular de modo a se poder avaliar frações de franja, de maneira a se obter contagens de 0,02 franja de precisão. O número de franjas é então multiplicado pelo fator de calibração da célula fornecendo a carga aplicada. A capacidade usual deste tipo de célula é de cinco franjas, sendo portanto possível ler com uma acurácia de 0,5% dependendo da experiência do operador. (Terrametrics Inc-Catálogos).

A maior vantagem deste tipo de indicador de carga é ser relativamente barato, sendo também fácil de instalar e executar as leituras. Para uso no campo o cilindro ótico é sujeito a danos, mas normalmente é bem protegido e também fácil de ser trocado. A maior limitação está no necessário acesso à célula para a leitura.

A capacidade da célula é função das dimensões físicas do cilindro metálico, e em células para grande capacidade de carga e sujeitas a esforços excêntricos, são empregados vários cilindros de vidro ótico espaçados regularmente.

2.2.5 Células de Carga Hidráulicas

Tem-se também células de carga que trabalham com o princípio hidráulico, como os macacos hidráulicos com medida da pressão do óleo por manômetro ou transdutor de pressão, sendo usual sua utilização associado a células de carga elásticas empregando o macaco como elemento aplicador de carga.

São disponíveis também diversos outros dispositivos hidráulicos de medição de carga, e um tipo de macaco hidráulico que encontra emprego na avaliação da carga na base de tubulões ou estacas escavadas de grande diâmetro é o plano desenvolvido por Freissinet, ilustrado na figura 2.14a, sendo que a figura 2.14b mostra um detalhe do método de sua incorporação na base de uma fundação (Frischmann, e Fleming, 1962).

2.3 Célula de Carga Fabricada na COPPE

2.3.1 Descrição da Célula de Carga

A célula de carga compõe-se basicamente do carretel de reação, maciço (figura 2.15a) ou vazado no centro (figura 2.15b), dependendo se sua utilização for para observação de esforços em escoramentos ou tirantes, respectivamente. Esta peça, robusta devido ao processo de aplicação deste tipo de célula, representa quase a totalidade do peso do aparelho, que varia de 12 kg para as células de 60t até 30 kg para as células de 200t de

carga de trabalho.

Na reentrância do carretel são instalados os componentes de resistência elétrica, os extensômetros elétricos mostrados na figura 2.16, que vão permitir que as deformações produzidas no carretel devido aos esforços externos sejam transformadas em impulsos elétricos para percepção em equipamentos analógicos ou digitais.

Para a proteção dos extensômetros elétricos, o carretel é recoberto lateralmente por um anel metálico e a vedação contra a umidade é proporcionada por anéis de borracha, instalados entre o anel e o carretel, nas suas partes superior e inferior.

As conexões elétricas são efetuadas através de um orifício no anel de recobrimento, que tem acesso a uma caixa de passagem soldada no mesmo anel. Nesta caixa são interconectados os fios do interior da célula com o cabo externo, sendo a caixa vedada por cera e o cabo preso mecanicamente ao orifício de saída para evitar esforços mecânicos aos fios internos da célula.

2.3.2 Materiais Utilizados e Construção

Todos os elementos metálicos das células foram construídos de aço especial, sofrendo tratamento superficial anti-corrosivo devido aos propósitos da utilização. Em algumas células de carga utilizou-se proteção por cromagem e em outras simplesmente zincagem.

No processo de vedação, os anéis são de borracha sintética, a gaveta da caixa de passagem de PVC recortado e a cera

de vedação do tipo pastoso resistente ao ressecamento.

Os extensômetros elétricos empregados nas células de carga foram fabricados pela Kyowa, do tipo formado por recorte em lâmina de metal próprio, colado sobre base plástica (epóxi). Os verticais foram do tipo KFC-20-C1-11 enquanto que os horizontais foram do tipo KFC-10-C1-11, com dimensões de 20 e 10 mm, respectivamente, e ambos com resistência nominal de 120Ω e gage fator de transdução de 2.1.

Para aumentar a estabilidade do carretel de aço, este foi torneado de uma só peça de metal. Este procedimento aumenta o custo da unidade mas gera um elemento de base e topo paralelos facilitando a centralização dos esforços.

Os extensômetros elétricos foram escolhidos de acordo com as deformações esperadas, visando o fornecimento do maior sinal possível para a carga máxima, de modo a obter a maior sensibilidade. Entretanto, o essencial é a sua efetiva colagem no carretel, visto que a transmissão das deformações deverá ser perfeita, de modo a reproduzir exatamente o fenômeno que ocorre no carretel quando da aplicação das tensões.

Nas posições onde serão colados os extensômetros elétricos, deverá ser aplicado um tratamento específico com o objetivo de preparar a superfície para a colagem, constando de:

- a) verificação da usinagem da peça, confirmando-se a superfície da peça é satisfatória;
- b) aplicação de lixa de água fina e/ou palha de aço

fina, de modo a completar a regularização do local, eliminando também vestígios de ferrugem e/ou outras impurezas sólidas, mas deixando-o ligeiramente rugoso para facilitar a transmissão dos esforços;

- c) lavagem das partes trabalhadas com água e sabão, deixando secar de modo a retirar os resíduos da operação anterior.
- d) marcação exata das posições onde serão colados os extensômetros elétricos; e
- e) aplicação de solvente, freon ou acetona, deixando secar e protegendo o local da colagem com fita adesiva até o momento da aplicação do extensômetro elétrico.

A colagem propriamente dita dos extensômetros elétricos normalmente vem com instruções do fabricante, que também produz os adesivos apropriados. O processo usualmente empregado é descrito a seguir:

- a) retirar da caixa o extensômetro elétrico com o auxílio de fita adesiva;
- b) retirar a fita adesiva protetora do local onde será colado o extensômetro elétrico e aplicar o adesivo de acordo com as especificações do fabricante;
- c) aplicar o extensômetro elétrico na peça a partir do local onde se colocou o adesivo, expremendo-o de modo que o excesso de adesivo saia por extrusão, e fazendo com que os dois elementos fiquem o mais próximos

mo possível de modo que a deformação seja a mais representativa do fenômeno a ser medido (fig. 2.17b); e

- d) manter a pressão de colagem de acordo com as instruções do fabricante, respeitando também o tempo de cura de acordo com o adesivo empregado.

Após a cura procede-se a verificação da colagem e o estado elétrico geral, constando de:

- a) retirada da fita adesiva tomando-se o cuidado de não puxá-la perpendicularmente à superfície do extensômetro elétrico, de modo a não introduzir esforços de tração, conforme mostrado na figura 2.17;
- b) medição da resistência de isolamento entre o extensômetro elétrico e o carretel, com megohmímetro de modo a verificar se não há curto circuito. A voltagem fornecida pelo aparelho não deverá ser superior a 50VDC, de modo a não provocar a ruptura do isolamento por fuga de corrente;
- c) isolamento do extensômetro elétrico do exterior, com cera especial, de modo a impedir que a presença de umidade altere as características elétricas e de isolamento do mesmo; e
- d) fixação da cera através de uma camada de cola epóxi por toda a região de aplicação da cera.

Por fim, tem-se a ligação interna dos extensômetros elétricos no sistema pretendido, com as seguintes etapas:

- a) são feitas as ligações entre os extensômetros elétricos com cabos flexíveis de fios múltiplos de cobre, conforme mostrado na figura 2.18;
- b) entre as ligações dos extensômetros elétricos soldam-se os fios para a união dos cabos que sairão para o exterior. Estes fios deverão ser amarrados em volta da célula para evitar que sofram puxões;
- c) deve ser aplicada uma camada de cola epóxi geral sobre todo o sistema dentro do carretel e do próprio interior do mesmo, para promover uma proteção a mais contra a umidade que acaso penetre no interior da célula e possa atingir as ligações e os fios.

A montagem do conjunto é feita em duas fases, a primeira constituindo da montagem do anel externo de proteção, e a segunda a selagem final com a instalação do cabo externo e as ligações do mesmo com o sistema interno.

A primeira é feita com o auxílio de uma prensa que empurra o anel contra o carretel e, entre estes, são colocados os dois anéis de borracha que, apertados entre as partes metálicas, se deformam promovendo uma vedação eficiente contra a umidade. O anel não pode ser empurrado de uma só vez, pois a meio caminho os fios do carretel têm que ser passados para o exterior pelo orifício da caixa de passagem. A partir daí continua-se a empurrar o anel puxando concomitantemente os fios, para evitar que sejam seccionados. Estas operações estão mostradas na figura 2.19.

O anel não precisa ficar exatamente concentrado em relação ao meio da célula, visto que se ele tocar na peça em teste não transmitirá esforço algum, pois como tem altura menor que o carretel, pode se movimentar livremente deformando o anel de borracha de vedação.

A montagem do cabo externo é feita com o auxílio de um terminal enroscado na caixa de passagem conforme mostrado na figura 2.20. O cabo entra livremente por ele mas é preso com o auxílio de um anel retentor cônico aplicado de fora para dentro. O anel, sendo maior que o diâmetro do terminal, quando é forçado para dentro esmaga o cabo impedindo-o de penetrar mais para dentro da caixa de passagem. Em seguida outro retentor, em forma de duas meias luas, é aplicado por dentro da caixa de passagem, esmagando novamente o cabo e impedindo que este saia da célula. Assim, mesmo que a célula seja carregada de modo indevido (pelo cabo), não haverá tensão nos fios do interior da célula.

São soldados os terminais do interior da célula com os fios do cabo, tomando-se especial precaução no tocante ao isolamento dos mesmos, e por fim fecha-se a caixa de passagem, com tampa parafusada, tomando-se o cuidado de espalhar cera vedadora nas peças em contacto para garantir o isolamento com o exterior. Esta precaução deve ser tomada também quando se coloca o cabo, untando com cera todas as peças para tornar perfeita a vedação.

2.3.3 Calibração da Célula de Carga

Em função do uso pretendido, as células de carga ne-

cessitam ser calibradas com sistemas de maior ou menor acurácia. Para a utilização no campo, onde muitos fatores externos inter-vêm nas leituras obtidas, é suficiente a calibração em prensas hidráulicas.

Devem ser utilizadas prensas com capacidade aproximadamente igual à das células de carga, para que não se cometam erros apreciáveis nas medidas das baixas tensões. Assim, para as células de carga de 90t foi utilizada uma prensa de 100t, para as de 150t e 160t uma de 150t e para as células de 200t uma prensa de 300t, a primeira do Laboratório de Estruturas da COPPE e as outras do Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

A montagem da célula de carga a ser calibrada na prensa está mostrada na figura 2.21a onde o pistão "a" se movimenta pela pressão do óleo, comprimindo a célula "e" contra a haste horizontal "c", que reage contra o sistema através das hastes verticais "b".

Uma maneira de se conseguir maior acurácia da carga aplicada é através da utilização de células de carga padrão cujo esquema de montagem pode ser visto na figura 2.21b. O padrão neste caso foi um anel dinamométrico de 300t de carga máxima, utilizado para a aferição das próprias prensas.

As calibrações podem ser efetuadas com ou sem o acoplamento dos cabos de leitura, isto é, fazendo as ligações diretamente nos fios internos da caixa de passagem. A instalação posterior dos cabos de leitura pode interferir na calibração se o

cabo for muito longo e/ou as resistências dos fios do mesmo forem diferentes entre si.

Foram feitas calibrações experimentais das duas formas, mas as variações observadas foram aleatórias, não podendo ser diagnosticadas como sendo da presença dos cabos. Para instrumentações com cabos longos (maiores do que 100m), análises mais detalhadas desta interferência devem ser verificadas, ou adotado o processo de calibração já com o cabo montado, o que é o mais adequado.

Teoricamente a curva de calibração de uma célula de carga tem que ser a mesma qual quer que seja a sua posição em relação a prensa de calibração, entretanto isto não ocorre pois observa-se curvas de calibração distintas para várias posições de ensaio. Por isto a calibração deve ser feita sempre em um só sentido, isto é, adotando-se um topo e uma base. Porém isto também não é suficiente pois existem situações em que a posição é vertical como foram empregadas no metrô. Nesta posição não dispomos sequer de prensa ou mecanismo confiável de aplicação das cargas. para a constatação deste fenômeno foram realizadas diversas calibrações utilizando a célula de carga nº 150-13B, e o medidor Vishay, fornecendo os resultados da tabela 2.1, transcritos em forma de gráfico na figura 2.22.

Para tal diferença de comportamento não se tem explicação conclusiva, acreditando-se ser devido, principalmente, ao

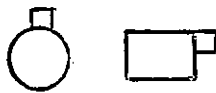
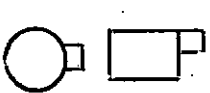
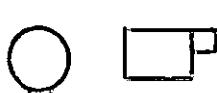

POS								
	Carga	Carreg.	Descarreg	Carreg	Descarreg	Carreg.	Descarreg	Carreg.
0	1115	1115	1070	1075	1113	1112	1114	1114
10	1164	1160	1140	1150	1158	1160	1195	1199
20	1234	1240	1220	1230	1210	1226	1266	1281
40	1374	1394	1350	1410	1330	1356	1395	1408
60	1503	1530	1520	1570	1451	1472	1530	15380
80	1640	1668	1660	1680	1573	1690	1660	1660
100	1774	1797	1780	1780	1695	1710	1793	1807
120	1912	1923	1930	1910	1816	1825	1923	1930
140	2046	2046	2060	2060	1942	1942	2049	2049

Tabela 2.1 - Posição superior

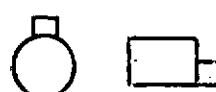
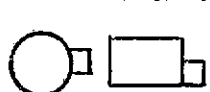


POS								
Carga	Carreg.	Descarreg	Carreg	Descarreg	Carreg.	Descarreg	Carreg.	Descarreg
0	1092	1098	1100	1099	1100	1100	1101	1101
10	1177	1180	1178	1172	1170	1184	1169	1170
20	1264	1258	1256	1256	1253	1253	1240	1250
40	1388	1406	1396	1408	1408	1408	1364	1376
60	1520	1540	1534	1557	1546	1546	1494	1515
80	1650	1681	1667	1697	1685	1685	1627	1652
100	1784	1803	1798	1820	1806	1806	1750	1777
120	1896	1922	1930	1937	1930	1930	1880	1885
140	2032	2032	2062	2062	2043	2043	2010	2010

Tabela 2.1 - Posição inferior

problema físico de aplicação excêntrica das cargas pela prensa, a pequenas diferenças de posicionamento dos extensômetros elétricos ou erro inerente ao próprio equipamento de aplicação das cargas. Além disto se forem utilizados materiais diferentes nas bases da célula na prensa, haverá atrito diferente nas bases das mesmas ocasionando deformações diferenciais e,consequentemente , resultados diferentes de leitura.

Para analisar o problema da aplicação excêntrica das cargas foram realizados ensaios na célula de carga nº 150-13B com a superposição de um carretel sobre a célula para melhorar a distribuição dos esforços. As calibrações estão mostradas na tabela 2.2 e no gráfico da figura 2.23 mostrando uma melhor aproximação do que no caso da tabela 2.1 e do gráfico da figura 2.22.





POS.				
Carga	Carreg.	Descarreg.	Carreg.	Descarreg.
0	1101	1101	1104	1104
10	1171	1173	1184	1186
20	1243	1250	1253	1260
40	1377	1388	1387	1408
60	1512	1528	1530	1540
80	1643	1662	1660	1673
100	1776	1794	1790	1804
120	1910	1914	1923	1930
140	2038	2038	2058	2058

Tabela 2.2

O primeiro ciclo de carga e descarga da operação de calibração não deverá ser tomado como representativo, podendo ser um ciclo rápido sem tomada de leituras. A finalidade disto é destruir e retirar qualquer elemento externo que possa impedir o bom funcionamento, coisa comum de ocorrer após a utilização no campo, pois sempre há a impregnação de sujeira, areia, argamassa de concreto ou outros elementos prejudiciais.

Devem ser executados, no mínimo, três ciclos de carga e descarga, com leituras, observando-se as variações entre as leituras de cada ciclo. Estas variações devem ser bastante pequenas, e muitas vezes confundindo-se com os erros oriundos dos operadores, que neste caso são dois (um monitorando a prensa e outro o aparelho de leitura), o que provoca um erro de operação multiplicativo. Este erro também será função da velocidade de aplicação das cargas, a qual quanto maior, provocará leituras mais rápidas e imprecisas dos operadores.

O tempo para a aplicação das cargas foi sempre de aproximadamente 3 min para as células de 150t, ou seja, uma razão de aplicação de 50t/min. Uma experiência efetuada variando-se a velocidade de aplicação da carga forneceu resultados praticamente invariáveis como se pode deduzir da tabela 2.3, reproduzida em gráfico na figura 2.24. Assim podemos concluir que, caso se dispusesse de um registrador gráfico poder-se-ia realizar os ensaios de calibração com velocidades de aplicação das cargas elevadas sem que isto conduzisse a uma menor acurácia nas curvas produzidas em tais ensaios.

TEMPO	5 MINUTOS		3 MIN. 18 SEG.		1 MIN. 47 SEG.	
Carga	Carreg.	Descarreg.	Carreg.	Descarreg.	Carreg.	Descarreg.
0	1070	1071	1071	1070	1070	1071
20	1149	1131	1148	1129	1150	1129
40	1239	1199	1240	1198	1239	1199
60	1337	1275	-	1277	1336	1275
80	1540	1370	1435	1369	1435	1364
100	1540	1493	1535	1489	1538	1483
120	1649	1620	1645	1616	1642	1610
140	1775	1775	1772	1772	1751	1751

Tabela 2.3

Na análise dos resultados, obtidas as leituras subsequentes de ciclos de carga e descarga, é de se esperar que estes ciclos converjam para os mesmos valores em função da carga aplicada. Da mesma forma deve-se esperar também que o último ciclo, salvo erros de operação e operador, conduza aos melhores resultados. Assim pode-se tomar como base a última medição, e desta obter a equação da reta de calibração, pelo método dos mínimos quadrados, operação contida automaticamente na maioria das máquinas calculadoras científicas atuais.

Verificou-se que para as células construídas pela COPPE o coeficiente de regressão da reta de correlação foi sempre muito bom, quase sempre acima de 0,995 para um máximo de 1.000, o que gera retas boas para utilização que podem ser transformadas fácil e representativamente em tabelas. A reta aproximada somente possui maior erro a baixas cargas onde, exatamente os fatores externos e imprecisões

de leitura da carga aplicada possuem maior influência.

Geralmente os ciclos de carga fornecem valores de leitura muito próximos, o mesmo acontecendo com os ciclos de descarga, e estes diferem pouco entre si, com as curvas de descarga se posicionando por baixo (maiores valores para uma mesma carga) da curva de carga, evidenciando um ciclo de histerese como mostrado no gráfico da figura 2.24, que representa a calibração da célula de carga nº 150-13B.

2.3.4 Análise do Projeto

Durante a montagem das células, uma série de imperfeições de construção podem ocorrer, acarretando assim, erros na utilização e interpretação futuras dos resultados.

No tocante ao cilindro de reação, seu projeto robusto implica na não possibilidade de ocorrerem deformações grandes, e assim não deverão ocorrer encurtamentos dos extensômetros elétricos acima de suas capacidades elásticas. A célula de carga nº 150-13B, por exemplo, foi submetida a uma carga de 250t, e em defletômetros mecânicos montados entre os pratos da prensa não se observou deformação sensível a estes instrumentos com precisão de 0,01 mm. Teoricamente, pela secção de aço do cilindro de reação, as células para tirantes podem suportar:

$$\text{supondo } \delta = 0,05\% = 0,0005 \text{ cm}$$

$$A = 660 \text{ cm}^2$$

$$E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{logo } P = 660 \times 2100000 \times 0,0005 = 693 \text{ t}$$

e este é um valor bem maior do que o que está como carga nominal da célula de carga de 150t, sendo da ordem de 4,5 vezes superior.

O problema advindo do acesso da água ao interior e exterior da célula, causando a corrosão do aço, foi constatado predominantemente no orifício para a passagem dos cabos do tirante, nas células construídas para este fim. Isto deve ter acontecido devido a uma falha no banho de proteção com material anti-corrosivo, o qual não deve ter tido acesso eficiente a esta região.

Nas faces externas das células o aspecto é razoável mas encontra-se descascamento da cromagem nas células que sofreram este tipo de tratamento, indicando que a limpeza precedente à aplicação deste processo não deve ter sido eficiente.

Não foi observada corrosão no interior das células, apesar de ter-se constatado a presença da água, implicando na não eficiência, nestes casos, da proteção adotada. A penetração da água ocorreu através do furo por onde penetra o cabo, pois a presilha tronco-cônica que o segura não consegue abraçá-lo totalmente, deixando um caminho e, mesmo que o conseguisse, a água penetraria pela interface aço-aço do conjunto.

Devido à cera que protege os extensômetros elétricos o estado dos mesmos foi encontrado perfeito apesar da presença da água, que parece ter ficado em sua maior parte na caixa de passagem. Assim quanto às suas características, não se notou problema de alteração com o tempo.

Uma célula desmontada mostrou os extensômetros elétricos colados em suas posições originais, mas que puderam ser retirados intactos como se estivesse puxando fita adesiva de uma superfície lisa. Isto demonstra que a eficiência da cola à tração não foi boa com o tempo, e talvez por isto algumas células tenham alterado sensivelmente suas curvas de calibração. Entretanto, como os esforços são paralelos à direção do extensômetro elétrico principal, e devido à grande rigidez da célula, o problema fica minimizado.

Quanto ao corpo da célula, foram encontrados alguns fatores causadores de problemas como os choques violentos que, causando deformações no anel protetor externo, podem alterar as características da calibração da célula. Em uma célula, tida como defeituosa, constatou-se que o calor provocado por equipamento de solda utilizado por perto havia derretido as isolações dos fios internos de caixa de passagem, causando assim um curto circuito. Após separar e isolar os fios, a célula voltou a responder novamente com ótima curva de calibração.

Muitas células analisadas foram encontradas como danificadas, porém ao se realizarem os testes de sinal e calibragem elas forneceram bons resultados. Somente quatro estavam realmente danificadas, fornecendo sinais de tal magnitude que os aparelhos de leitura não puderam interpretar. Nestas células encontrou-se curto-circuitos internos, e trocas de cores dos fios, o que provoca as leituras errôneas.

A armazenagem descuidada das células de carga quando fora de uso, não acarretou nenhum problema de funcionamento e

calibração, conforme foi constatado, provocando tão somente o aparecimento de ferrugem externa na proteção e dentro do furo cilíndrico nas células para tirantes.

Como após o uso não foram tomadas quaisquer precauções de limpeza e conservação (tendo-se encontrado nas células restos de argamassa de concreto, areia, terra, etc.) supõe-se que o tipo de célula de carga produzido seja suficientemente robusto para suportar maus tratos e descuidos de armazenamento. Sugere-se, contudo, que sejam tomadas certas precauções devido ao alto custo do investimento do aparelho. Assim sendo, após o uso eles devem ser criteriosamente limpos de forma geral, engraxados para evitar a ferrugem e acomodados em local que não atrapalhe a circulação para evitar manuseios desnecessários.

Durante o transporte das células deve-se evitar ao máximo o hábito de segurar a célula apoiando-se no cabo externo, o que tende a tracioná-lo danificando-o se os esforços forem altos, com a ruptura das ligações elétricas. A melhor maneira de se evitar isto é a instalação de cabos desacopláveis que também contribuirão para diminuir o peso, melhorar a vedação e tornar comodo o transporte.

Devido ao alto peso unitário das células, o maior problema que delas advém é o manuseio, que pode ocasionar danos tanto à célula propriamente dita quanto ao instalador. Quanto ao instalador utilizar como apoio para firmeza a sustentação o próprio cabo é um problema dos mais significativos. A falta de apoio é outro ao se levantar a célula, e que pode ocasionar quedas produzindo danos à carcaça e esmagando o anel de vedação, con

forme o esquema da figura 2.25a. Em casos extremos a carcaça poderia se solidarizar com o carretel nas partes superior e interior (ver figura 2.25b) alterando a área de aço de reação e, por tanto a curva de calibração.

Em muitas células foram constatadas marcas de solda elétrica oriundas de atividade de solda do estroncamento após a instalação das células, pois as células e as estroncas se encostam. Estas marcas, frequentemente são afetam a aparência externa, podendo entretanto ocorrerem os casos ilustrados de danos da figura 2.25c.

Quanto às ligações elétricas da célula de carga com os aparelhos de leitura, temos que analisar os casos dos dois medidores de deformação utilizados nas calibrações, o fabricado pela Vishay e o produzido pela Kyowa. A ligação interna das células é feita da forma apresentada na figura 2.18. No caso do aparelho Vishay qualquer sequência de ligação conforme a tabela 2.4 produzirá leituras inicialmente positivas. Estas leituras se rão decrescentes já que a variação de resistência específica dos extensômetros elétricos é proporcional ao encurtamento específico e a célula é comprimida, mas podemos torná-las crescentes invertendo qualquer um dos pares de fios como mostrado na parte direita da tabela 2.4.

		Leituras decrescentes				Leituras crescentes			
Bornes do Vishay		1	2	3	4	1	2	3	4
Posição dos fios da Célula de carga		1	2	3	4	1	2	4	3
		2	1	4	3	2	1	3	4
		3	4	1	2	3	4	2	1
		4	3	2	1	4	3	1	2

Tabela 2.4

No caso do aparelho Kyowa, as ligações devem ser feitas sempre na sequência 1 2 3 4, obtendo-se assim um gráfico de valores crescentes com o aumento das cargas. Na prática utiliza-se um código de cores conforme a figura 2.18 sendo as ligações efetuadas de acordo com a tabela 2.5

		Leituras decrescentes				Leituras crescentes			
Borney do Aparelho		1	2	3	4	1	2	3	4
Posição dos fios da célula de carga	Vishay	Bran	Verd	Pret	Verm	Bran	Verd	Verm	Pret
		Verd	Bran	Verm	Pret	Verd	Bran	Pret	Verm
		Pret	Verm	Bran	Verd	Pret	Verm	Verd	Bran
		Verm	Pret	Verd	Bran	Verm	Pret	Bran	Verd
	Kyowa	-	-	-	-	Bran	Verd	Verm	Pret

Tabela 2.5

As células de carga construídas de acordo com o projeto e devido aos materiais utilizadas possuem robustez seja muito boa, tendo somente como elementos frágeis as bor-rachas de vedação e o cabo de ligação. Como estes não interfe-rem na capacidade da célula de carga, tem-se que esta apresenta um alto fator de segurança. Assim, para as cargas aplicadas, a deformação do carretel da célula é muito pequena eliminando a pos-sibilidade dos extensômetros elétricos serem danificados por de-formação excessiva. Em um ensaio de teste de calibração, um de-fletômetro mecânico de 0,01 mm acoplado entre as placas de apli-cação de cargas de prensa somente se moveu na fase de ajuste des-tas placas no topo e na base da célula de carga. Isto implica em deformações muito baixas dos extensômetros elétricos, o que ga-rante o seu trabalho no regime elástico, apesar da resposta do sinal não ser o maior que se poderia ter.

Considerando agora o carretel maciço de aço, devido à sua robustez, ele estará também trabalhando no início de sua fase elástica. Tal comportamento esperado é realmente encontra-do, e o gráfico obtido, transformando-se a curva de resposta con-tra a carga, é bem linear.

Observa-se que esta linearidade não ocorre no início do carregamento, com a célula de carga não fornecendo bons resul-tados para baixas cargas, possivelmente devido a uma acomodação das placas de aplicação das cargas e da própria rigidez da célu-la de carga no início do ensaio, causando assim carregamentos ex-cêntricos. Isto normalmente ocorre até que seja atingido 5 % da carga máxima da célula, ou seja, 30t para as células de 150t de carga nominal, 600t de carga máxima.

O procedimento de ignorar as leituras abaixo de 20% da carga nominal conduz a retas de correlação melhores. Na prática, o conhecimento prévio da ordem de grandeza dos esforços que se deseja monitorar conduz à escolha de células com capacidade adequada evitando-se assim este problema.

Um fato observado no descarregamento é que sua curva passa sempre por baixo da curva de carregamento, valores maiores de sinal para a mesma carga aplicada, evidenciando histerese na célula. Devem ser feitos ciclos de carga e descarga com valores elevados de carga axial para diminuir e tornar constante este comportamento. Da mesma forma, para diminuir os efeitos da temperatura no aço da célula, esta deve ser submetida a ciclos de calor, com o auxílio de uma estufa, até valores razoáveis de ocorrerem no campo, como 60°C.

A repetibilidade das leituras obtidas pode ser considerada muito boa, principalmente a partir do segundo ciclo de calibração, com pequenas variações nos ciclos sucessivos de carga e descarga.

Como a utilização no campo implica em deixar a célula por um longo período sob efeito de carregamento que pode variar devido a movimentos do terreno e influências externas como a temperatura, espera-se um comportamento satisfatório de repetibilidade por uma curva de resposta mais próxima da de descarregamento, já que as resistências iniciais estarão rompidas, caso ainda não se considere a possibilidade de variação da resposta com o tempo (creep da célula devido a alterações do comportamento da

cola dos extensômetros elétricos sob efeito da tensão aplicada e outros fatores).

O projeto apresenta condições muito boas de utilização devido às suas qualidades e ao seu baixo custo. Sua robustez garante vida útil prolongada desde que se preocupe com a conservação dos cabos elétricos e anéis de vedação, os quais entretanto podem ser trocados caso haja algum dano ou mau funcionamento. Para facilidade de transporte, instalação, leitura e manutenção, pode-se adotar o sistema de outros tipos de células de carga, alterando a caixa de passagem para conexão rosqueada persistente, obtendo-se assim maior flexibilidade para a célula.

O emprego deste equipamento implica em sua instalação concomitante com a evolução da escavação, isto é, à medida que se atinge os níveis de instalação do estroncamento, são instaladas as longarinas, as células e as estroncas ou os tirantes.

Isto implica que após a instalação das células de carga e durante muito tempo elas terão que conviver com o tráfego constante de equipamentos pesados como tratores, escavadeiras, equipamentos de solda, e outros, trazendo a preocupação de que possam ocorrer danos à célula em si ou aos cabos de leitura, coisas comuns de ocorrer em trabalhos de campo. É sempre interessante, portanto, que sejam instaladas em posições de difícil acesso aos equipamentos e quando isto não é possível, proceder a uma sinalização eficiente.

As células de carga em si são capazes de suportar grande sorte de maus tratos já que, sen

do projetadas para substituir um trecho de escoramento, tem que possuir resistência pelo menos igual a este. Entretanto, os cabos de leitura constituem um elemento sensível a esforços de tração e à presença do calor, devendo ser adequadamente protegidos. O procedimento usual é fazê-los correr por baixo das longarinas, fora da vista dos operários e curiosos, até o aparelho de leitura.

As células de carga devem ser instaladas de modo que suas faces toquem integralmente a estrutura em local enrijecido, de modo a produzir uma distribuição de esforços o mais uniforme possível, evitando assim o surgimento de cargas excêntricas. Este enrijecimento, no caso das estroncas, foi executado com a solda de topo de uma chapa de 3/8" de espessura, o que não foi eficiente devido às deformações observadas na mesma. No caso das longarinas este enrijecimento constou do reforço transversal à alma do perfil, tanto em cima quanto em baixo, com comportamento satisfatório.

Diversos tipos de ligação podem ser empregadas no terminal da leitura, sendo que nestas instrumentações simplesmente terminava em quatro conectores macho tipo pino banana, para ligação direta no aparelho de leitura através de um código de cores. Entretanto é preferível a utilização de um conector único para a eliminação da possibilidade da troca dos fios, fato que se mostrou gerador de dúvidas quando da interpretação dos resultados. Outro processo preferível, se houver acesso fácil à célula, é a eliminação do cabo de leitura, procedendo-se as aferições junto à própria célula com a adaptação de um conector na face desta em substituição à caixa de passagem.

2.4 Conclusões e Recomendações

O objetivo deste sub-ítem é resumir as considerações já levantadas a respeito das células de carga, no tocante aos problemas encontrados nas fases de construção, calibração e instalação de modo a sugerir modificações que eliminem estes problemas, melhorando a qualidade dos aparelhos. Não se limitará somente às células de carga propriamente ditas, mas também se tratará do processo de montagem, avaliação do sinal emitido e do aparelho de leitura.

Quanto aos materiais constitutivos da célula de carga, todos apresentaram boa qualidade para a tarefa pretendida; o aço empregado sendo resistente à corrosão e aos choques, bem como fator de segurança adequado à compressão; os extensômetros elétricos com boa relação carga x resposta na montagem do conjunto; e a vedação eficiente a menos da conexão do cabo na caixa de passagem.

Os carretéis de reação de aço estão sujeitos à histerese do material, sendo portanto necessário reduzi-la a uma constância com a execução de carregamentos cíclicos de cargas elevadas. Como as células de carga operam ao ar livre, sujeitas a variações de temperatura, também é necessário executar uma ciclagem térmica; com o auxílio de uma estufa para eliminar a interferência deste fator antes da operação de colagem dos extensômetros elétricos.

A colagem dos extensômetros elétricos apresenta preocupações visto que em uma célula desmontada um deles foi deslocado.

do por inteiro quando puxado. O problema é minorado devido a que os esforços envolvidos são longitudinais exigindo pouco do adesivo. Deve-se sempre empregar os compostos químicos sugeridos pelo fabricante dos extensômetros, que são desenvolvidos especialmente para eles levando em conta o tipo de base, e de modo a se evitar surpresas.

A proteção contra a umidade, composta de uma camada de cera recoberta com adesivo epóxi e depois outra camada de adesivo fixando também os fios de ligação entre os extensômetros elétricos, se mostrou adequada isolando-os com eficiência.

Com o objetivo de tornar a célula mais insensível aos esforços excêntricos, aumentando também a relação sinal/carga aplicada, o número de extensômetros elétricos deve ser aumentado para oito, quatro verticais e quatro horizontais, dispostos diametralmente opostos em forma de "T" conforme mostrado na figura 2.7c.

A montagem do conjunto não oferece problemas. Somente a caixa de passagem apresenta deficiência de vedação com o cabo. O ideal seria eliminá-la, utilizando para conexão tomada rosqueado, fixo diretamente na parede do anel de proteção metálico. Isto facilitaria o transporte da célula bem como as mudanças do cabo toda vez que fosse instalada em locais de diferentes distâncias à casa de controle. Apesar de não se ter constatado este problema, como as correntes que circulam no cabo são muito baixas, este deverá ser blindado, não precisando ser tão grosso como utilizado atualmente.

O processo empregado na calibração, isto é, as prensas utilizadas, não apresentaram boa qualidade por aplicação excêntrica das cargas dependendo da posição da célula de carga em relação aos centros das placas de carregamento. Como no campo a possibilidade das cargas serem excêntricas também é muito grande, este erro é multiplicativo. Para trabalhos de maior precisão devem ser empregados dispositivos centralizadores das cargas ou ensaiá-las com placas rígidas para melhorar a distribuição dos esforços.

Para a calibração normalmente foram suficientes três ciclos de carga e descarga, precedidos de um ciclo rápido, que foi necessário pois as células apresentaram muitas incrustações de materiais estranhos (argamassa de cimento, areia, etc.) que alteravam este primeiro ciclo. Os ciclos subsequentes normalmente eram muito próximos entre si: A velocidade de aplicação das cargas não influencia nos resultados, mas a estabilização de uma carga durante o carregamento provavelmente conduzirá a um creep na célula tendendo a obter o valor do sinal correspondente a esta carga no descarregamento por causa da histerese residual do aparelho.

As retas de calibração obtidas são muitas boas, como pode ser visto dos gráficos do apêndice 3. Os maiores desvios ocorrem a baixas cargas, mas podem ser devido a imprecisões do aparelho aplicador de cargas nestes valores. Eliminando valores de cargas menores do que 20% da carga nominal de trabalho obteve-se uma melhoria dos valores dos coeficientes de correlação encontrados chegando-se a uma média de praticamente 1.

A conservação das células, devido ao custo das mesmas deve ser melhorada, com limpeza após o uso, engraxamento e guarda em local adequado. As células de carga são muito resistentes aos choques e aos maus tratos, soldas na maior parte de seu corpo e intempéries, mas devem ser melhor cuidadas para aumentar a durabilidade.

A conexão da célula com o aparelho de leitura apresenta o problema da variação do zero da célula conforme a posição dos fios.

Os aparelhos de leituras são preparados para receber pinos tipo banana, podendo haver troca das posições. Um código de cores, a exemplo das ligações internas da célula resolveria o problema, ou então passando a utilizar uma caixa seletora com o aparelho conectado a esta. Neste caso, para mudar uma célula, bastaria virar a chave.

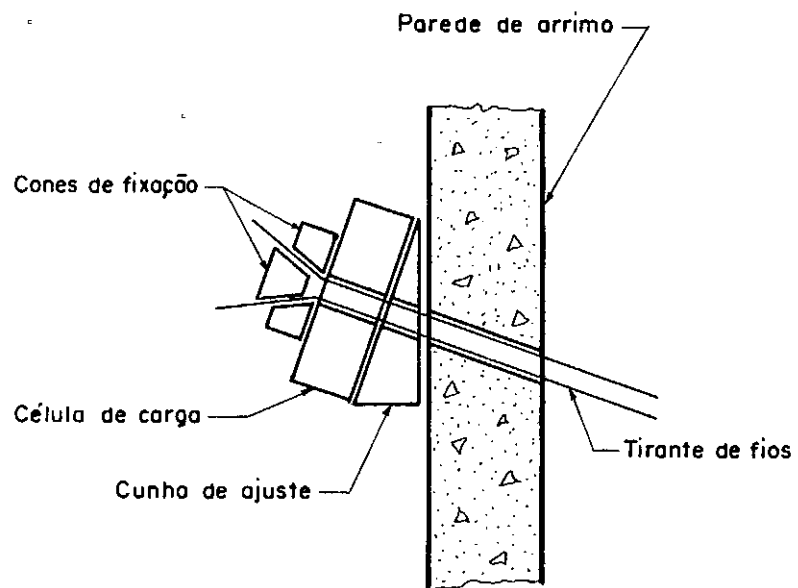
O aparelho de leitura Vishay apresenta outro problema que é a existência de um balanço interno que, se alterado, altera a curva de calibração e, pode acontecer sem que o operador perceba. O aparelho Kyowa é mais simples, não apresenta este tipo de problema, sendo então menos sujeito a variações de suas características.

A temperatura não afeta diretamente a leitura das células que é montada de modo a compensar esta influência, mas pode incidir sobre outros elementos da estrutura. A construção da galeria junto ao Palácio Monroe, por exemplo, foi acompanhada da execução de uma cobertura sobre as estroncas de modo a evi

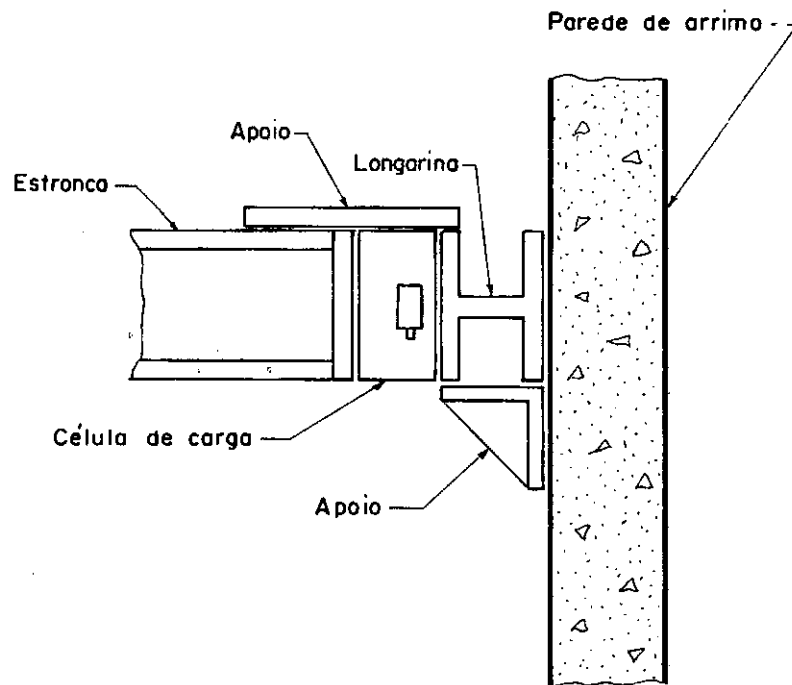
tar a incidência direta do sol, pois a dilatação térmica do aço alteraria o estado de tensões nas estroncas aumentando consideravelmente a carga atuante. Portanto a temperatura pode não causar influência direta na célula de carga, mas causa alteração no comportamento das estruturas com a variação das tensões, mudando os esforços gerados, pela geometria da escavação e condições do terreno.

Nas posições de instalação dos aparelhos deve ser executado um enrijecimento para melhorar a transmissão dos esforços e centralizar as cargas.

A interpretação dos valores de carga fornecidos pelo aparelho de leitura deverá ser feita com auxílio de curvas de calibração, e como esta apresenta um ciclo de histerese, tem-se o impasse já que nenhuma das duas representa corretamente o fenômeno do campo, pois neste, além do carregamento variar muito mais lentamente do que nos ensaios, fica estacionado por longos períodos. Em princípio podemos analisar os valores obtidos com um carregamento rápido através da curva de carregamento, e no caso de períodos longos de carga estabilizada através da curva de descarga.

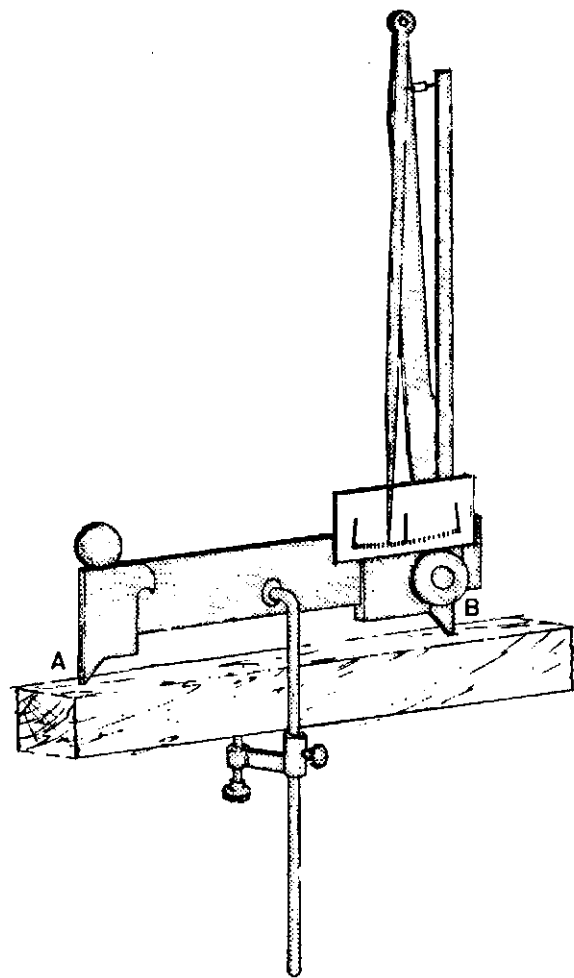


a) COM TIRANTES

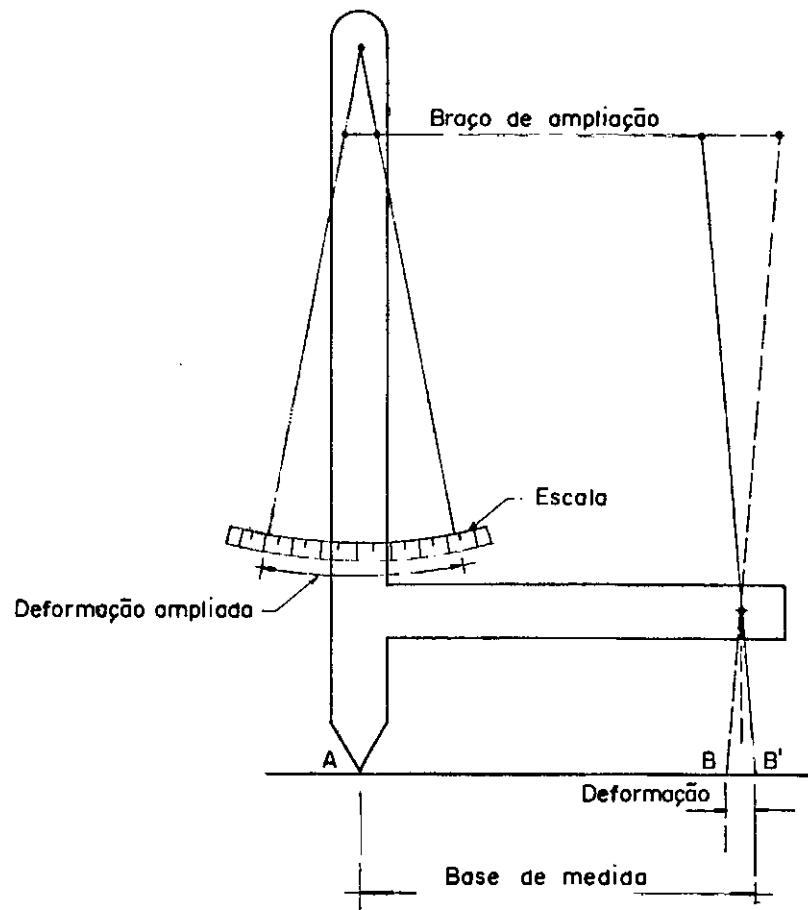


b) COM ESTRONCAS

FIG. 2.1 — Utilização das células de carga.

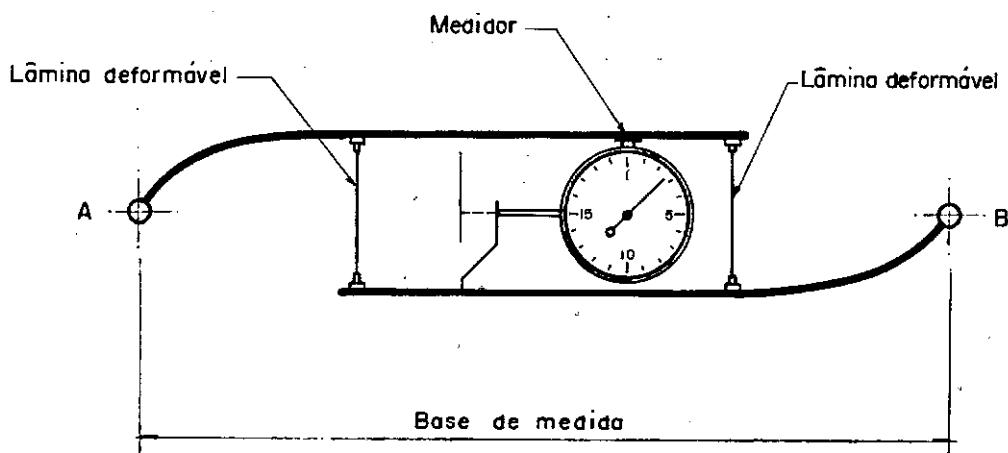


a) EXTENSÔMETRO HUGGEMBERGER DE FIXAÇÃO

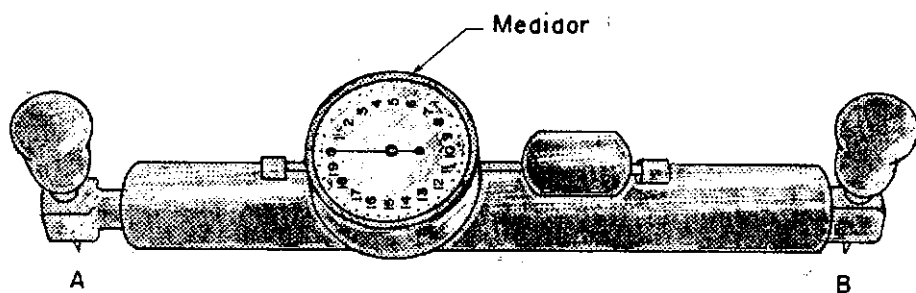


b) ESQUEMA DE OPERAÇÃO DE EXTENSÔMETRO HUGGEMBERGER DE FIXAÇÃO

FIG. 2.2 — Dispositivos mecânicos aplicados diretamente à estrutura solicitada.

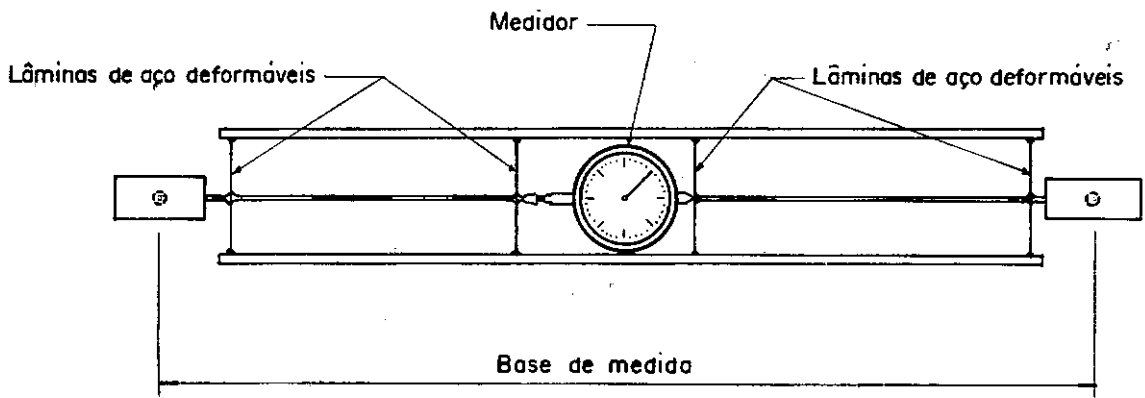


c) EXTENSÔMETRO LNEC

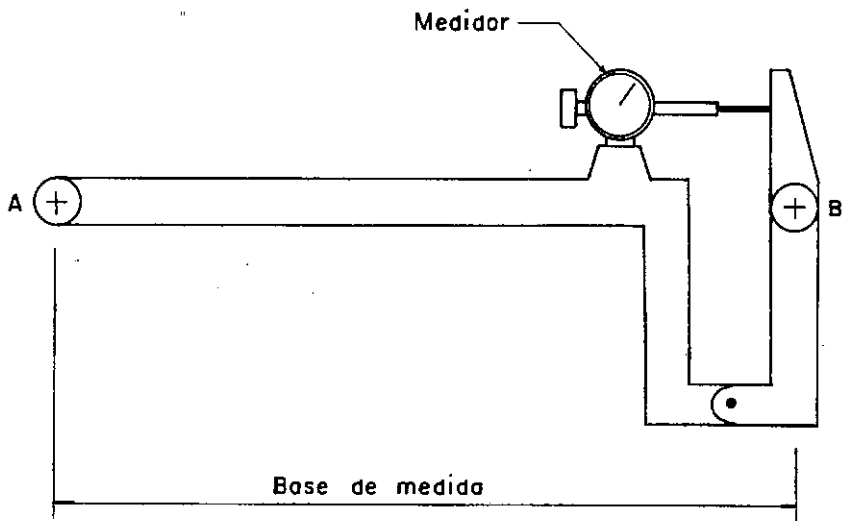


d) EXTENSÔMETRO HUGGEMBERGER

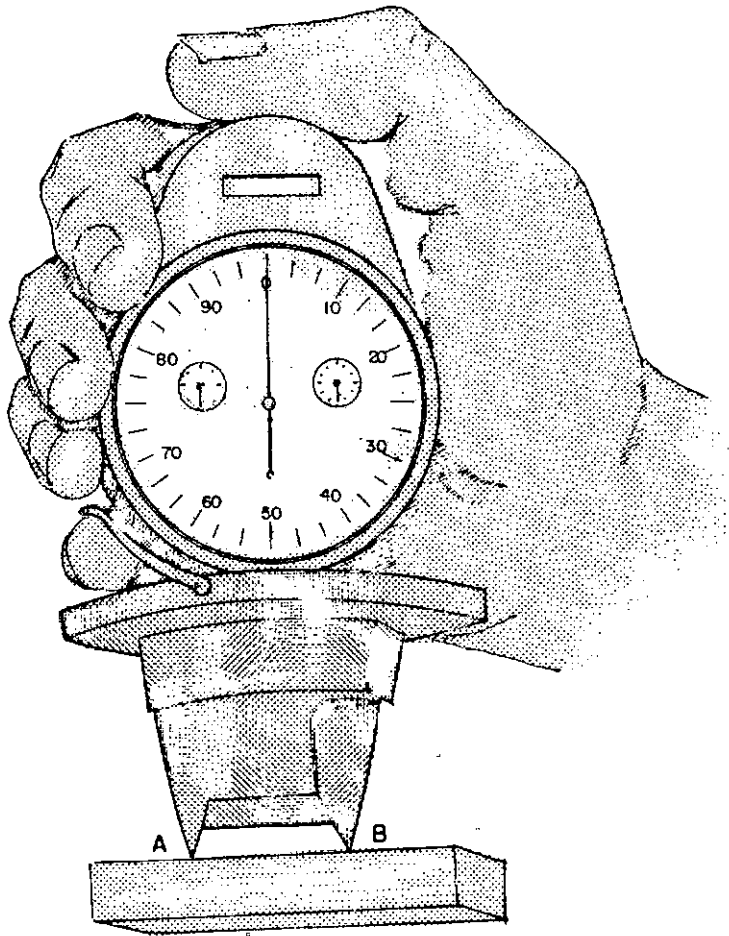
FIG. 2.2 — Dispositivos mecânicos aplicados diretamente à estrutura solicitada.



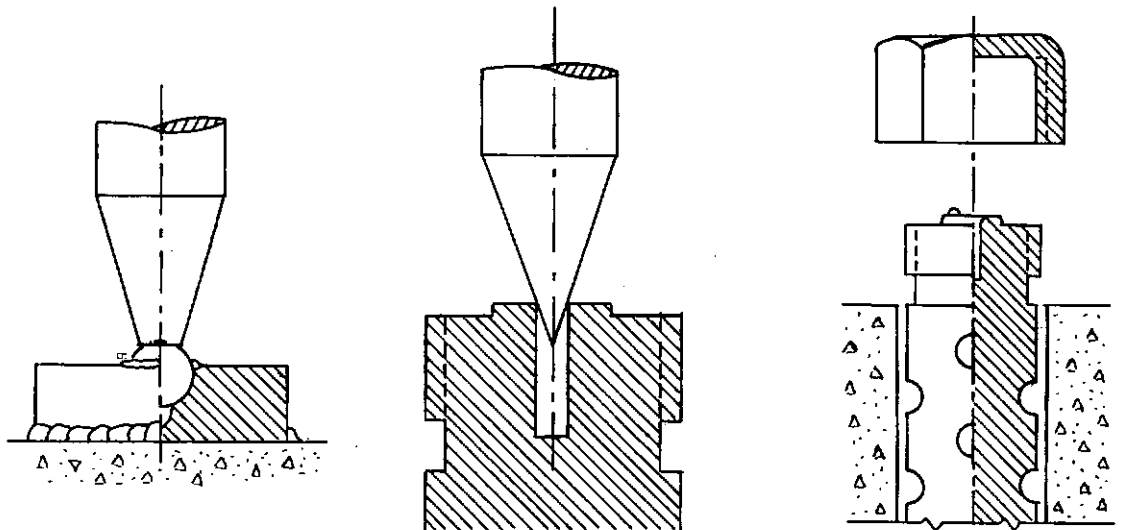
e) EXTENSÔMETRO LNEC



f) EXTENSÔMETRO DE BRAÇO PIVOTANTE

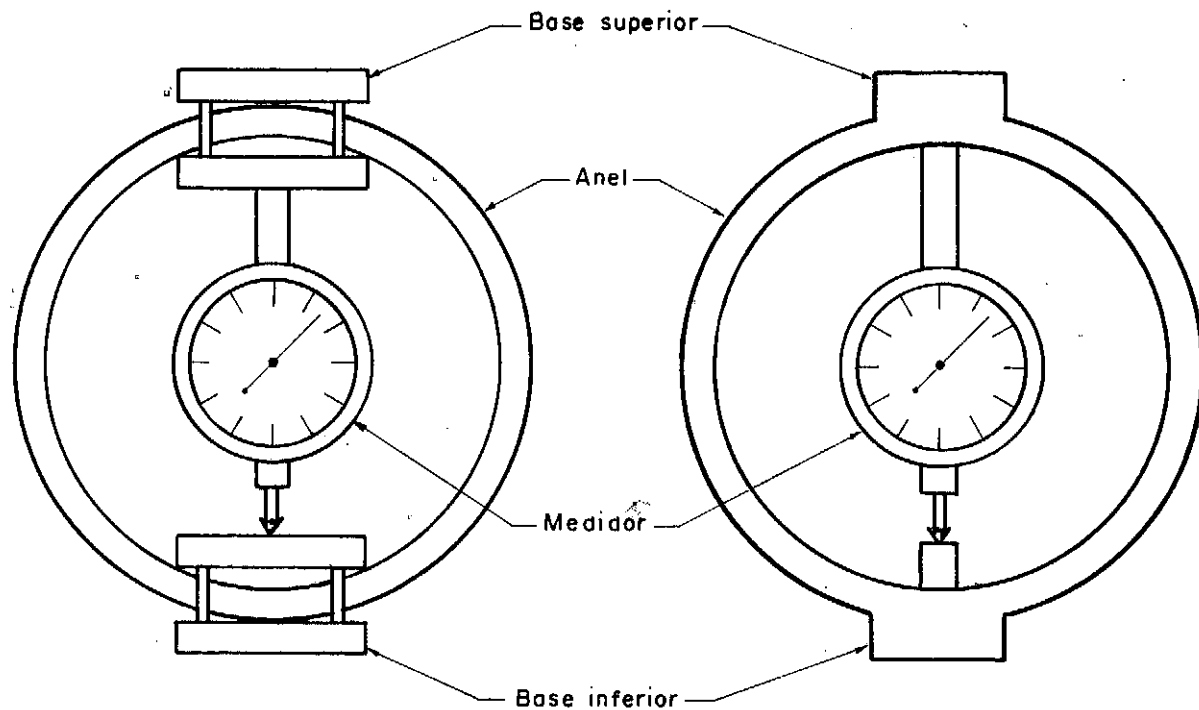


g) TENSOSTAT



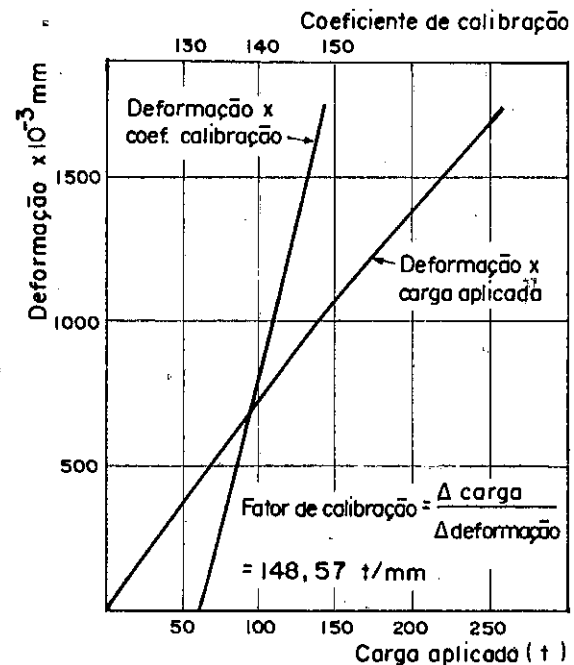
h) TIPOS DE BASES PARA APOIO DAS PONTAS DOS DISPOSITIVOS MECÂNICOS

FIG. 2.2 — Dispositivos mecânicos aplicados diretamente à estrutura solicitada.



a) ANEL DINAMOMÉTRICO DE BASES ISOLADAS

b) ANEL DINAMOMÉTRICO DE BASES FUNDIDAS



c) CURVAS TÍPICAS DE CALIBRAÇÃO DOS ANÉIS DINAMOMÉTRICOS

FIG. 2.3 — Anéis dinamométricos.

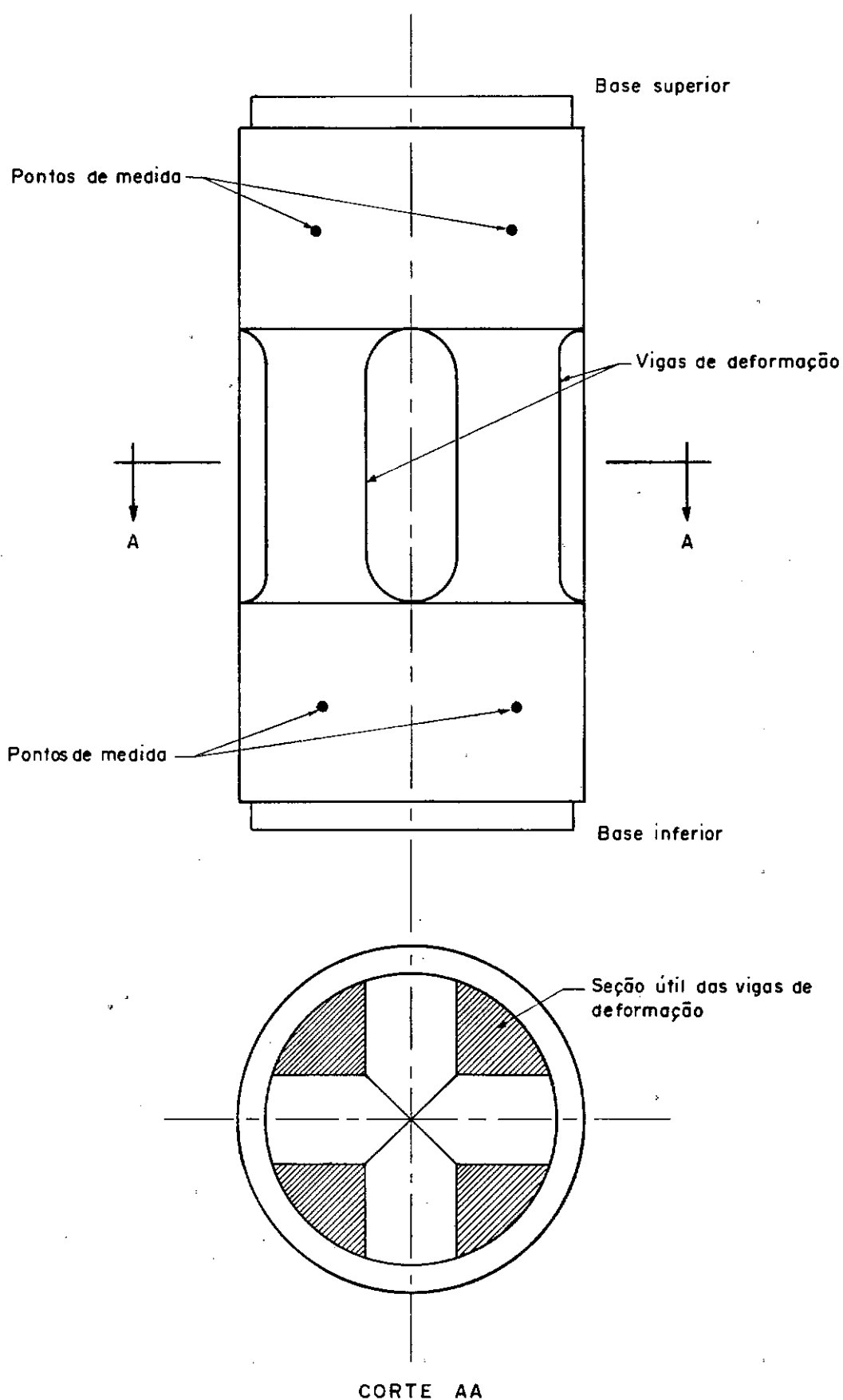
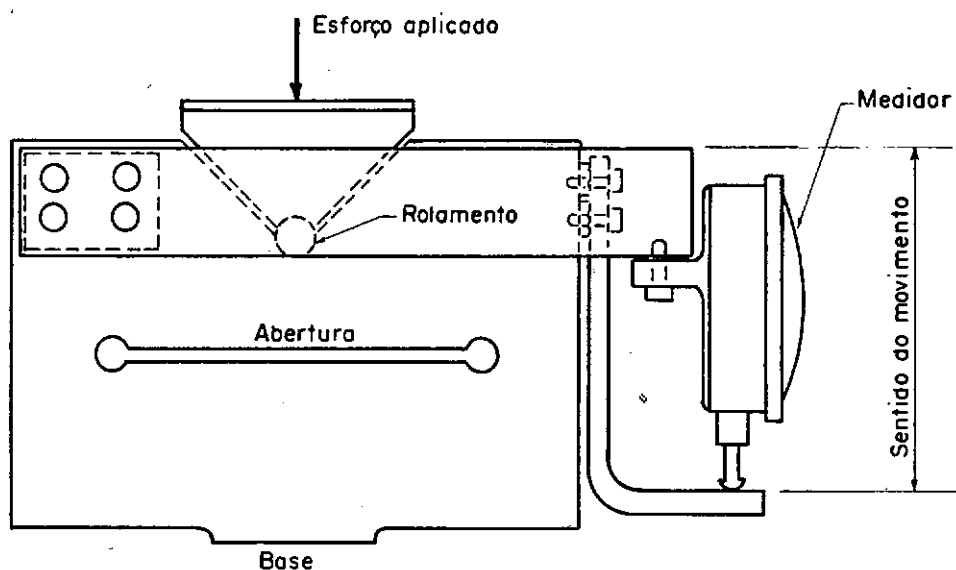
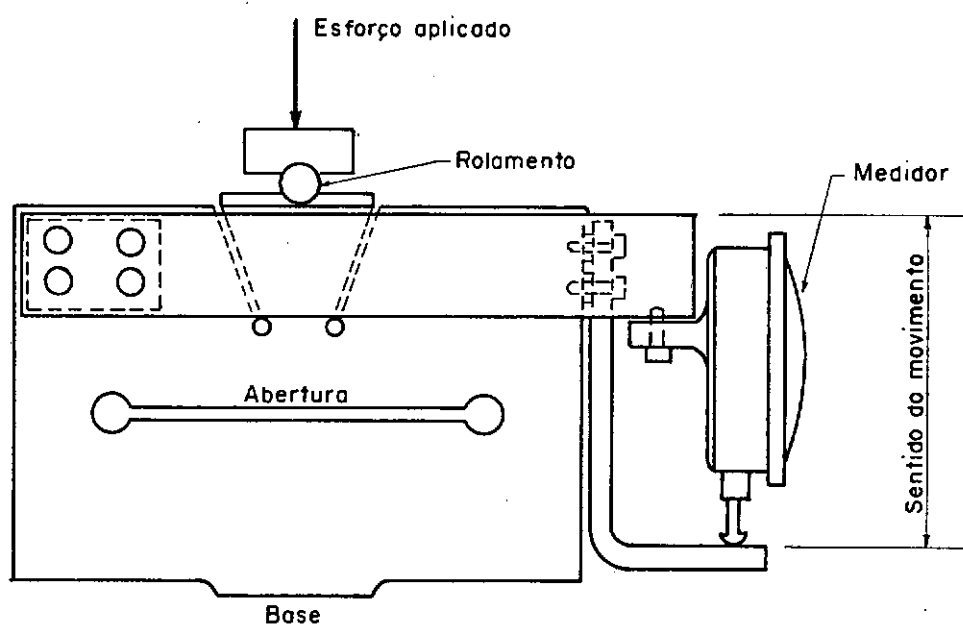


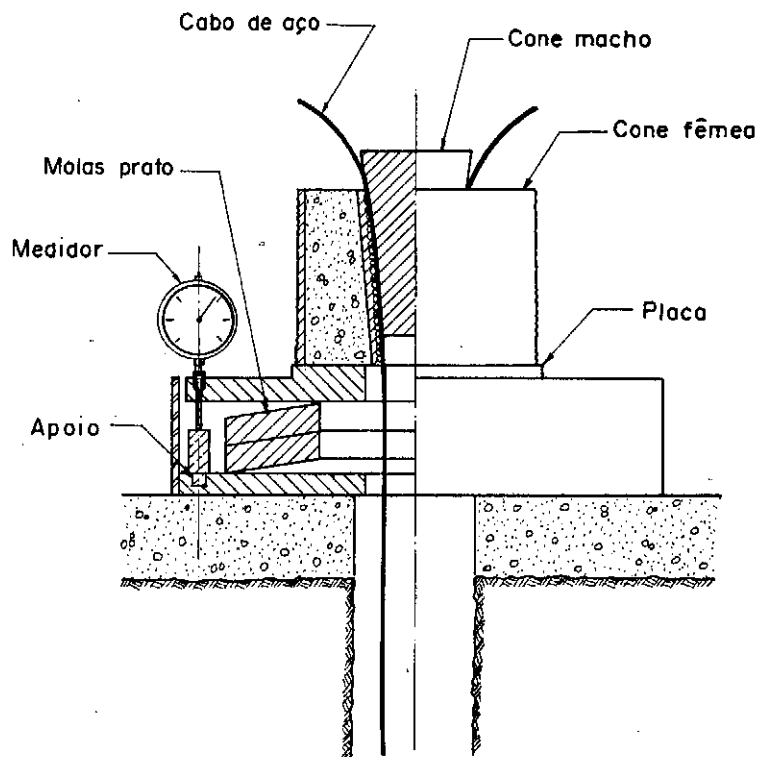
FIG. 2.4 — Bloco de medição de carga.



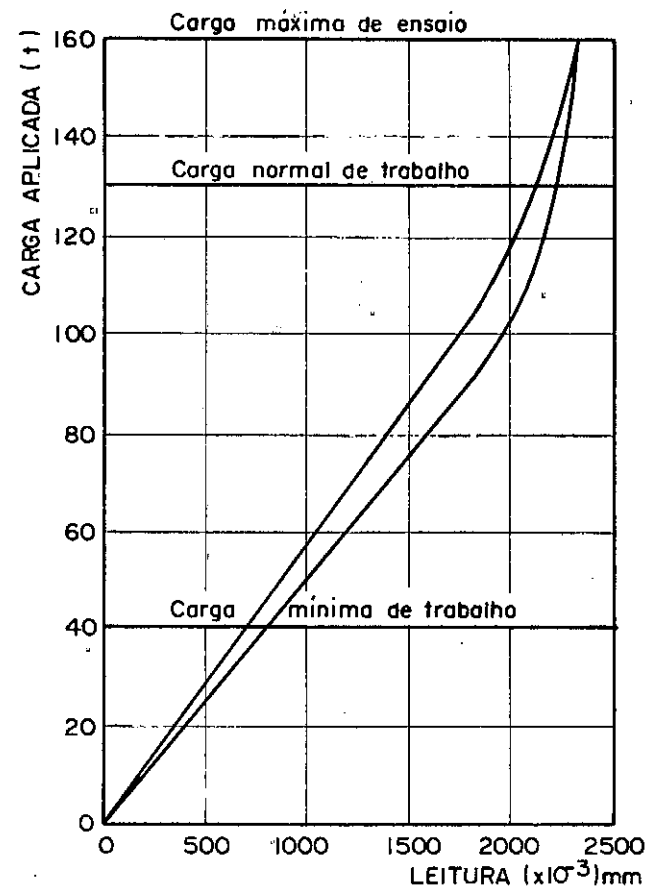
a) SISTEMA COM APOIO SOBRE ROLAMENTO PARA EVITAR EXCENRICIDADE DOS ESFORÇOS



b) SISTEMA COM APOIO SOBRE ROLAMENTO PARA EVITAR ATRITO E EXCENRICIDADE DOS ESFORÇOS

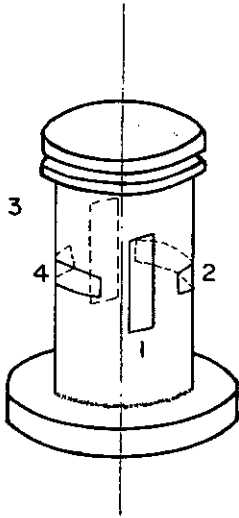


a) ESQUEMA DE UTILIZAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA DE MOLA-PRATO

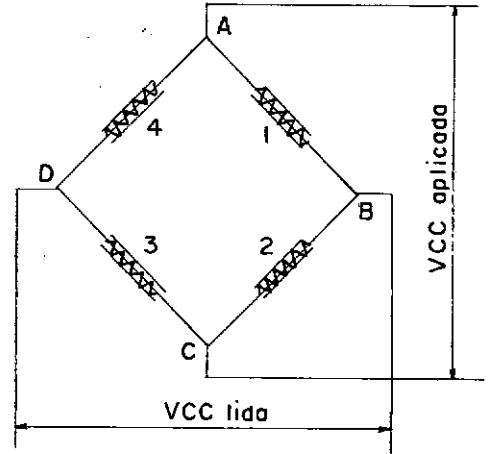


b) CURVA TÍPICA DE CALIBRAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA DE MOLA-PRATO

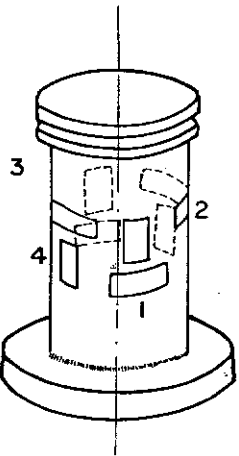
FIG. 2.6 – Célula de carga de mola-prato para emprego em tirantes.



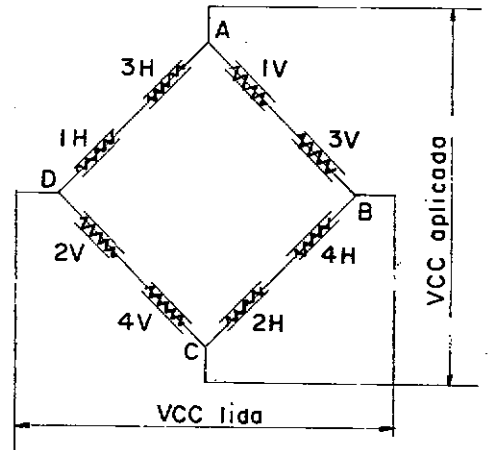
a) UTILIZAÇÃO DE QUATRO EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS



b) LIGAÇÃO DOS QUATRO EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS EM PONTE DE WHEATSTONE

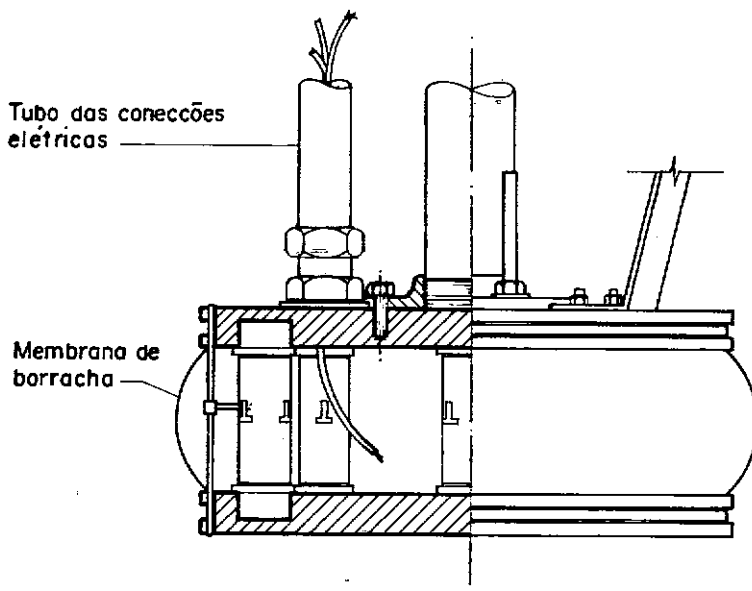


c) UTILIZAÇÃO DE OITO EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

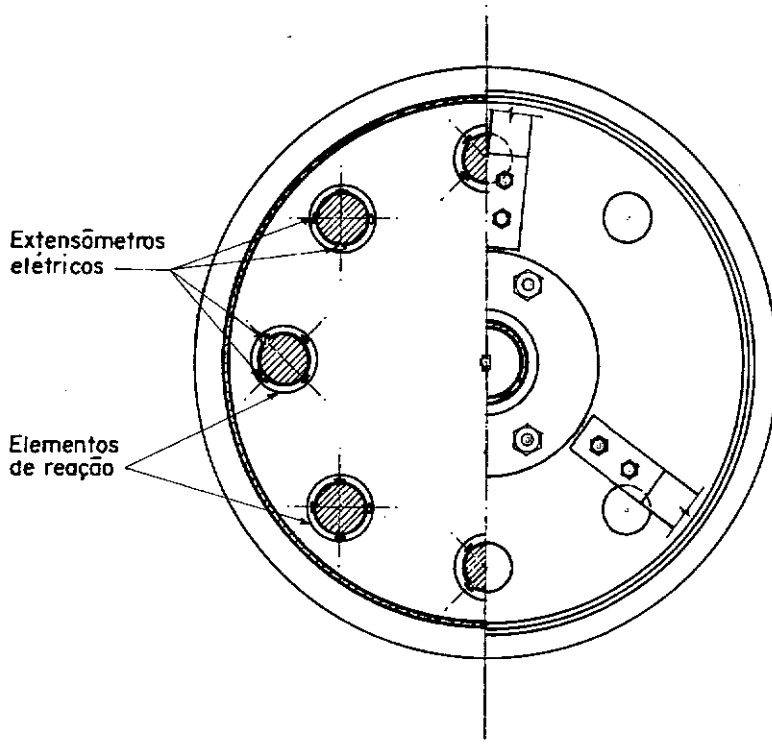


d) LIGAÇÃO DOS OITO EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS EM PONTE DE WHEATSTONE

FIG. 2.7 — Células de carga de extensômetros elétricos.

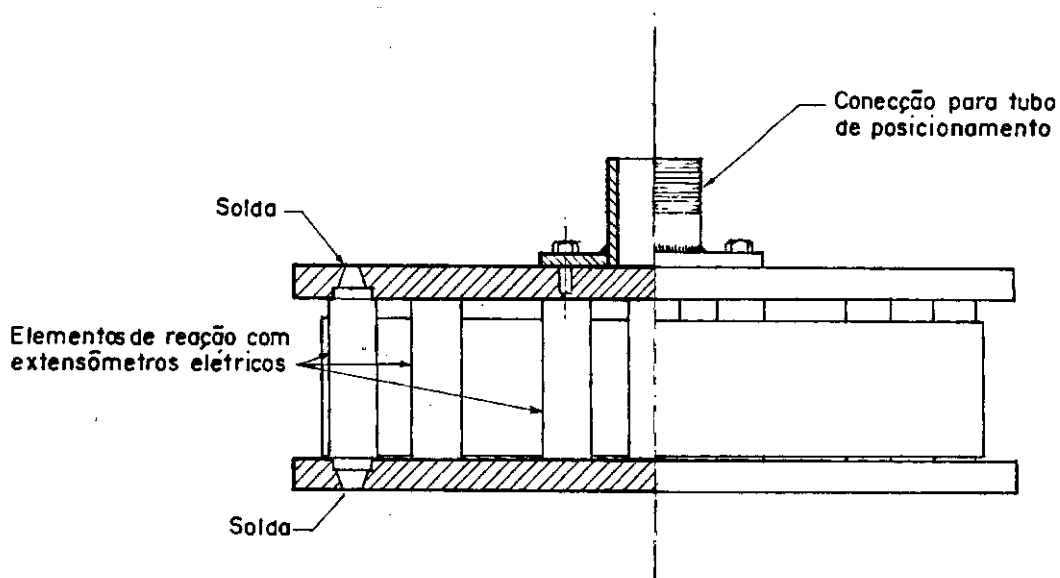


a) MEIO CORTE MEIA VISTA HORIZONTAL

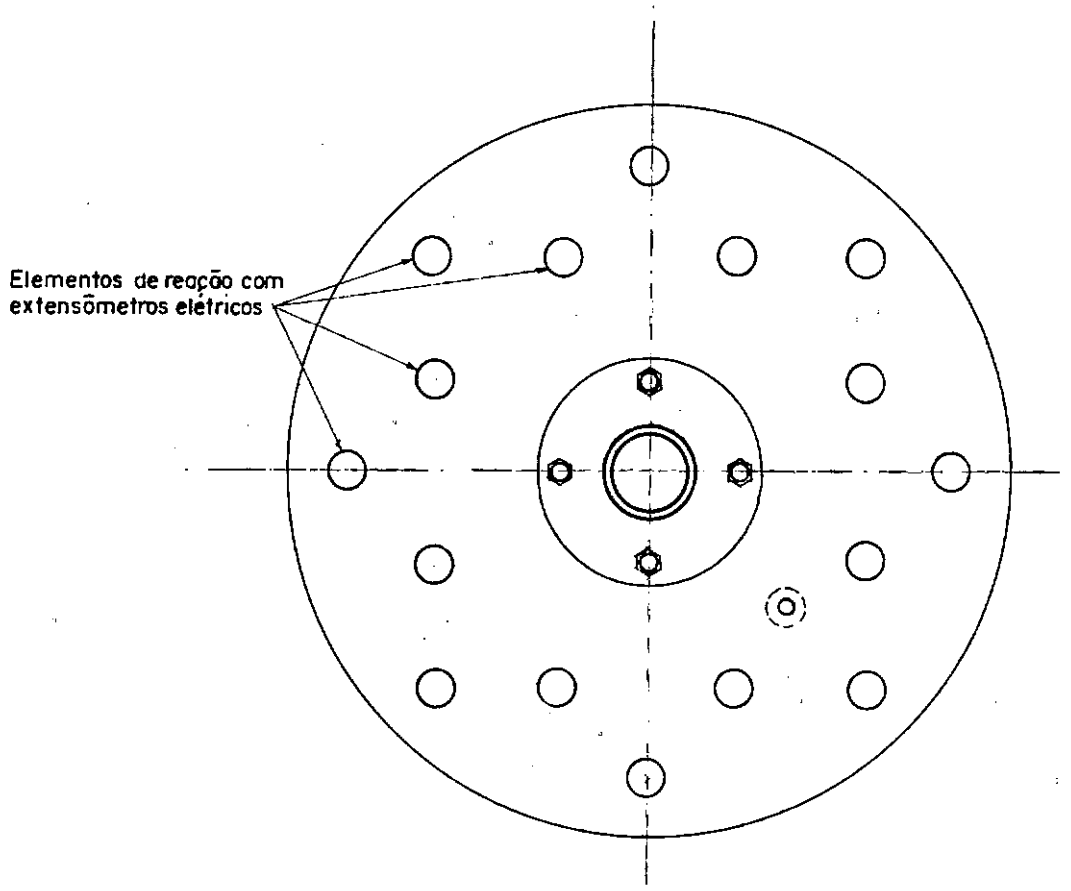


b) MEIO CORTE MEIA VISTA SUPERIOR

FIG.2.8 — Célula de carga de extensômetros elétricos de alta capacidade com 8 elementos de reação.

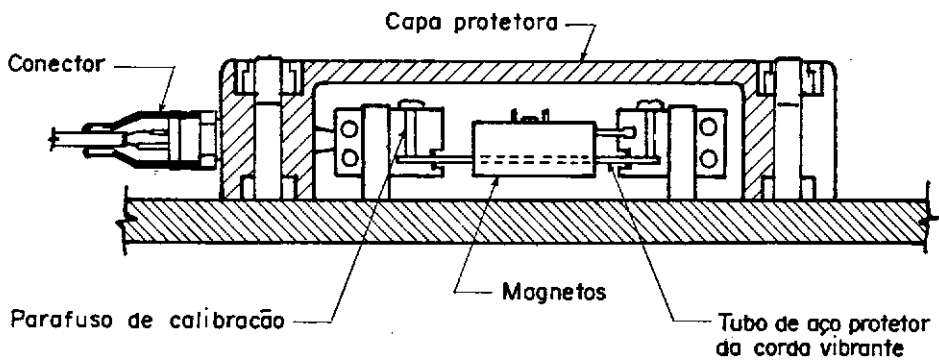


a) MEIO CORTE MEIA VISTA HORIZONTAL

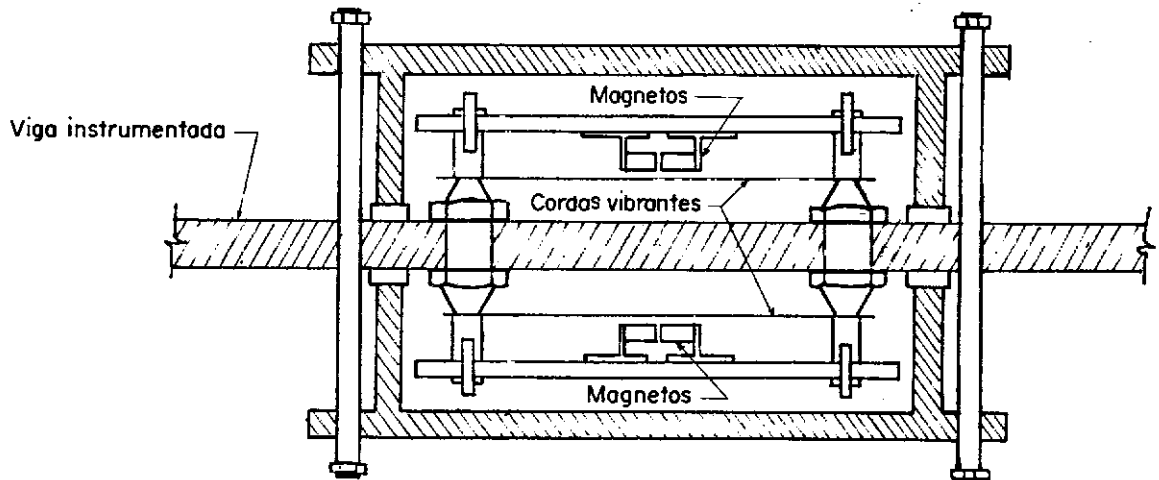


b) VISTA SUPERIOR

FIG.2.9 — Célula de carga de extensômetros elétricos de alta capacidade com 16 elementos de reação.



a) CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CÉCULA DO NGI



b) CARACTERÍSTICAS DA MONTAGEM PARA EVITAR ESFORÇOS DE FLAMBAGEM

FIG. 2.10 — Elemento de célula de corda vibrante do NGI e emprego em montagem.

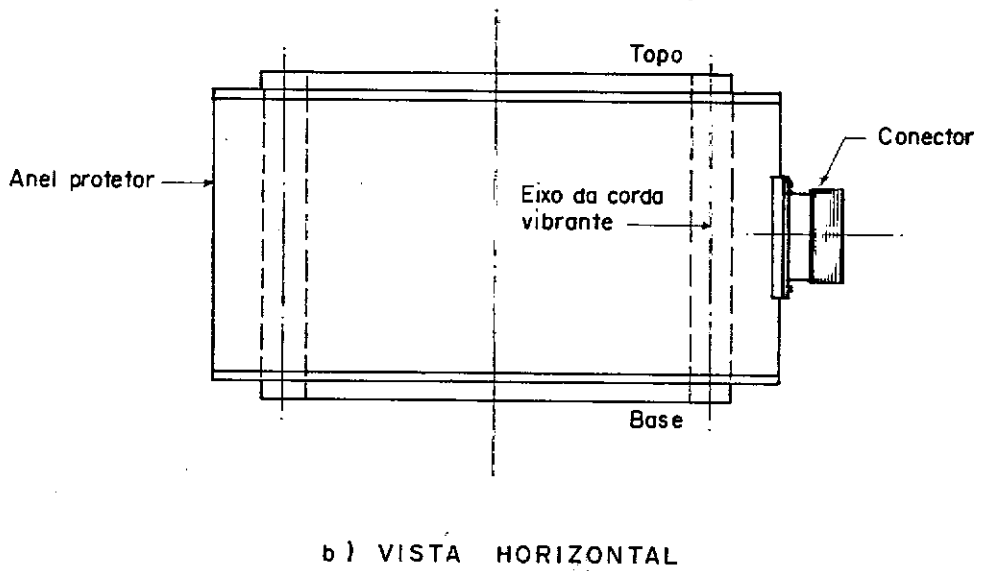
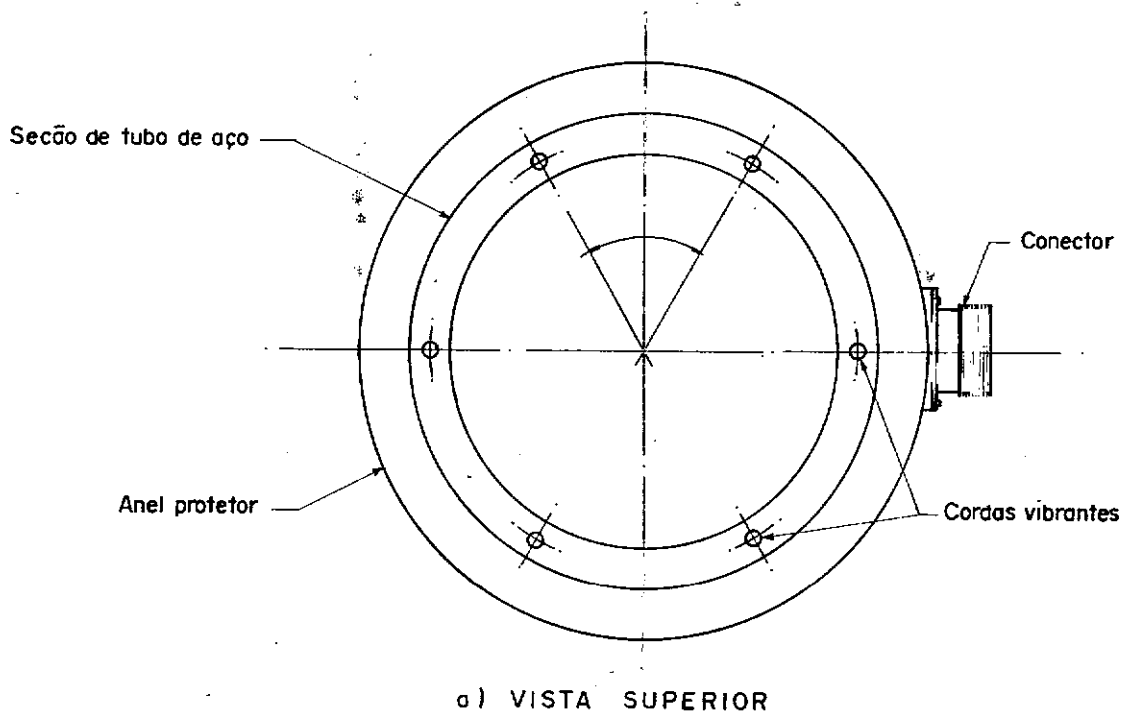
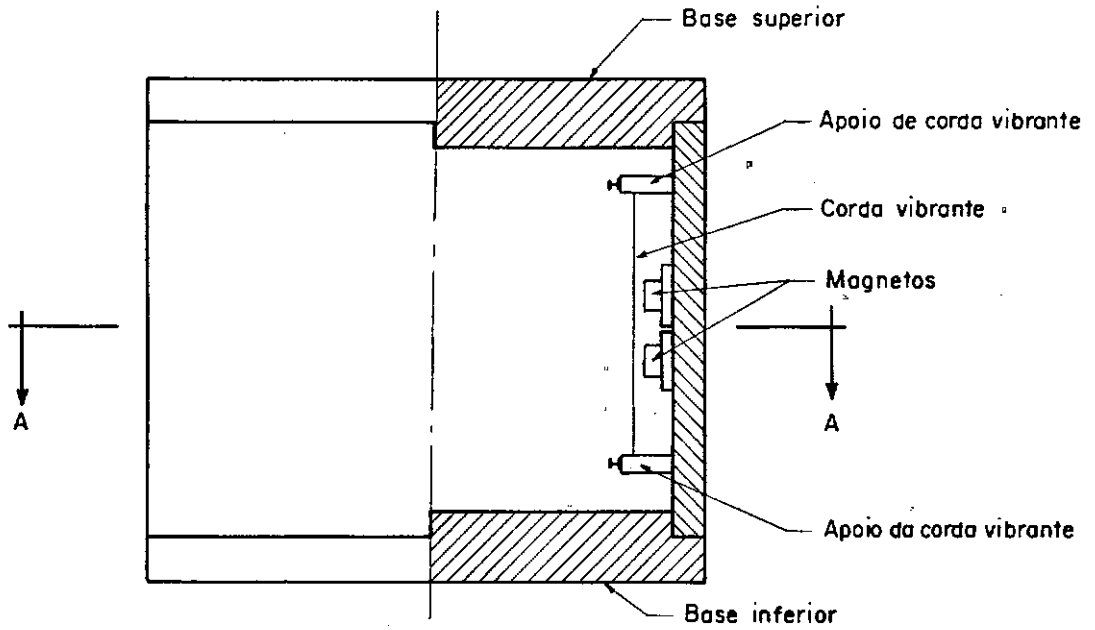
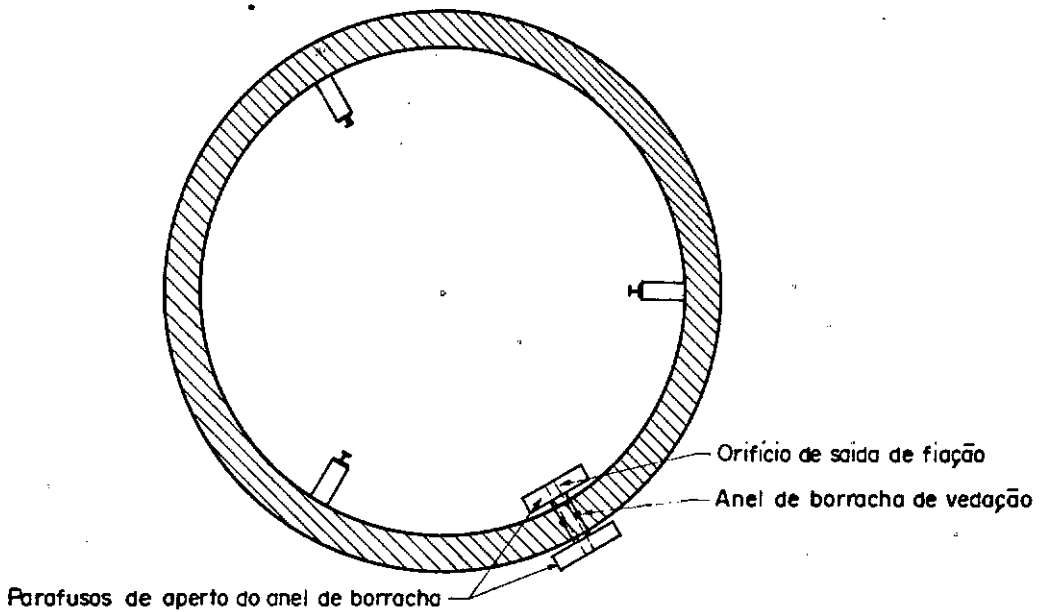


FIG. 2.11 — Célula de carga com cordas vibrantes

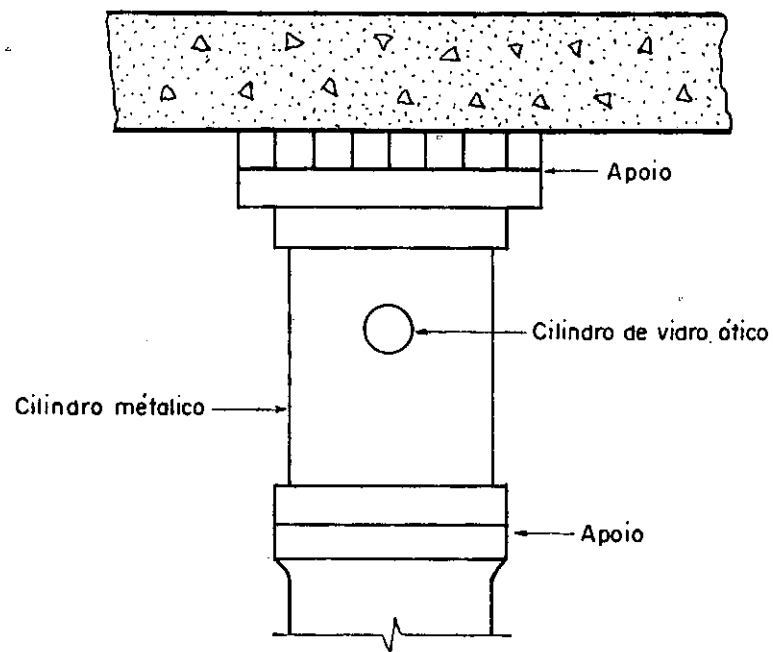


a) MEIA VISTA MEIO CORTE

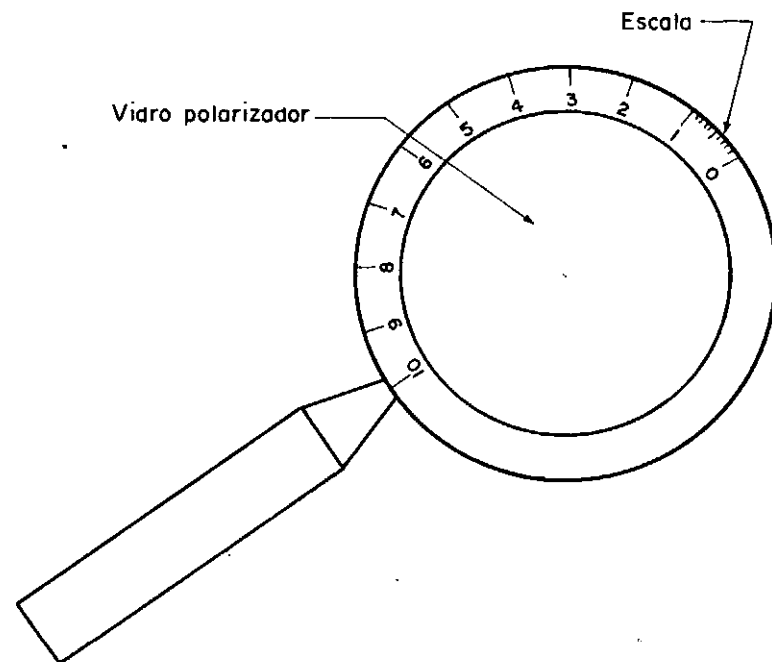


b) SECÃO AA

FIG. 2.12 — Célula de carga com três cordas vibrantes do N.G.I.

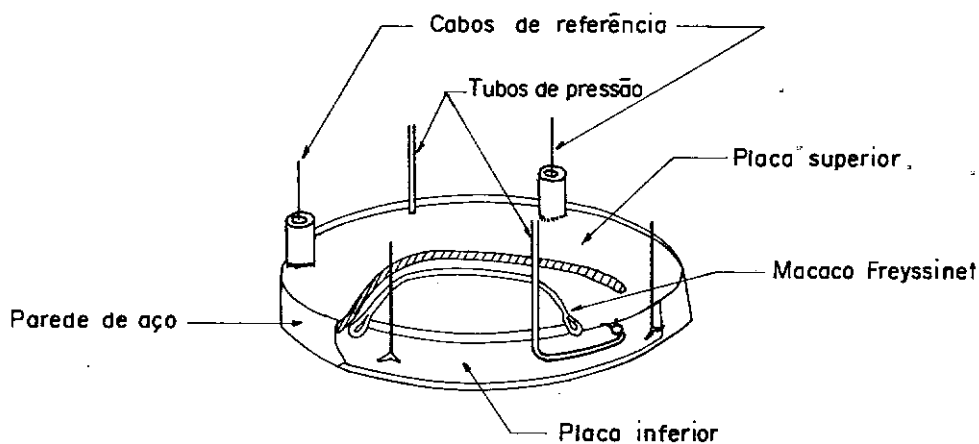


a) MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA FOTOELÁSTICA EM PILAR

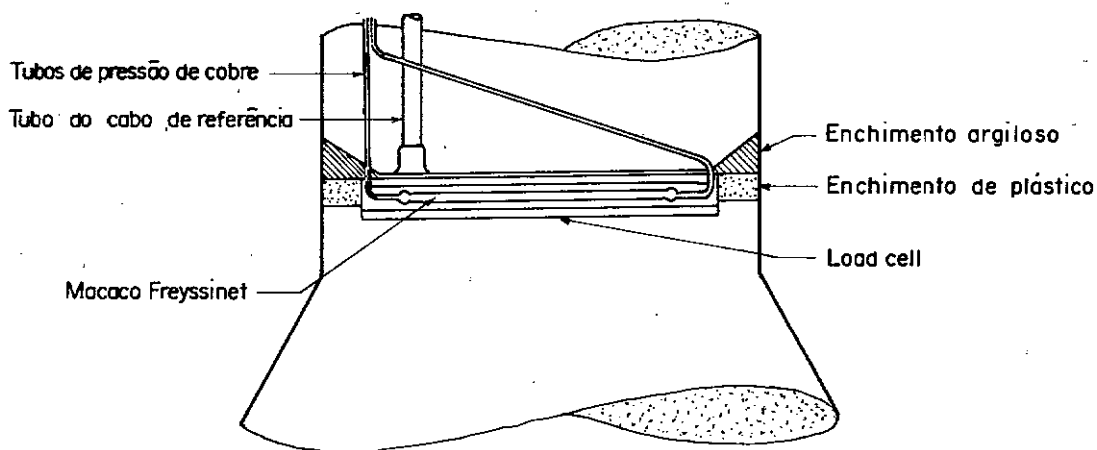


b) VISOR POLARIZADOR PARA A MEDIÇÃO DAS FRANJAS DO CILINDRO ÓTICO

FIG. 2.13 — Célula de carga fotoelástica.

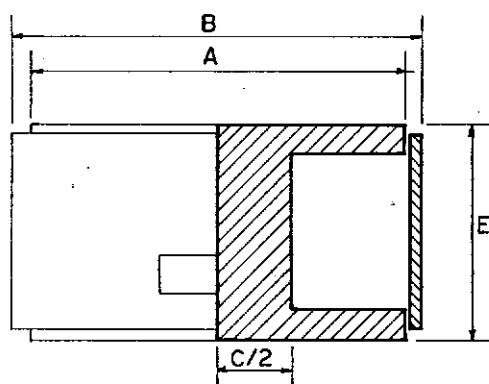


a) ARRANJO INTERNO DA CÉLULA

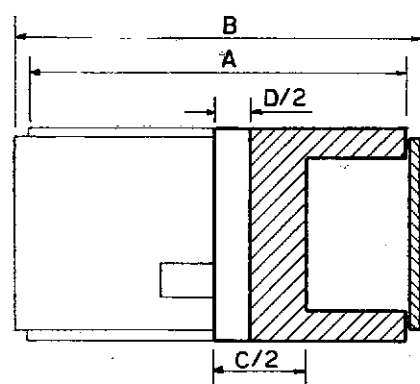


b) ESQUEMA DE APLICAÇÃO

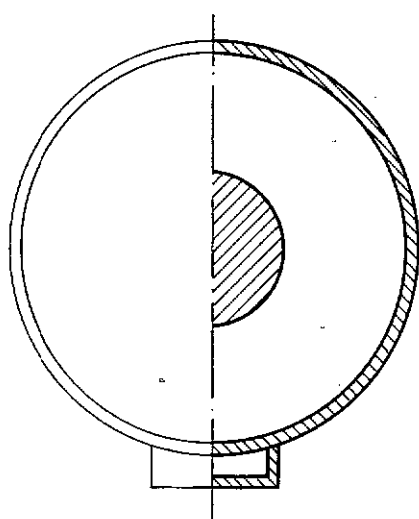
FIG. 2.14 — Célula de carga tipo Freyssinet para estacas escavadas de grandes diâmetros ou tubulares.



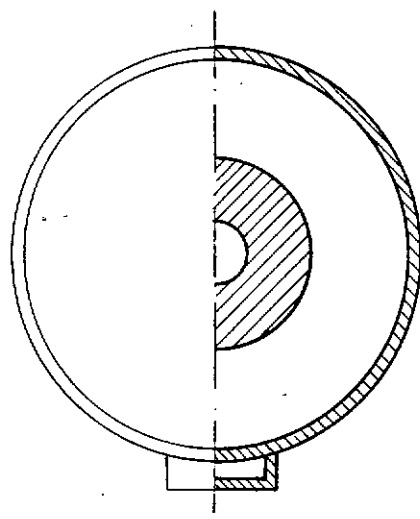
Meia vista meio corte horizontal



Meia vista meio corte horizontal



Meia vista meio corte topo



Meia vista meio corte topo

a) CÉLULAS DE CARGA PARA UTILIZAÇÃO COM ESTRONCAS

b) CÉLULAS DE CARGA PARA UTILIZAÇÃO COM TIRANTES

CÉLULA	A	B	C	D	E	PESO
60†	9	10	4	—	12	6
150†	13	14	8	5	15	9
160†	12	13	7	—	15	11
200†	13	14	8	—	15	11

c) TABELA DE DIMENSÕES
(cm e kg)

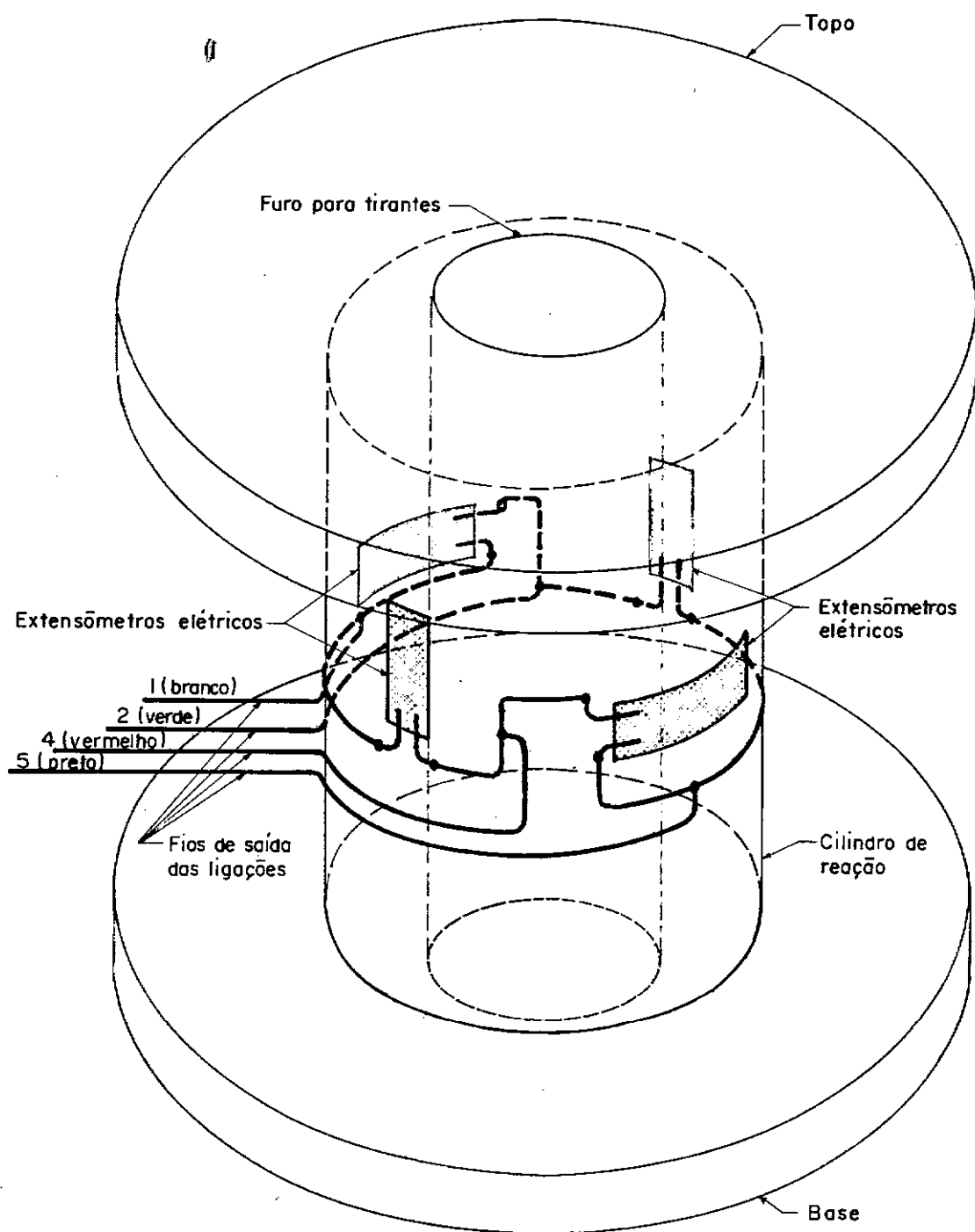
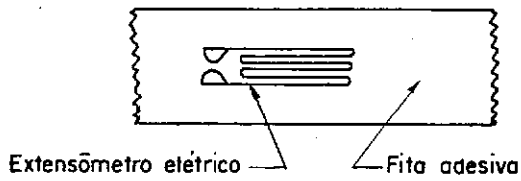
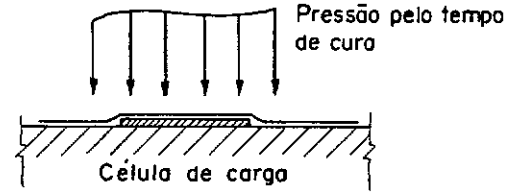


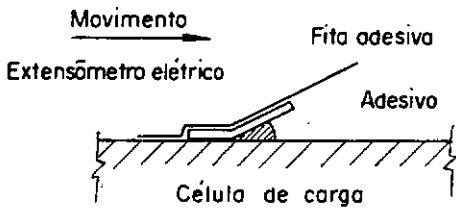
FIG. 2.16 — Célula de carga aberta mostrando a ligação dos extensômetros elétricos.



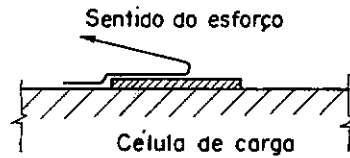
a) EXTENSÔMETRO ELÉTRICO COLADO NA FITA ADESIVA



c) APLICAÇÃO DA PRESSÃO DURANTE A CURA

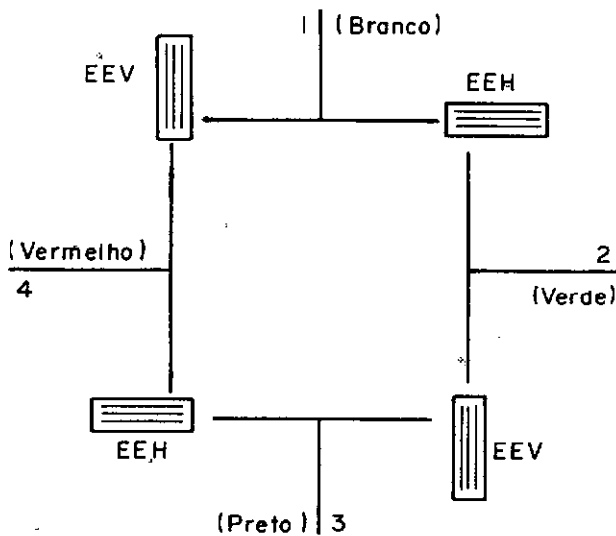


b) POSICIONAMENTO DO EXTENSÔMETRO ELÉTRICO



d) ARRANCAMENTO DA FITA ADESIVA

FIG. 2.17 — Fase de colagem.



EEV — Extensômetro elétrico disposto verticalmente
 EEH — Extensômetro elétrico disposto horizontalmente

FIG. 2.18 — Esquema de ligação interna dos fios.

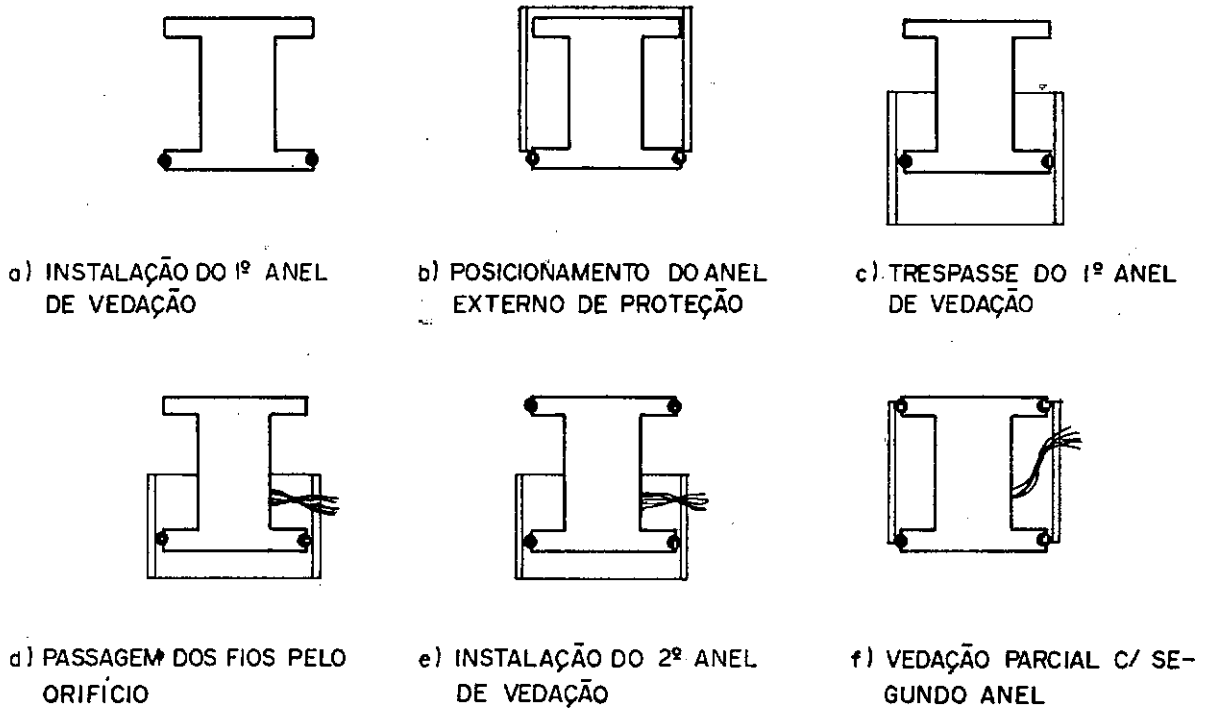


FIG. 2.19 — Fases da montagem do anel externo de proteção.

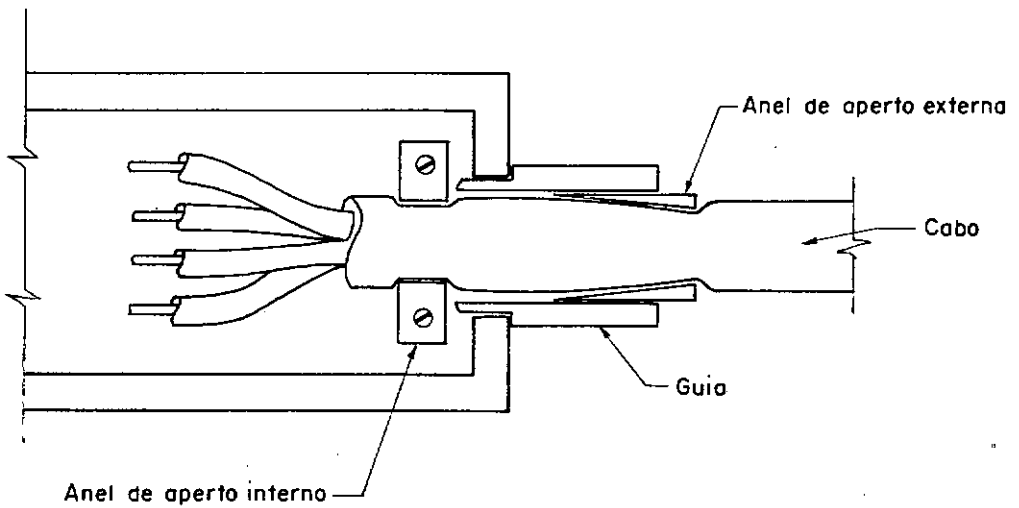
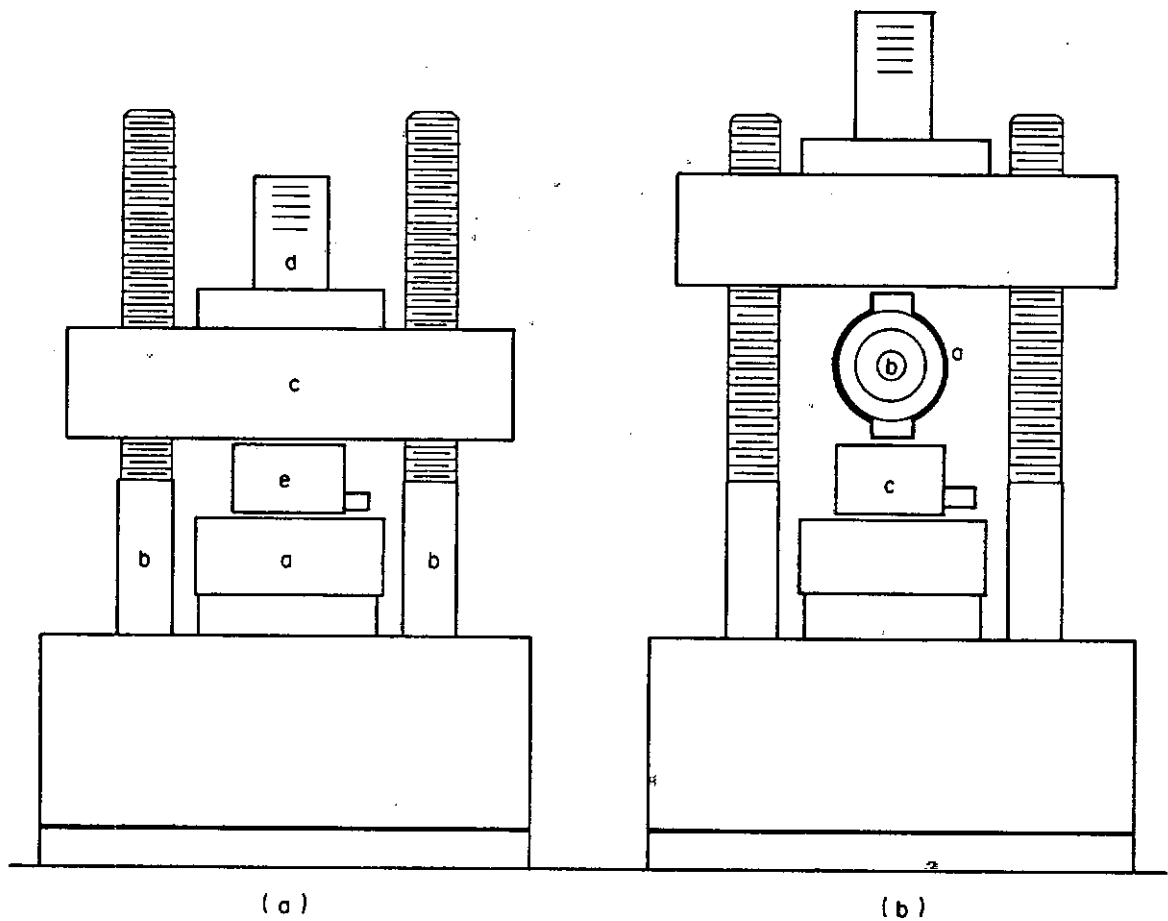


FIG. 2.20 — Montagem do cabo elétrico externo.



(a) MONTAGEM NORMAL

- a - pistão
- b - hastes de reação
- c - viga de reação
- d - motor de ajuste
- e - célula em ensaio

(b) MONTAGEM COM PADRÃO

- a - anel dinamométrico de calibração padrão
- b - relógio comparador
- c - célula de carga

FIG. 2.21 — Montagem da célula de carga na prensa de calibração.

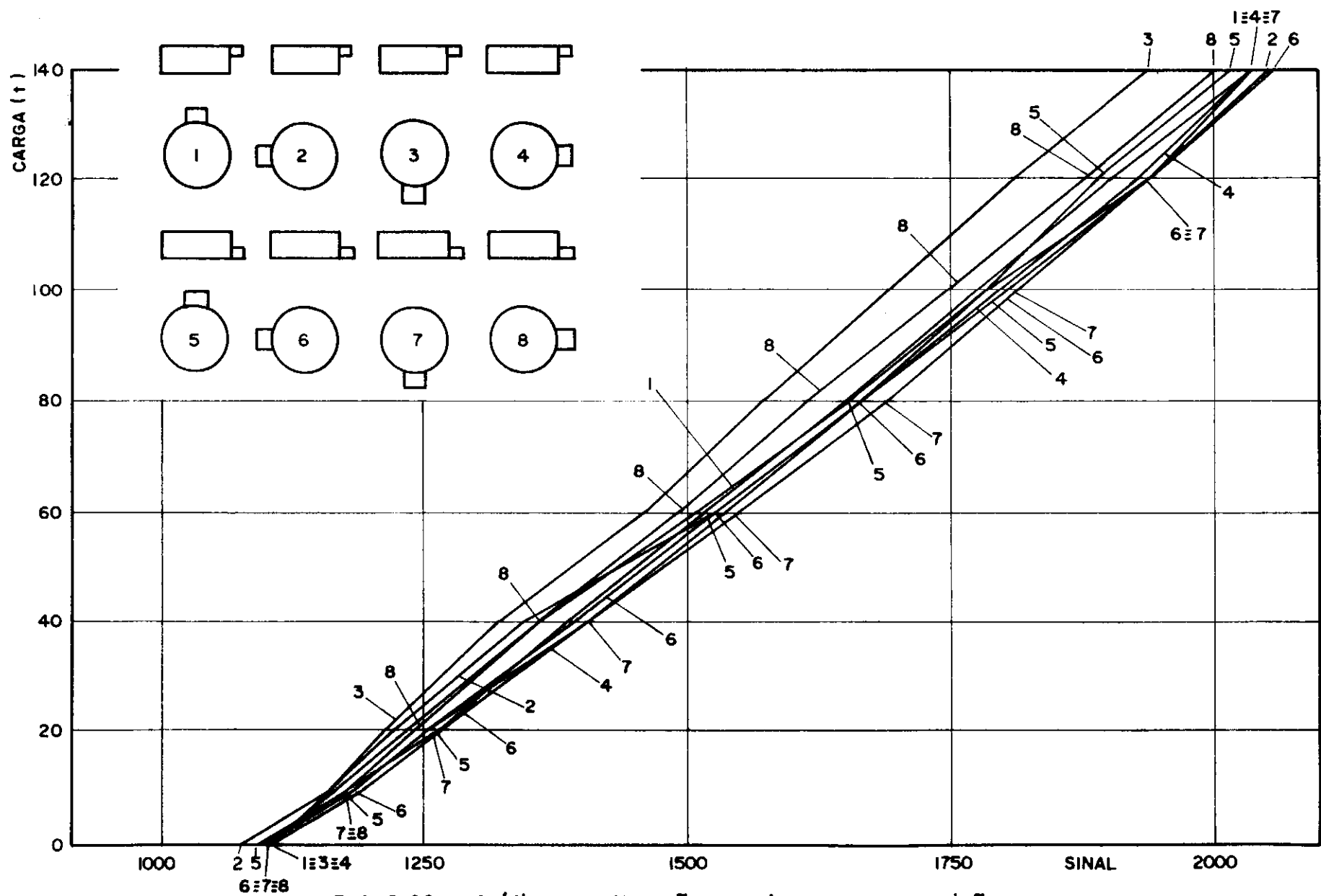


FIG. 2.22 — Gráfico de alteração da leitura com a posição na prensa.

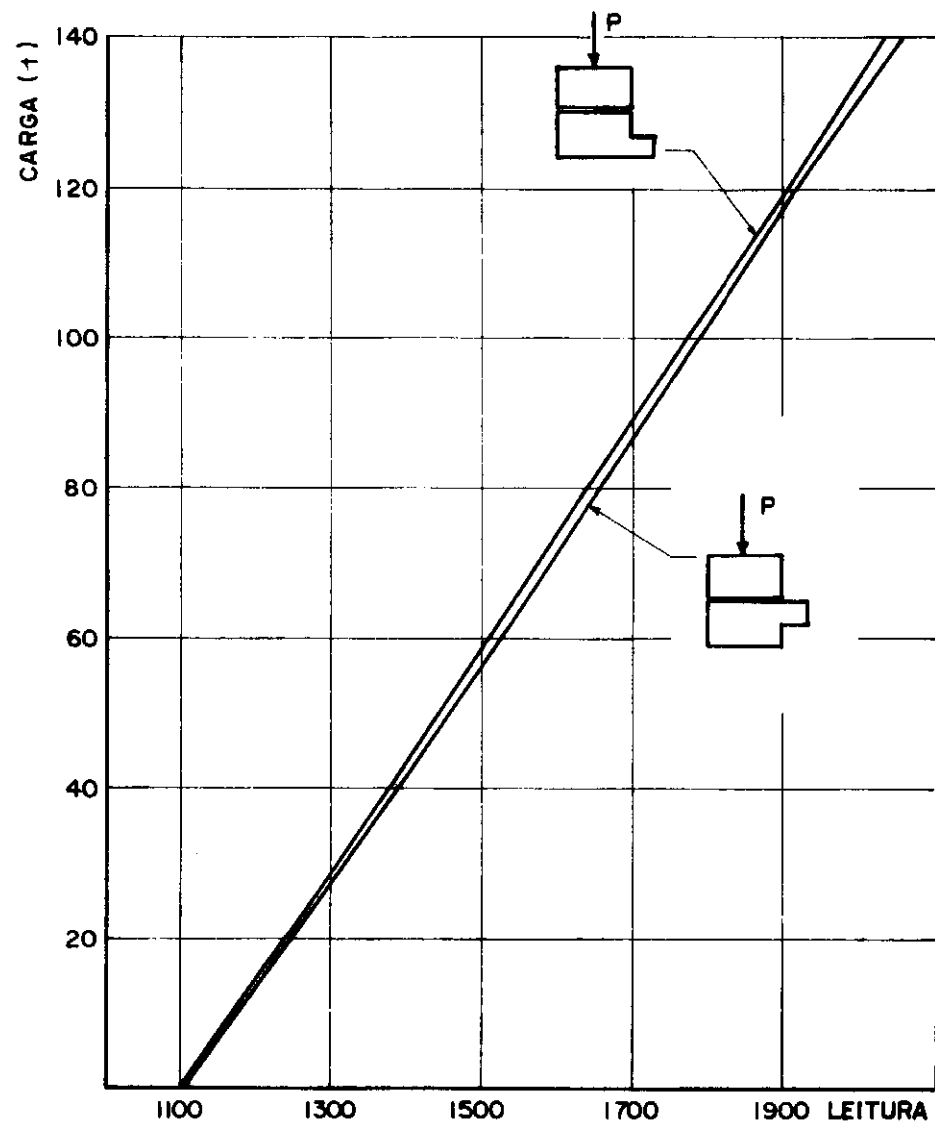


FIG. 2.23 — Ensaio de calibração com carretel superposto à célula para melhorar a distribuição dos esforços.

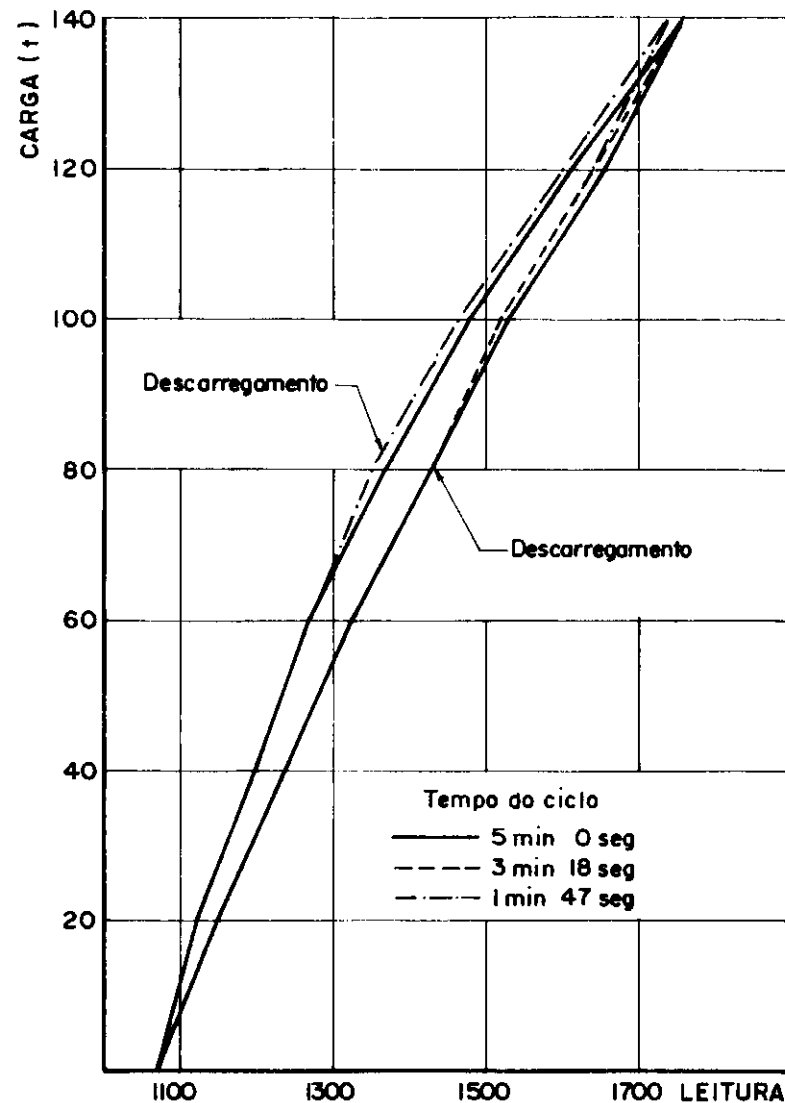
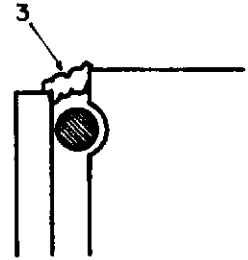
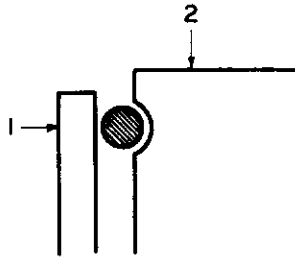
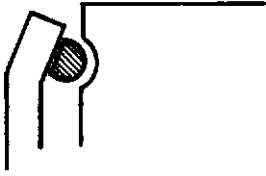
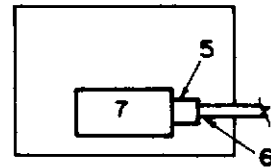
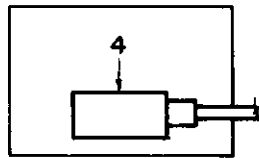
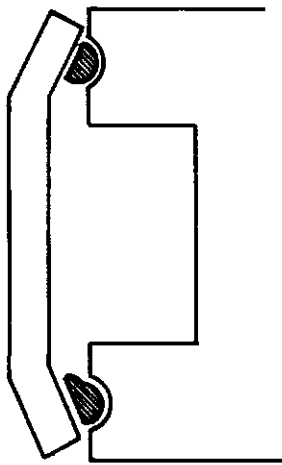


FIG. 2.24 — Influência do tempo de duração do ciclo de carga e descarga no sinal fornecido pela célula.



a) AMASSAMENTO DO ANEL PROTETO,
POR CHOQUE, CAUSANDO ESMAGA-
MENTO DO ANEL DE BORRACHA



b) SOLIDARIZAÇÃO SUPERIOR E
INFERIOR DO ANEL PROTETOR
ALTERANDO A ÁREA DE AÇO
DE REAÇÃO

c) PROBLEMAS PROVENIENTES DE SOLDA

- 1 e 2 - aquecimento perto do anel de borracha
- 3 - solda do anel protetor com o carretel
- 4 - solda da tampa da caixa de passagem com o corpo da célula
- 5 - solda da guia e cone do cabo externo
- 6 - danos ao cabo externo
- 7 - derretimento e curto dos fios da célula

FIG. 2.25 - Danos de operação das células de carga.

CAPÍTULO 3

PIEZÔMETROS PNEUMÁTICOS

CAPÍTULO 3PIEZÔMETROS PNEUMÁTICOS3.1 Introdução

Os piezômetros são instrumentos que tem como objetivo avaliar o valor da pressão do fluido intersticial do solo, no ponto em que estão instalados, com a finalidade de fornecer subsídios à avaliação do comportamento geotécnico dos terrenos. A aplicação dos piezômetros abrange as mais diversas finalidades, e sempre que se depara com o problema da existência de água no solo seu emprego é de relevante utilidade. É evidente a importância deste tipo de instrumento em obras de barragens, onde são úteis na avaliação de desenvolvimento das pressões neutras durante a construção e no acompanhamento da evolução da linha freática durante o enchimento do reservatório, e no controle de aquíferos em escavações de túneis e poços subterrâneos.

Além disto, o seu emprego em estruturas de arrimo fornece elementos para o cálculo das pressões neutras atuantes nas mesmas, e no caso do Metrô do Rio de Janeiro, no lote 9 em Botafogo, foram empregados piezômetros para avaliar o nível de pressões no fundo da cava, com a finalidade de se controlar a possibilidade de ruptura de fundo.

São instrumentos cujo procedimento de instalação requer cuidados e a presença de pessoal qualificado, existindo uma larga gama de modelos desenvolvidos para as mais diversas finali

dades, características de instalação de campo e acuracidade necessária da resposta ao fenómeno que se quer avaliar.

3.2 Tipos de Piezômetros

Os piezômetros podem ser classificados em três tipos básicos, dependendo dos sistemas utilizados para ativar o aparelho e transmitir o sinal ao ponto de observação. Uma descrição destes tipos básicos é feita a seguir:

a) Piezômetros Hidráulicos de Sistema Aberto - este tipo consiste de um tubo vertical tendo uma ponta porosa no fundo. O nível de água é medido abaixando-se um sensor com uma escala até que ele toque a superfície da água. O sensor pode ser elétrico ou acústico, com muitas variações mas o mesmo princípio de funcionamento. O aparelho consiste de um medidor de resistência, conectado por cabos blindados a uma ponta de prova pesada de diâmetro fino. Pesos adicionais podem ser instalados ao longo do fio para facilitar a introdução da ponta, esticando o fio. A ponta é desencapada para dar contacto, e deve ser inspecionada frequentemente para verificar se os contactos expostos não estão em curto e se estão limpos. O contacto entre a superfície da água e o fio desencapado da ponta de prova fecha o circuito e isto é registrado em um ohmímetro.

b) Piezômetros Hidráulicos de Sistemas Fechados - este tipo consiste de um ou dois tubos cheios de fluido e com uma pedra porosa na ponta. A outra ponta é conectada a um manômetro no local de observações. No tipo de dois tubos o segundo serve como meio de percolar o aparelho com fluido de circulação para

remover acumulações de gases ou sedimentos, que dificultam as leituras ou alteram as respostas do aparelho.

c) Piezômetros de Diafragma - este tipo consiste de uma célula com diafragma impermeável protegida do contacto com o solo por uma pedra porosa que permite o acesso da água e/ou ar ao diafragma. Os piezômetros de diafragma podem ser pneumáticos ou elétricos, dependendo do meio utilizado para determinar a pressão no diafragma.

Nos piezômetros pneumáticos, dois tubos, que vão desde a estação de observação, são conectados em aberturas no corpo da célula. A pressão exercida na célula causa a abertura ou o fechamento do diafragma, dependendo do tipo de projeto. Para medir a pressão neutra, ar comprimido é introduzido em um tubo até que a pressão nos dois lados do diafragma seja balanceada, permitindo então que o ar retorne à estação de observação através do segundo tubo. Gases ou líquidos podem ser utilizados em lugar do ar. A deflexão causada pela pressão nos poros pode ser medida eletricamente, por meio de transdutores elétricos ou cordas vibrantes instaladas no diafragma e percebidas com equipamentos apropriados na estação de leituras.

Também foram desenvolvidos piezômetros de diafragma que utilizam uma combinação de meios pneumáticos e elétricos para determinar a pressão da água intersticial no diafragma: um gás é introduzido na célula através de um tubo até que as pressões nos dois lados do diafragma sejam balanceadas como indicado por uma conexão ou desconexão de circuito elétrico. Uma descrição de vários tipos de piezômetros encontrados é apresentada a seguir,

descrevendo também suas vantagens e desvantagens principais.

3.2.1 Piezômetros Hidráulicos de Sistema Aberto

a) Casagrande de Tubo Poroso - o piezômetro de Casagrande consiste de um tubo de diâmetro interno de 3/8" conectado a uma ponta perfurada envolvida em tela conforme mostrado na figura 3.1. Para facilitar a descida da ponta de prova, o diâmetro do tubo pode ser aumentado para 1/2", entretanto isto aumenta o tempo de resposta. O piezômetro é usualmente instalado na vertical em um furo de sondagem e um filtro de areia é colocado em volta da ponta porosa. O tempo de resposta deste piezômetro é relativamente curto se comparado com outros piezômetros de tubo, e pode ser instalado em solos que possuam coeficientes de permeabilidade maiores de que 10^{-5} cm/s. (Mc Call e McAnear, 1971).

b) Casagrande de Tubo Duplo - para sobrepujar as restrições da locação de piezômetros e a vulnerabilidade ao dano do tubo vertical durante a construção da obra, o piezômetro Casagrande pode ser modificado como mostrado na figura 3.2, para permitir eliminar o tubo vertical. As leituras são feitas introduzindo vagarosamente ar sob pressão pelo tubo interno até que a pressão se torne constante, indicando que está escapando ar na parte inferior deste tubo para o tubo externo. Neste momento a pressão de ar aplicada é assumida como sendo igual à pressão da água nos poros. Uma objeção a este sistema é que a água no tubo interno precisa ser forçada para dentro do tubo externo ou do solo envolvente à ponta do piezômetro, e uma pressão nos poros excessivamente alta será medida a menos que se espere tempo sufi-

ciente para que haja nova equalização das pressões. (Mc Call, e McAnear, 1971).

c) Geonor - o piezômetro Geonor, mostrado na figura 3.3, um instrumento para instalação por cravação. É usualmente operado como um piezômetro de sistema aberto, mas pode ser convertido em sistema fechado de tubo simples ou duplo pela conexão de uma célula manométrica aos tubos. Suas desvantagens são: (a) o solo é perturbado pela operação de cravação na vizinhança do ponto de instalação; (b) frequentemente não se consegue um selo efetivo entre a ponta porosa e as camadas de solo superiores; e (c) não pode ser colocado um filtro de areia em redor da ponta porosa, de modo que o tempo de resposta para este piezômetro, exceto em solos muito permeáveis, costuma ser muito maior do que o tempo de resposta para outros piezômetros de tipo aberto instalados em furos de sondagem.

d) Wellpoint - o piezômetro Wellpoint consiste de uma ponteira perfurada conectada à ponta de um tubo. A ponteira perfurada pode ser um tubo perfurado envolto em uma tela comum para poços de bombeamento, como mostrado na figura 3.4a, uma seção de tubo perfurado como mostrado na figura 3.4b, ou simplesmente um cano de PVC com recortes transversais executados com serra circular, furos ou outras perfurações que forme uma ponteira vazada e recoberto com tela ou geotextil.

O tubo vertical pode ser também de cano de PVC ou tubos flexíveis. O cano de PVC é menos suceptível a torcer-se, mais fácil de ser mantido na vertical e introduz mais facilmente a ponta porosa no furo, entretanto as conexões tem que ser feitas com

extremo cuidado visto que os vazamentos nas juntas não são detectados.

Quando não estão sendo feitas as leituras, a parte superior do tubo deve ser fechada para prevenir a entrada de materiais estranhos no piezômetro, evitando o perigo de entupimento, e a tampa deve ter um pequeno orifício para permitir a ventilação. O instrumento deve ser instalado em furo no solo até a profundidade desejada. Este piezômetro é provavelmente o mais barato podendo ser utilizado para medir a variação da pressão neutra em solos com permeabilidade menor do que 10^{-4} cm/s desde que o fenômeno a ser observado seja lento.

3.2.2 Piezômetros Hidráulicos de Sistema Fechado

a) U S Bureau of Reclamation - dois tipos de piezômetros hidráulicos de sistema fechado foram desenvolvidos pelo USBR (Earth Manual, 1968), sendo um para ser utilizado em fundações e outro em aterros, figuras 3.5a e 3.5b respectivamente. O tipo de fundação tem um disco de cerâmica filtrante montado no fundo de um corpo plástico e dois tubos entrando através do topo enquanto o tipo para aterro tem dois discos de cerâmica filtrante montadas no topo e na base do corpo de plástico com dois tubos entrando em lados opostos.

b) Bishop (Imperial College) - o piezômetro de Bishop, mostrado na figura 3.6, é do tipo hidráulico de dois tubos com filtro cerâmico biselado, que pode ser utilizado tanto em fundações quanto em aterros. Quando utilizado em aterros, a ponta é colocada em um buraco raso, escavado de forma a deixar justo o fil-

tro biselado, obtendo-se assim um melhor contacto entre este e o solo.

3.2.3 Piezômetros de Diafragma

a) Warlam - este piezômetro é de diafragma operado hidráulicamente conforme mostrado na figura 3.7. As medidas de pressão neutras são obtidas pela introdução do ar sob pressão através da linha de admissão até que a pressão neutra atuante no lado oposto do diafragma seja levemente excedida, o que é indicado pelo escapamento do ar através da linha de retorno. A pressão do ar é então diminuída até que o fluxo de ar cesse, quando então se assume que a pressão de ar na linha de admissão seja igual à pressão neutra no solo. (Warlam, e Thomas, - 1975).

b) Hall - este piezômetro, mostrado na figura 3.8, consiste de um filtro cerâmico encaixado em um corpo de aço inoxidável, uma membrana e um pistão também de aço apoiado na membrana. O pistão tem duas passagens para o gás e, encaixado em um tubo protetor, conecta a célula à estação de leituras. Os anéis de borracha de vedação, montados no lado do pistão, evitam a infiltração de água para a parte superior da célula. Para a operação do sistema, nitrogênio seco é introduzido sob pressão pelo tubo de admissão até defletir suficientemente o diafragma de modo a permitir a passagem do gás para o tubo de retorno por trás do diafragma de aço. A menor pressão necessária para manter o fluxo constante, como indicado em um medidor de fluxo, é admitida como sendo igual à pressão neutra do solo.

c) Dames e Moore - este piezômetro é operado pneumá-

ticamente. Como mostrado na figura 3.9, um dos tubos é conectado a um medidor de pressão e o outro a uma fonte de ar comprimido. Para medir a pressão neutra o ar é introduzido na câmara até que o diafragma seja defletido o suficiente para permitir que o ar passe através da válvula de escape e retorne pelo tubo de proteção. Assim que o ar escapa, a pressão indicada no manômetro se torna constante e é admitida como sendo igual à pressão neutra no solo. Uma mola incorporada no topo do aparelho permite a medida de pressões neutras negativas por meio da calibração do esforço da mola.

d) Thorpiezo - é um piezômetro pneumático de diafragma, conforme mostrado na figura 3.10. O corpo do aparelho é construído de polietileno, envolto de PVC e preenchido com epóxi. As molas são feitas de bronze com silicone e recorbertas com teflon. Um anel de vedação de neoprene é utilizado como um último selo (Grittin, 1967). Nenhum metal, de qualquer tipo, é exposto ao solo tanto no instrumento quanto em qualquer ligação externa. As conexões entre o instrumento e a estação de leitura são de tubos de nylon recorbertos com PVC:

Este piezômetro mede a pressão necessária para fechar um sistema de balanço hidro-pneumático dentro da unidade. A pressão de ar vinda de unidade de controle é aplicada através das linhas de admissão que constituem o sistema de balanço durante o aumento da pressão. Quando a pressão de admissão se iguala à pressão neutra do solo o anel de vedação se fecha e a pressão é então medida em uma linha de admissão na unidade de controle. Quando o anel de vedação de controle é fechado, a pressão de aplicação pode continuar aumentando sem afetar a pressão que está sendo lida.

Para fechar o anel de vedação de controle, um pequeno movimento de gás ou de líquido tem de ocorrer, o que é compensado pela linha de 1/6" normalmente ligada na atmosfera. Entretanto mesmo que esta linha esteja fechada, o movimento é tão pequeno que não causaria tempo de resposta apreciável no desenvolvimento das leituras.

e) Glöttzl - este piezômetro, mostrado na figura 3.11, opera pelo princípio hidráulico da válvula de alívio. A pressão necessária para promover a passagem de um pouco de fluido pelo diafragma e retornar à estação de leitura através da linha de retorno é considerada como sendo igual à pressão neutra atuante no solo (Franz Glöttzl - Catálogo de Produtos). O equipamento de leitura consiste de um pequeno reservatório de óleo, uma bomba de volume constante e um manômetro.

f) Terrametrics - este piezômetro, mostrado na figura 3.12, também opera pelo princípio da válvula de alívio, com a vantagem de se ter uma pressão neutra inicial para poder eliminar a carga hidráulica de instalação, ou poder ler pressões neutras negativas. Tubos de leitura com desnível de até 150m podem ser compensados com o ajuste apropriado do esforço da mola no momento da montagem para a pressão neutra inicial (Terrametrics, Inc. - Catálogo de Produtos). A pressão necessária no tubo de admissão para causar a passagem de um pouco de fluido pela válvula do diafragma e retornar à estação de controle através da linha de retorno é considerada como sendo igual à pressão neutra atuante no solo. O equipamento de leitura consiste de um pequeno reservatório de óleo, uma bomba de volume constante e um manômetro. A célula é de aço inox, o diafragma de borracha e os tubos de nylon

ou aço comum.

g) Slope Indicator - neste piezômetro, mostrado na figura 3.13, a pressão neutra atua sobre um diafragma flexível que se movimenta apoiado em uma mola de força insignificante. Pequenos movimentos do diafragma devidos à pressão da água, causam a abertura de uma válvula de bola sensível. A pressão do ar é aplicada pela linha de admissão provocando o fluxo através da válvula, da câmara do diafragma e da linha de retorno que são conectados a um manômetro adequado. O fluxo através da válvula aumenta a pressão das duas linhas até que ela se iguale à pressão neutra do solo quando o diafragma se movimenta permitindo que a válvula de bola se feche. Neste momento a pressão na linha de saída será igual à pressão neutra do solo. A pressão pode ser aumentada na linha de admissão, mas não havendo fluxo não haverá mudança na pressão da linha de retorno, não alterando o valor indicado no manômetro (Slope Indicator - Catálogo de Produtos).

h) P A C - este piezômetro foi desenvolvido pelo Laboratoire des Ponts et Chaussées, tem a forma cilíndrica sendo constituído de uma parte superior padronizada (detector), sob a qual se montam um de três tipos de elementos filtrantes, de acordo com o modo e as condições de instalação do aparelho.

Os elementos filtrantes estão mostrados na figura 3.14, sendo o tipo F concebido para ser instalado em solos finos e compressíveis por cravação estática ou dinâmica. O elemento filtrante pode ser de cerâmica ou de bronze sinterizado possuindo uma ponteira cônica de 90º; o tipo C foi concebido para ser instalado no fundo de uma cavidade e é munido de uma pastilha fil

trante no fundo; e o tipo de reservatório de saturação foi concebido para ser colocado em solos onde há riscos de não haver saturação, sendo constituído de um reservatório munido de um filtro poroso anelar em sua parte superior. A instalação deste tipo de piezômetro é uma operação delicada e condiciona enormemente a validade das leituras.

A avaliação da pressão neutra do solo é feita pela introdução de gás sob pressão através da linha de admissão até que a pressão atuante do outro lado do diafragma seja levemente excedida, quando ocorrerá escapamento de gás pela linha de retorno. No aparelho de leitura há um medidor de vazão constante que constitui-se de uma bilha calibrada em um tubo de pequeno diâmetro, e é admitida como a pressão atuante no solo aquela que proporcione uma vazão no medidor que equilibre a bilha a meia escala (Peignand et al, 1977).

i) Carlson - este piezômetro está mostrado na figura 3.15. A deflexão do diafragma ocasiona um aumento ou decréscimo na tensão de um fio elástico com um lado solidário ao diafragma e o outro ao corpo da célula. A intensidade da tensão no fio no momento da observação é medida como uma mudança na razão da resistência de duas bobinas determinadas por calibração antes da instalação. As mudanças de temperatura na célula são compensados medindo as resistências das duas bobinas e usando uma constante da célula determinada durante a calibração. O espaço entre a pedra porosa e a membrana é preenchido com água antes da instalação para diminuir o tempo de resposta (Kyowa Electronic Instruments Co - Catálogo de Produtos).

j) WES - este piezômetro, mostrado na figura 3.16, mede a pressão neutra através de um transdutor de pressão montado em uma célula de bronze. O diafragma, que é parte da unidade do transdutor, é protegido por uma pedra porosa filtrante. O piezômetro é calibrado antes da instalação para determinar a constante da célula, sendo muito sensível às mudanças de pressão neutra e permitindo também a leitura de pressões neutras negativas.

l) Maihak - o piezômetro Maihak está mostrado na figura 3.17. O lado exposto do diafragma é protegido por uma pedra porosa filtrante de alta pressão de borbulhamento, que permite o acesso da pressão neutra ao diafragma. Assim que ele é tensionado a tensão da corda vibrante é reduzida. Para medir a pressão neutra a corda é vibrada por um impulso elétrico no eletroímã. A frequência de vibração da corda, que é função da tensão da mesma é medida em frequencímetro eletrônico e convertida em medida de pressão neutra por meio de uma curva de calibração do instrumento (Scott e Kilgour, 1967).

m) Telemac - este piezômetro, mostrado na figura 3.18, também mede a frequência de vibração de uma corda vibrante. Ele difere do anterior em dois aspectos principais: (a) a corda tensionada é ancorada dentro de um tubo sensor de aço em contacto com o diafragma, e (b) a medida é feita audivelmente no aparelho de captação onde o sinal é comparado com o som de uma fonte calibrada.

n) Geonor - este piezômetro de corda vibrante, mostrado na figura 3.19, foi desenvolvido pelo NGI e a frequência de vibração da corda vibrante é medida por um frequencímetro comum

que é empregado com um atenuador especial fornecido pelo fabricante (Norwegian Geotechnical Institute - Catálogo de Produtos).

3.3 Piezômetro Fabricado na COPPE

3.3.1 Descrição do Piezômetro

O piezômetro fabricado na COPPE para utilização no acompanhamento das obras do Metro do Rio de Janeiro, é similar ao tipo desenvolvido pelo Laboratoire des Ponts et Chaussées, sob a denominação P A C, apresentado no sub-ítem 3.2.h.

Na COPPE foram construídos somente piezômetros do tipo P A C II F, isto é, de instalação por cravação, cujos elementos constitutivos podem ser analisados de forma mais clara pela figura 3.20 que apresenta uma vista desmontada do aparelho.

3.3.2 Materiais Utilizados e Construção

A parte superior, ou detector, é composta de quatro elementos, conforme mostra a figura 3.20. Os elementos 1 e 4 são construídos em latão ou bronze torneado e servem para ajustar a membrana de aço inoxidável 2 que veda os furos de admissão e retorno. O anel de vedação de borracha 3 impede o escape do ar pela junta quando o conjunto é apertado pelos parafusos superiores de fixação 5. Os furos de admissão e retorno têm acesso pela parte superior através de duas conexões 6 para tubos plásticos 8 sendo que a de admissão possui um elemento filtrante de cerâmica ou de bronze sinterizado.

A parte inferior se compõe de um corpo cilíndrico com uma ponta cônica de 90º usinada em uma só peça de metal 9. Um furo diametral no corpo cilíndrico permite o acesso da água, através de um furo no eixo, à membrana de aço. O ressalto superior penetra no detector servindo como batente para a membrana de aço no caso de pressão de admissão excessiva.

Envolvente ao corpo cilíndrico da peça inferior temos o elemento filtrante 10 que pode ser cerâmico ou de bronze sinterizado e que é fixado, juntamente com os anéis de borracha 11, pelos parafusos inferiores 12.

3.3.3 Calibração dos Piezômetros

A calibração dos piezômetros é realizado através da simulação das condições de utilização, isto é, através da aplicação de pressão externa conhecida e da medida desta pressão com o equipamento de leitura. Para a COPPE isto foi possível com o emprego de um vaso de pressão construído para este fim, onde dois piezômetros podem ser calibrados de cada vez, e a pressão aplicada por uma coluna de mercúrio do equipamento triaxial controlada por transdutor de pressão neutra. O procedimento da calibração é a seguir descrito:

- a) colocam-se dentro do vaso de pressão os piezômetros a serem calibrados, passando os tubos por orifícios na tampa superior, onde são apertados por anéis de vedação de borracha comprimidos por parafusos vazados;

- b) enche-se o vaso de pressão com água, de preferência desaerada, tentando não deixar ar;
- c) untam-se com graxa de vedação as bordas do vaso, fechando a tampa e apertando-a com parafusos;
- d) colocam-se os tubos de pressão do sistema nos engates rápidos, e aplica-se a pressão. Sendo nota da a presença de ar este deverá ser retirado, quer por um dos engates rápidos, quer reabrindo novamente a célula de pressão; e
- d) estando o sistema corretamente montado, são realizadas as leituras com o aumento da pressão através da elevação do pote de mercúrio, lida no manômetro ou transdutor de pressão neutra do sistema triaxial, e comparando-a com aquela fornecida pelo aparelho de leitura do sinal do piezômetro.

Devem ser feitos sempre dois ou três ciclos de leitura, se bem que estes devem sempre coincidir nos valores devido à boa repetibilidade das leituras fornecidas pelo piezômetro. Os maiores erros são sempre devidos ao operador e à sua habilidade em aplicar a pressão no piezômetro do aparelho de leitura. É necessário que se aplique a pressão gradualmente, e tendo sempre conhecimento prévio aproximado da pressão neutra exercida no piezômetro pelo fluido do solo circundante, para que não seja causado dano à membrana de aço, a qual, pode-se deformar excessivamente e até romper no caso da pressão aplicada internamente ser muito maior do que a pressão neutra externa.

3.3.4 Resumo das Propriedades

Os piezômetros de contra pressão utilizados já estavam prontos, constituindo sobra dos que foram instalados no Metrô em Botafogo. Foram montados os que o número de peças permitiu já que muitos parafusos estavam danificados ou faltavam peças, sendo o elemento menos disponível as membranas de aço inoxidável, somente quatro. Os tubos empregados foram os de nylon, impermeáveis à água, e de cores distintas para identificar a admissão e o retorno do gás injetado no piezômetro.

O piezômetro é bastante sensível às variações de pressão externa, e devido ao pequeno movimento necessário a membrana para a passagem do gás, o seu tempo de resposta é bem pequeno, variando um pouco somente devido ao tipo da pedra porosa utilizada, que pode ser de alta ou de baixa pressão de borbulhamento, no caso do solo se apresentar não saturado.

Em ambiente controlado, durante a calibração, os erros máximos obtidos entre as leituras efetuadas no piezômetro e as aplicadas pela coluna de mercúrio e controladas por transdutor de pressão neutra, foram da ordem de 8%. A repetibilidade das leituras pode ser considerada muito boa, com desvios da ordem de 1% em ciclos sucessivos de carga e descarga, o que pode também ser atribuído ao sistema de leitura e à destreza do operador que precisa controlar a bilha de medidor de vazão constante.

Devido aos materiais utilizados na construção, a robustez do aparelho é muito boa, somente apresentando como pontos frágeis a pedra porosa circundante, sensível a quedas e apertos

muito vigorosos dos parafusos de fixação, e as conexões dos tubos, não pelas uniões mas pelos tubos empregados que são muito frágeis, sensíveis a torções fortes, cortes e estiramentos se não forem manuseados com o devido cuidado. A necessidade dos tubos de nylon impermeáveis à água se prende a que a presença de água no sistema, principalmente na célula piezométrica ou na unidade de leitura, altera sensivelmente os valores lidos da pressão atuante.

O projeto apresenta condições muito boas de utilização devido às suas boas qualidades e baixo custo comparado com outros tipos de piezômetros, sendo que a sua robustez permite a reutilização se recuperado por escavação, já que a maior parte de seus componentes é bem resistente aos choques e esforços elevados.

Seu emprego no campo é bastante facilitado devido às suas pequenas dimensões e seu alto peso, fatores que permite uma fácil penetração em furos de 2 1/2" sem o perigo de desmoronamento das paredes do furo de sondagem. Entretanto no Metrô muitos piezômetros apresentarem problemas de leitura, principalmente após o início das escavações, tendo ocorrido corte nos tubos de vários aparelhos. Por este tipo de instalação previa-se a recuperação dos aparelhos após o final dos trabalhos, e um que foi retirado apresentou boas condições de reutilização.

Na calibração dos piezômetros, o recipiente de pressurização apresenta o problema de garantir a completa ausência de ar visto que na boca de saída do ar a porca de fixação da conexão obriga a formação de uma camada de ar dificultando a equali-

zação das pressões. Para as próximas utilizações pode-se corrigir tal problema embutindo a porca em um rebaixo na tampa do vaso.

A calibração deve ser feita com cuidado e as leituras das pressões também, para evitar que se aplique uma pressão internamente ao piezômetro muito maior do que a pressão neutra externa, o que ocasionaria uma deflexão demasiada da membrana de aço inoxidável causando deformação permanente. Isto ocorreu com o piezômetro nº 3 provocando alteração das leituras e consequentemente mudando a inclinação da curva de calibração. O piezômetro já vem provido de um batente para evitar este problema, entretanto, nas próximas unidades, este batente deverá ser executado mais próximo da membrana para que não haja deformações excessivas que possam danificá-la irremediavelmente ou rompê-la. Outra opção é substituí-la por um material mais elástico, por exemplo uma membrana de borracha, de modo a resistir melhor as deformações aplicadas por erro de operação de leitura, conforme já empregado pelo IPT.

Deve-se tomar cuidado com o manuseio da pedra porosa pois esta possui uma parede muito fina (aproximadamente 3mm), consequentemente com grande risco de quebra por descuido de queda ou mesmo por aperto demasiado dos parafusos de fixação do conjunto. Foram empregados no Metrô dois tipos de pedras porosas, uma de cor branca com alta pressão de borbulhamento, e outra de cor pedra, fabricada a partir de carbureto de silício, para alta permeabilidade em solos grossos. Infelizmente todas as pedras porosas de alta permeabilidade estavam quebradas e somente puderam

ser utilizadas as brancas, apesar do solo natural do local de instalação ser alteração de rocha, e material predominantemente arenoso, portanto de alta permeabilidade.

O aparelho de leitura funciona à base de um medidor de vazão constante implicando na existência de um fluxo de gás pelo piezômetro, aparelho de leitura e tubulações. A perda de carga do fluxo pelo sistema pode acarretar imprecisões nas leituras, pois as conexões são estrangulados e na própria bilha de calibração o ar tem que passar no espaço deixado entre o tubo e a bilha além de ter que forçá-la a subir. Uma opção para minorar este problema é acabar com a circulação de gás por meio de alteração do princípio de funcionamento da unidade de leitura, abandonando o medidor de volume constante e passando a utilizar o momento em que a pressão externa fecha a membrana, pois teremos um ponto estável de leitura com um aparelho menos sensível a choques e a problemas de operador como o utilizado atualmente. Os esquemas atual e proposto da unidade de leitura podem ser vistos na figura 3.22.

O aparelho de medição da pressão aplicada é de fabricação francesa, desenvolvido pelo Laboratoire des Ponts et Chaussées, com manômetros de leitura em Bar (equivalente a $1,01967 \text{ kg/cm}^2$) com duas escalas, uma até 2Bar, de maior precisão e outra até 10 Bar. Foram empregados nas conexões tubos de nylon, impermeáveis à água, para não ocorrerem entupimentos devido à presença de água. Para evitar problemas com detritos sólidos também foi prevista uma pedra porosa de bronze sinterizado na conexão de admissão do piezômetro.

3.4 Conclusões e Recomendações

3.4.1 Objetivo do Ítem

Os problemas que surgiram nas fases de montagem, manipulação, instalação e operação destes piezômetros vem sugerir que sejam estudadas alterações no sentido de eliminar ou minorar estes problemas melhorando suas características. Muitos destes problemas já foram comentados anteriormente no decorrer do texto e suas soluções já aventadas, portanto é objetivo deste sub-ítem fazer um resumo das considerações efetuadas sobre os aparelhos.

Este resumo será subdividido na parte referente às alterações no projeto do piezômetro propriamente dito e na parte referente à alteração do processo de leitura do sinal do piezômetro, isto é, da unidade de leitura, como descrito a seguir.

3.4.2 Alterações no Projeto do Piezômetro

Quanto às peças que compõem o piezômetro tem-se que ressaltar a fragilidade da pedra porosa, a dificuldade do manuseio da membrana de aço inoxidável e a qualidade dos parafusos de fixação. Quanto à pedra porosa pouco ou nada se pode fazer para evitar as quebras além do manuseio cuidadoso. Para aumentar a sua resistência poder-se-ia aumentar a sua espessura para 5mm, o que nada representaria em termos de custo já que o maior trabalho é o de torneá-la.

A membrana de aço inoxidável apresentou uma alta qualidade de resposta somente havendo problema devido a excessos de pressão, e antes de optar por sua substituição por membrana de

borracha dever-se-ã tentar uma melhoria de ajustes, como serãvisto posteriormente. O problema do manuseio poderã ser de menor monta do que a qualidade da resposta, e um montador consciencioso não terã dificuldade de empregã-la. A fabricação de sua estampa também apresenta dificuldade já que o aço empregado é bem resistente, mas para fabricação contĩnua uma pequena prensa resolverã este problema.

Os parafusos de fixação foram os que apresentaram maior problema devido ã baixa qualidade do aço empregado ou o não esmero em executar rebaixos sextavados com precisão. A utilização das cabeças sextavadas apresenta um bom caminho para a segurança das operações de montagem, e deve ser continuada, mas com parafusos de melhor qualidade. Também os parafusos podem ser de diãmetro maior, já que isto pouco estrangula as peças vazadas para seu trespasse e, mesmo que isto acontecesse estas peças recebem poucos esforços.

Quanto ã montagem do conjunto, as peças sempre apresentaram um bom encaixe entre si. Como os seus parafusos se fixam no anel que retém a membrana e passam pelo topo e pela base, a condição mais importante de construção é o perfeito alinhamento dos furos. Caso isto não ocorra, cada piezômetro deverá ter as três peças de bronze marcadas eliminando a possibilidade de substituição.

Quanto ã manipulação, o peso da unidade, aproximadamente 500gr, representa uma certa dificuldade, sujeitando a unidade a choques e quedas que podem facilmente por em risco a pedra porosa. Entretanto a facilidade de instalação proporcionada pelo peso mais alto justifica facilmente o maior cuidado necessã-

rio na manipulação.

Quanto à desaeração da pedra porosa, operação que é feita normalmente com a fervura da mesma, várias tentativas foram feitas para conseguí-la já com o conjunto todo montado, tendo ocorrido desde o corte dos tubos de nylon por encostar na chapa elétrica até a condensação de vapor de água no interior dos tubos de nylon. Estudou-se uma opção de fazer uma primeira conexão com tubos de metal de comprimento aproximado de 20cm, ou um adendo em metal ou mesmo PVC, que se encaixaria no ressalto para a haste de penetração, vedando a água quente que chegasse aos tubos. Entretanto isto ainda não evitaria a condensação dentro dos tubos, e como o ar tem acesso ao interior da célula há também a condensação dentro desta, fenômeno muito mais difícil de se diagnosticar com ela montada e de difícil correção. Além disto, como normalmente se trabalha com tubos longos e duplos, acoplados ao piezômetro, há um grande incômodo e risco de danos à tubulação. A solução encontrada foi desaerar a pedra porosa fora do conjunto e depois montá-la, debaixo de água, ao conjunto superior já previamente montado e com os tubos de nylon. Esta solução torna a operação mais complicada, mas além de ter sido a única imaginada conduz à certeza de que toda a câmara do piezômetro estará saturada e a parte onde a água não deve penetrar está seca.

Quanto ao funcionamento do piezômetro, o problema relevante foi realmente o da membrana de aço que se deformou demais em uma calibração e rompeu em um dos piezômetros já após a instalação. Isto se deveu, em princípio, à folga entre a membra

na e o seu batente, o que pode ser minorado por um ajuste melhor das peças com um melhor controle da qualidade dos seus componentes, já que esta folga é governada pela altura da pedra porosa e dos anéis de vedação de borracha. Um acabamento melhor das bordas das peças que entram em contacto com a membrana fazendo um arredondamento dos cantos, irá evitar deformações cisalhantes na membrana e um rebaixo cônico no batente com as bordas tocando ou bem próximos da membrana irá resolver este problema.

3.4.3 Alterações no Processo de Leitura do Sinal

Quanto aos terminais dos tubos de nylon, como se faz acoplamento e desacoplamento da unidade de leitura, estes são do tipo de engate rápido. Os utilizados se mostraram pouco práticos, sujeitos à ferrugem e principalmente atacados pelo gás utilizado para a operação, que foi o nitrogênio. A ferrugem dos engates provocou encrustações e quebra das molas retentoras dificultando a entrada e saída dos machos e a perfeita conexão, necessária para não haver vazamento de gás. A criação de caixas padronizadas e composições fixas para os terminais também devem ser empregadas para facilitar a operação de leitura e identificação do piezômetro que está sendo lido bem como para organização, limpeza e proteção dos terminais.

Quanto ao aparelho de leitura empregado, uma forma de funcionamento (avaliação da vazão constante que passa dentro do piezômetro) é muito influenciada pelo operador, e a mudança do mesmo em um ciclo de leituras inevitavelmente conduzirá a diferentes interpretações do fenômeno lido. Além disto o medidor de volume constante é uma peça de vidro, sujeita a riscos, e no nos

so caso já havia sido quebrada, e como não se pôde adquirir ou tra no exterior, foi construída uma e a bilha calibrada substituída por uma esfera de chumbo, de tal forma que, perdendo a calibragem já não era possível estacionar a bilha no meio da escala.

Como já foi dito anteriormente, esta forma de funcionamento pode ser alterada para medir não a pressão de abertura da membrana a volume constante de vazão, mas sim a pressão de fechamento, que é exatamente a pressão neutra do solo, como é o sistema empregado pelo IPT. Neste sistema a pressão de fechamento se mantém no tubo de admissão ou de retorno fornecendo uma leitura estática após o fechamento da membrana. As operações para a leitura são as descritas a seguir e apresentadas na figura 3.22:

a) com as válvulas de admissão e retorno fechadas, abre-se a de admissão que enche de gás sob pressão o tubo de admissão até que a pressão na câmara do piezômetro se equivalha à pressão neutra do solo. Neste momento a membrana do diafragma se deflete permitindo que o gás penetre no tubo de retorno, que é acusado na leitura.

b) fechando-se a válvula de admissão e abrindo a válvula equalizadora, o ar começa a escapar pelo tubo de admissão até que a pressão de gás se iguale à pressão neutra do solo, quando a membrana do diafragma se fechará interrompendo a passagem do gás, e ficando estável a pressão no tubo de retorno quando se faz a leitura.

c) abrindo a válvula de retorno retira-se o resto do gás do sistema, e fechando novamente esta válvula e a de escapamento tem-se o aparelho de leitura pronto para efetuar novo teste.

As alterações necessárias para que isto seja possível não são difíceis de serem executadas no equipamento existente, bastando a troca de algumas conexões internas do aparelho e a inclusão de um registro para a válvula de escape.

A utilização deste sistema pode ser particularmente interessante visto eliminar, em grande parte, a influência do operador e além disto reduz drasticamente o consumo de gás, pois somente se emprega o necessário para pressurizar o sistema e não para ficar controlando a evolução da bilha a volume constante. Isto também é relevante pois o aparelho ora empregado é dito portátil, e para isto carrega uma ampola de gás de pequenas dimensões, que para muitas leituras se descarrega rapidamente, obrigando a ser transportada para a estação de carregamento. Na prática sempre se empregou uma ampola de grande dimensão acabando com a portabilidade do sistema.

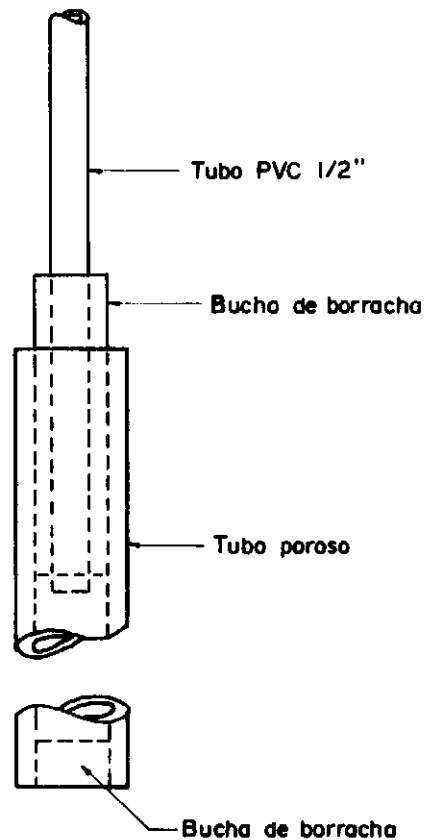


FIG. 3.1 — Tubo poroso de Casagrande.

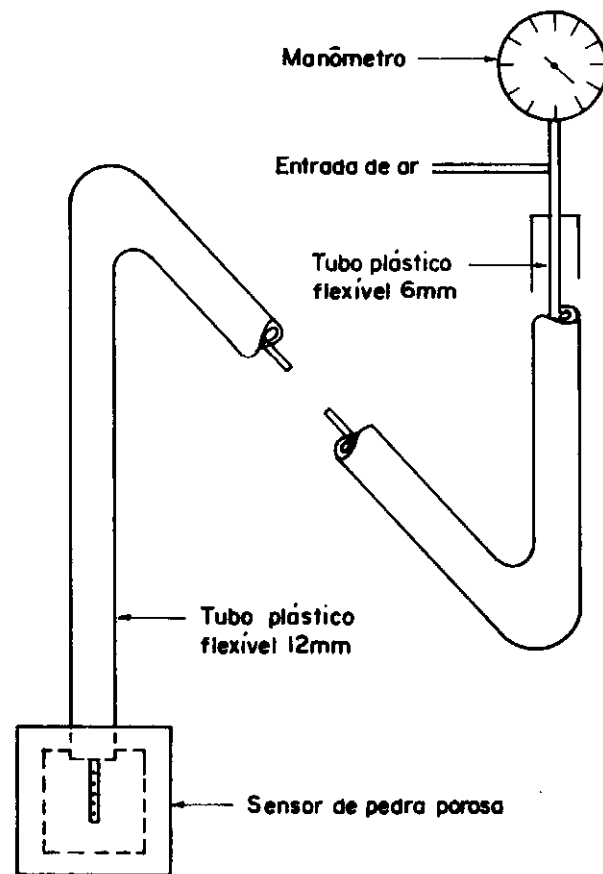


FIG. 3.2 — Tubo duplo flexível de Casagrande.

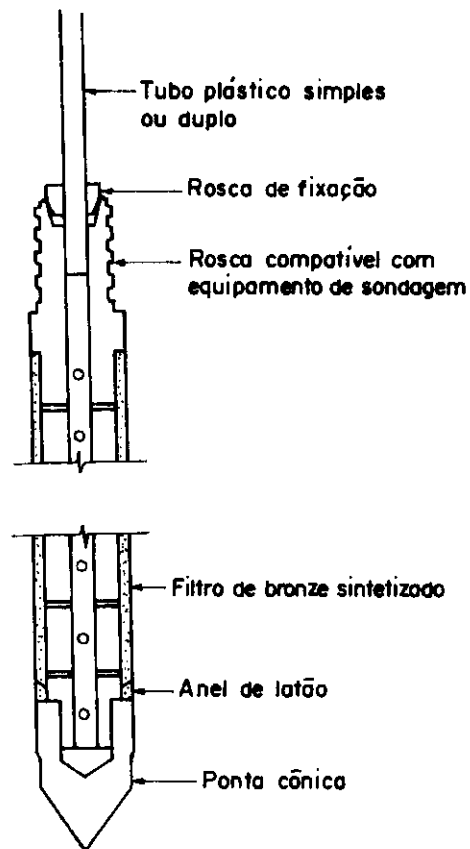
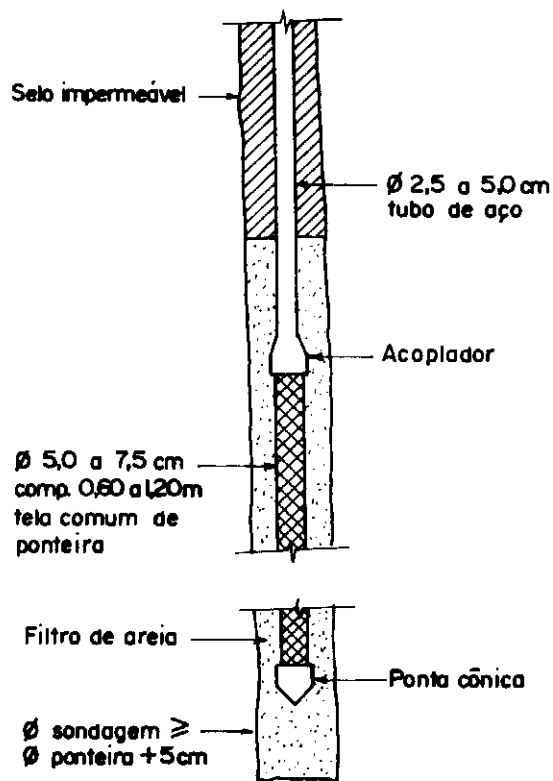
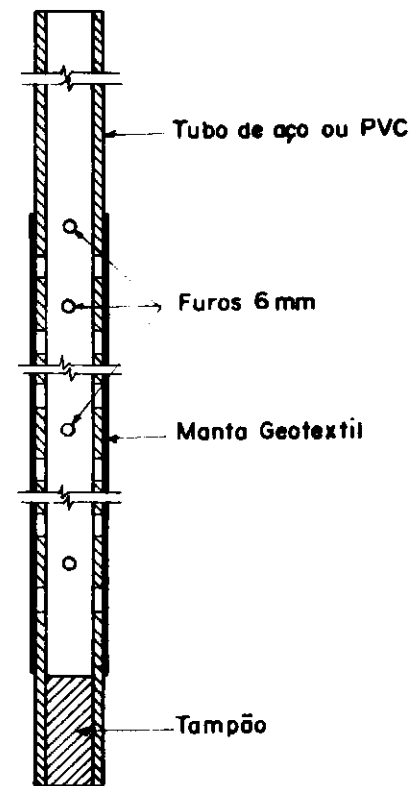


FIG. 3.3 — Piezômetro Geonor .

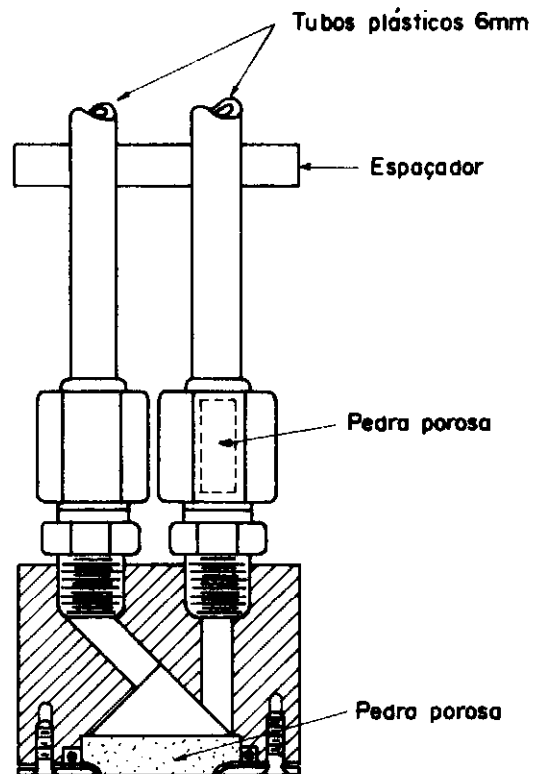


a) SISTEMA COM TELA DE AÇO

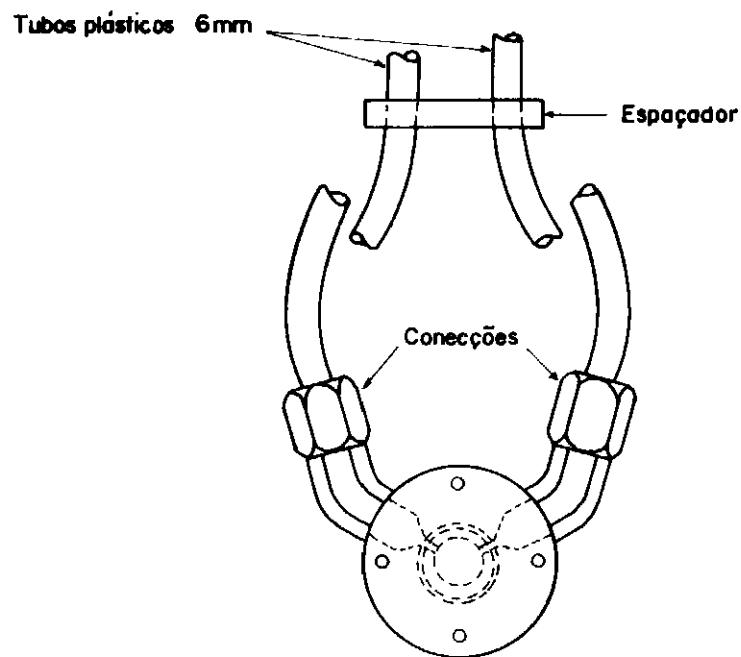


b) SISTEMA COM GEOTEXTIL

FIG.3.4 — Ponteiros filtrantes .



a) PARA INSTALAÇÃO EM CAVIDADE



b) PARA INSTALAÇÃO EM CORPO DE ATERRO

FIG.3.5 — Células piezométricas desenvolvidas pelo USBR.

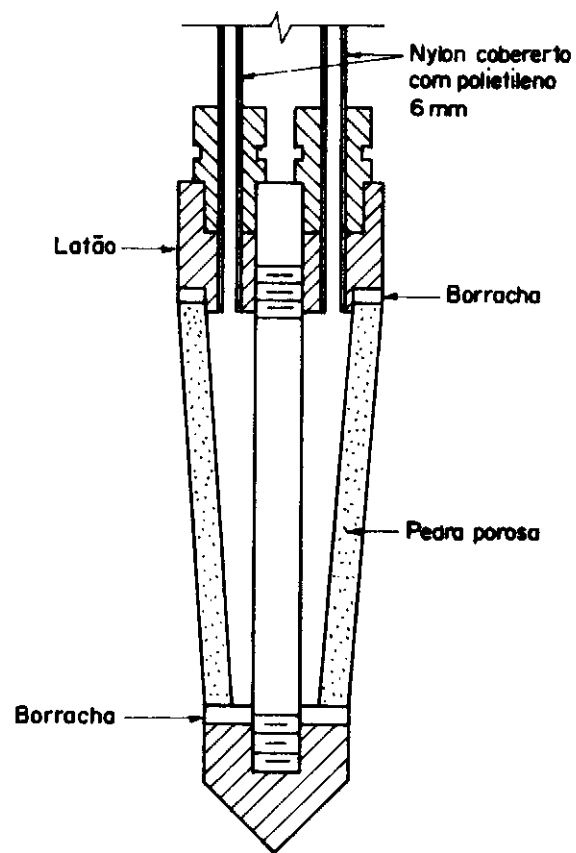


FIG. 3.6 — Piezometro hidráulico de Bishop.

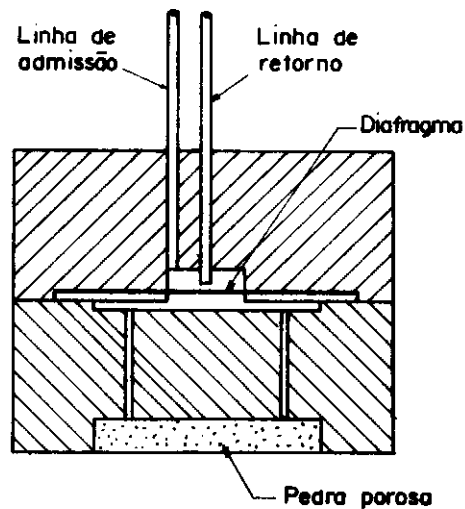


FIG. 3.7 — Piezômetro Warlan.

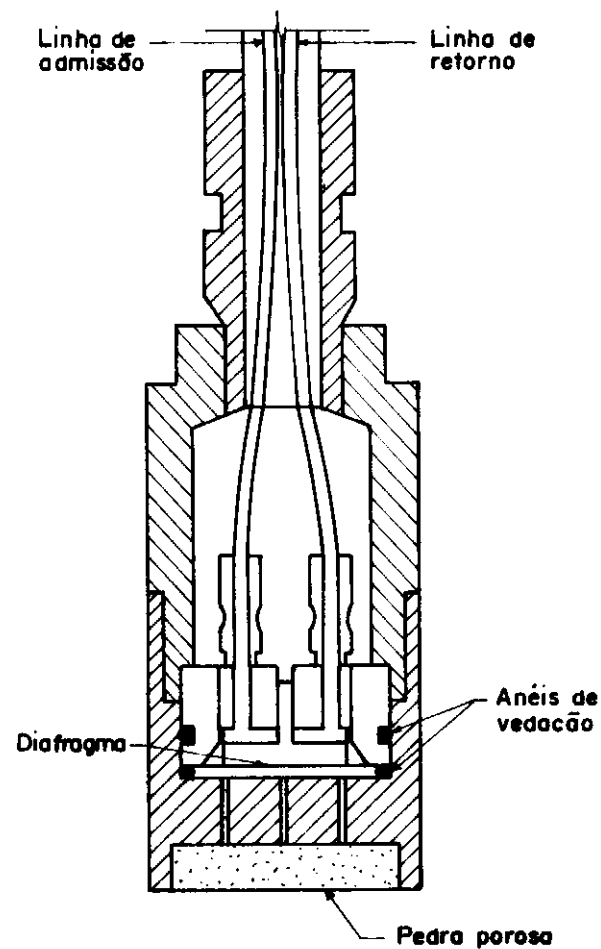


FIG. 3.8 — Piezômetro Hall.

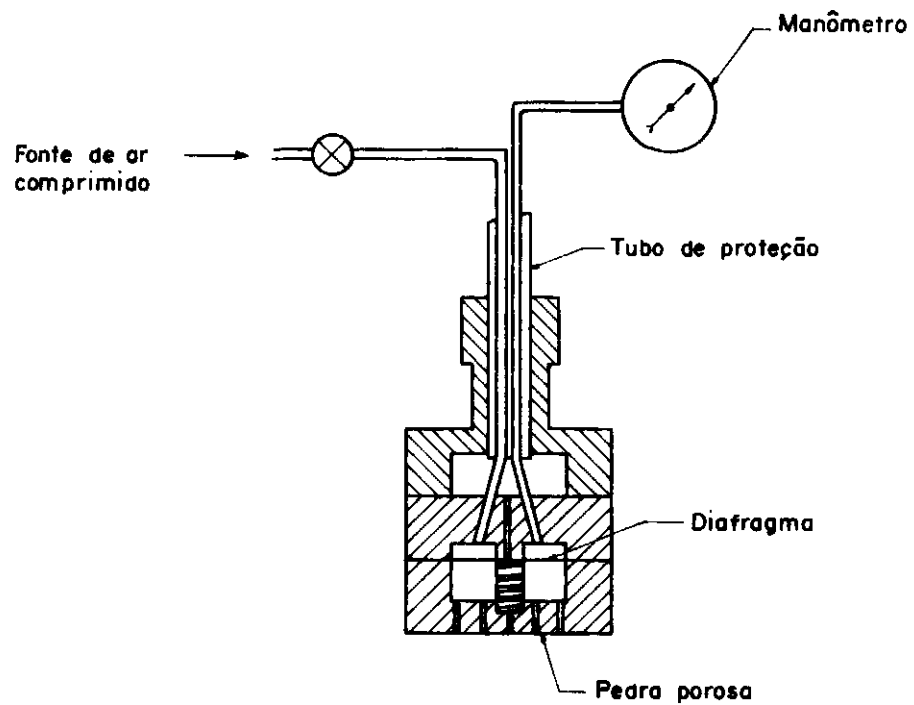


FIG. 3.9 — Piezômetro Dames e Moore .

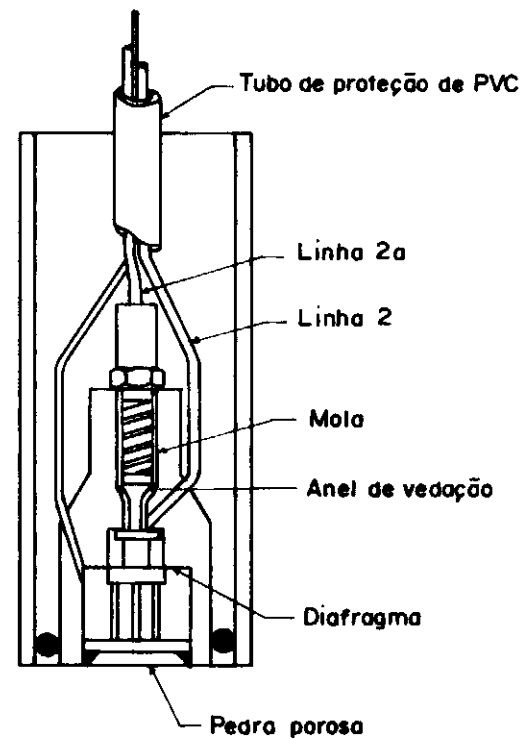


FIG. 3.10 — Piezômetro Thorpiezo .

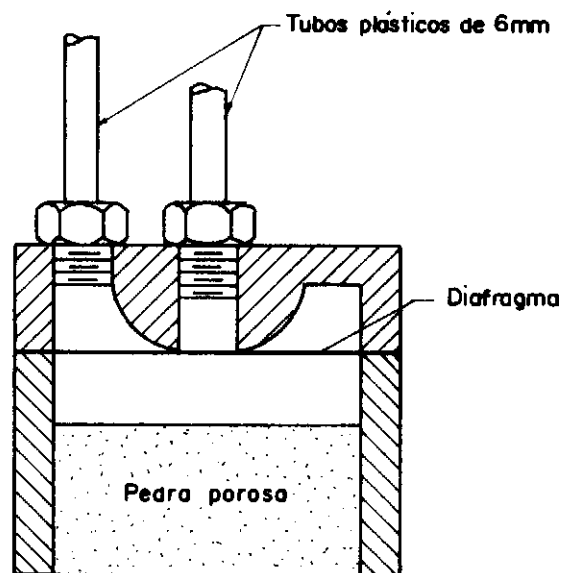


FIG. 3.11 — Piezômetro Glötzl.

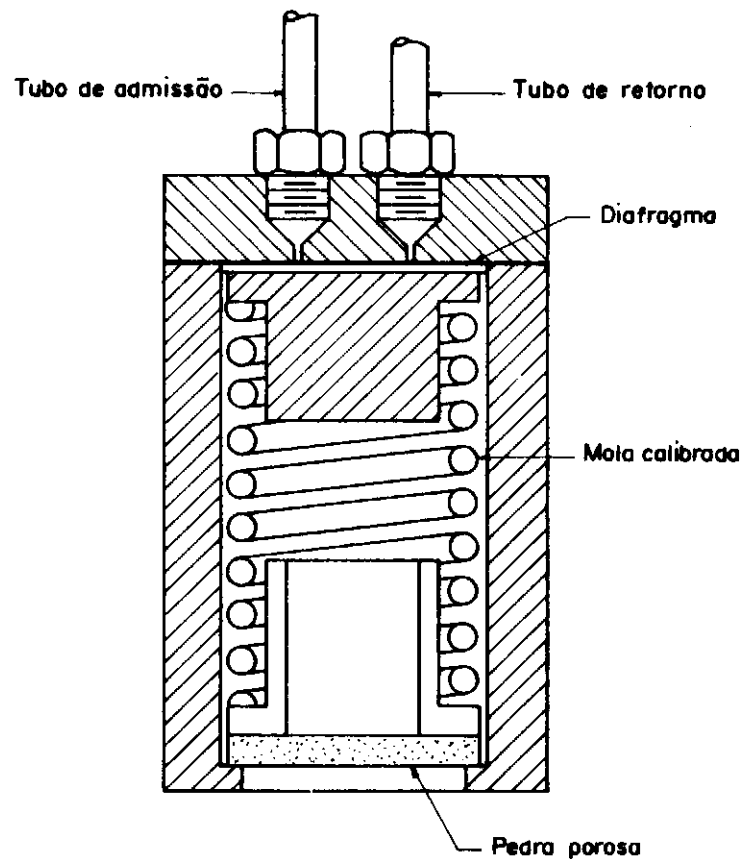


FIG. 3.12 — Piezômetro Terrametrics.

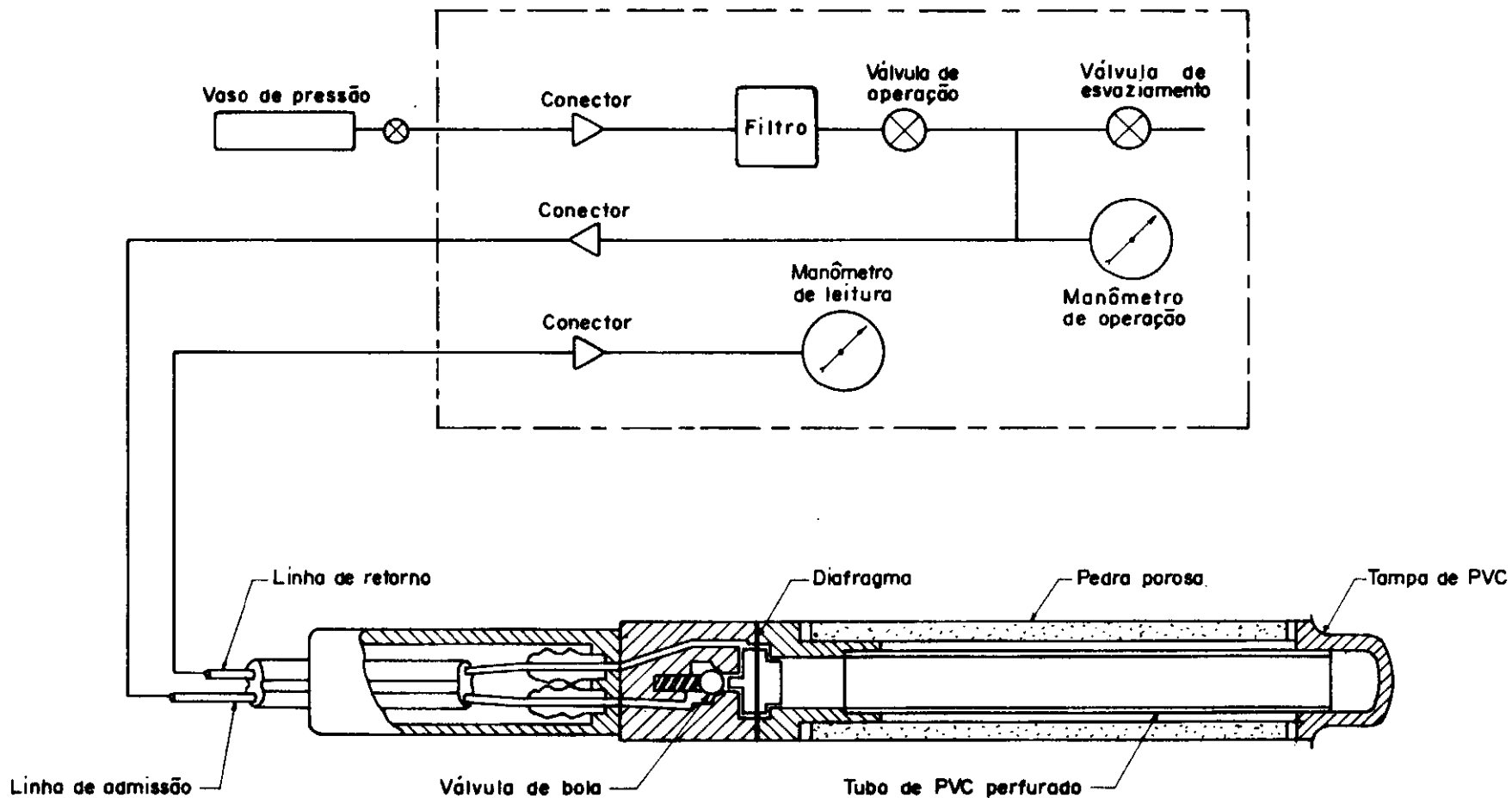
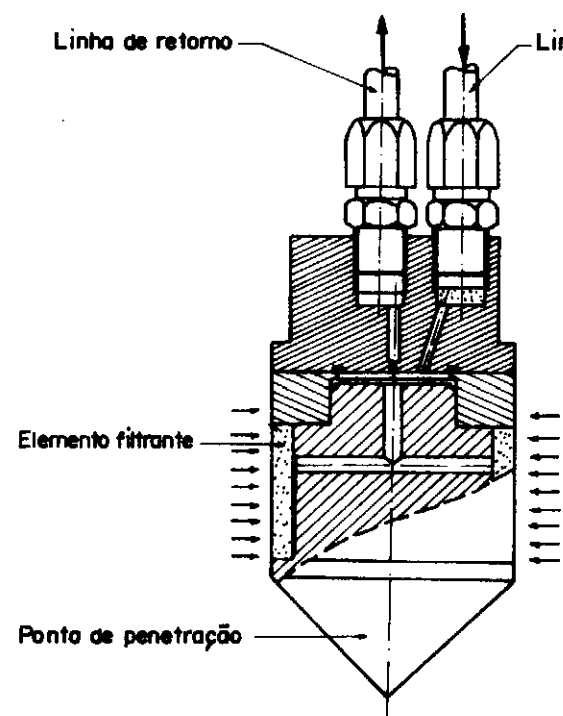
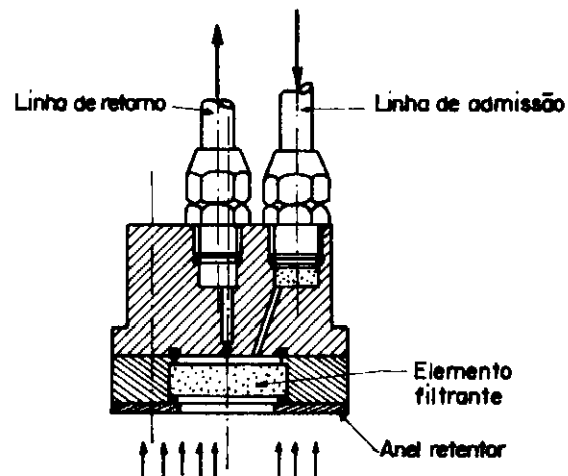


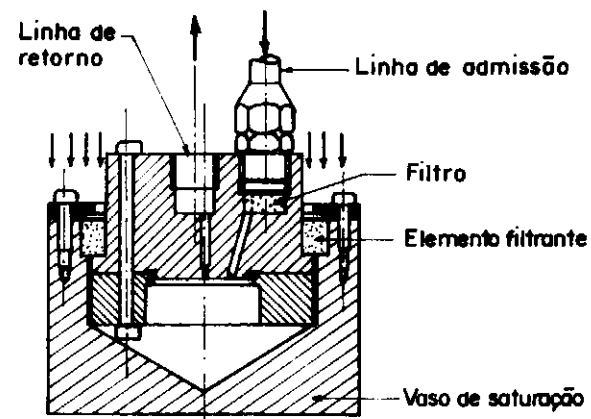
FIG. 3.13 — Piezômetro Slope Indicator .



a) TIPO F PARA INSTALAÇÃO POR CRAVAÇÃO



b) TIPO C PARA INSTALAÇÃO EM CAVIDADE



c) TIPO R PARA SOLOS NÃO SATURADOS

FIG. 3.14 — Piezômetro PAC do Laboratoire des Ponts et Chaussées.

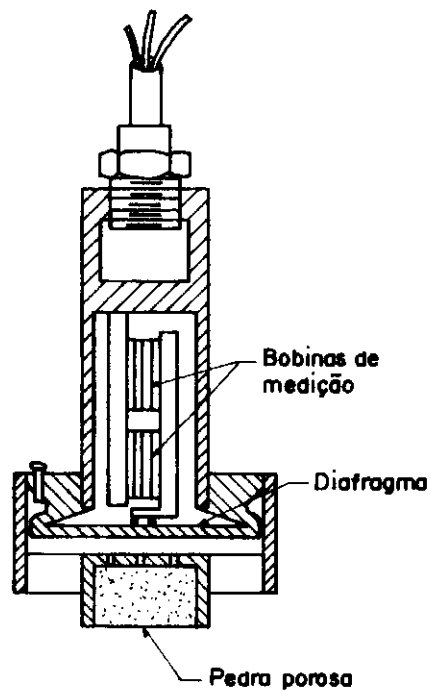


FIG. 3.15 – Piezômetro Carlson.

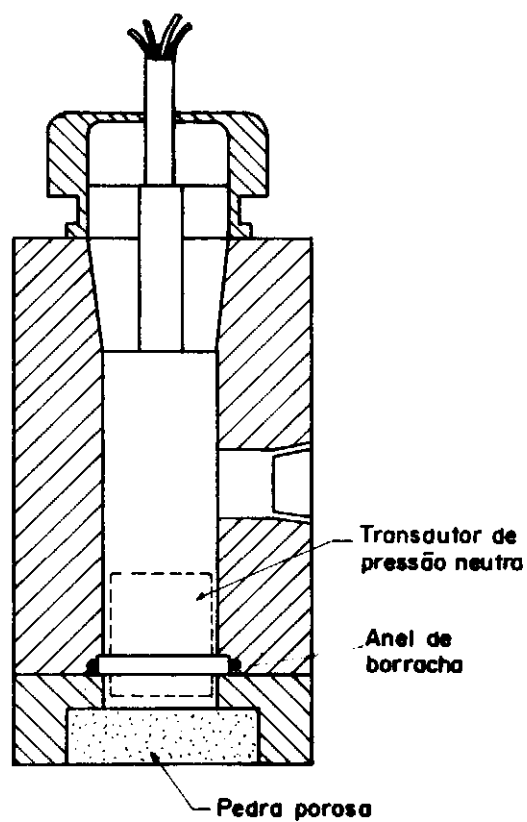


FIG. 3.16 – Piezômetro WES.

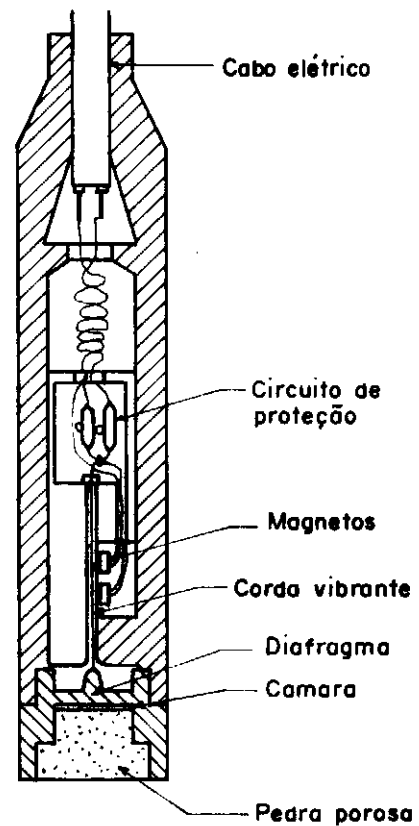


FIG. 3.17 – Piezômetro Maihak.

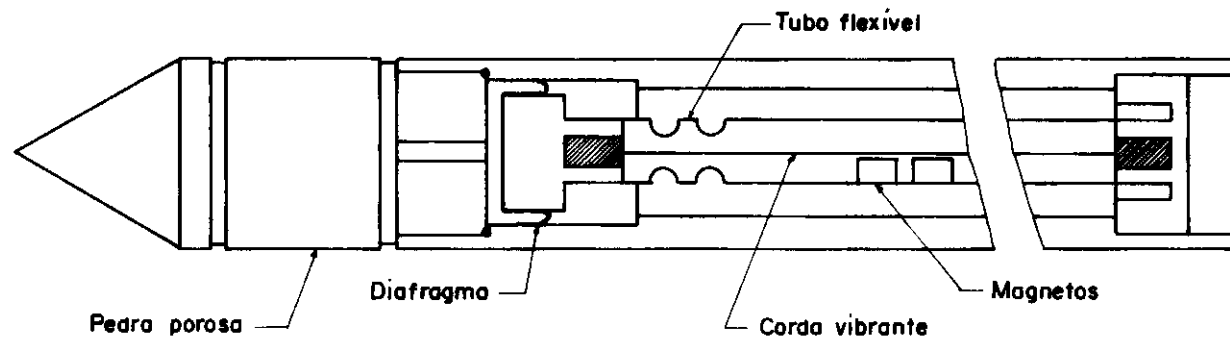


FIG. 3.18 — Piezômetro Telemac .

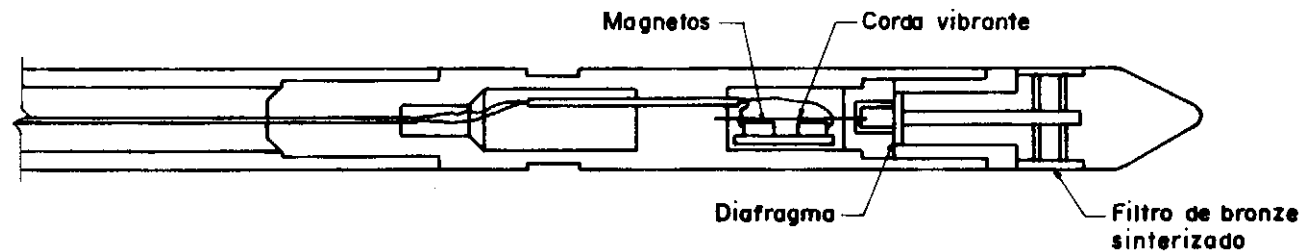
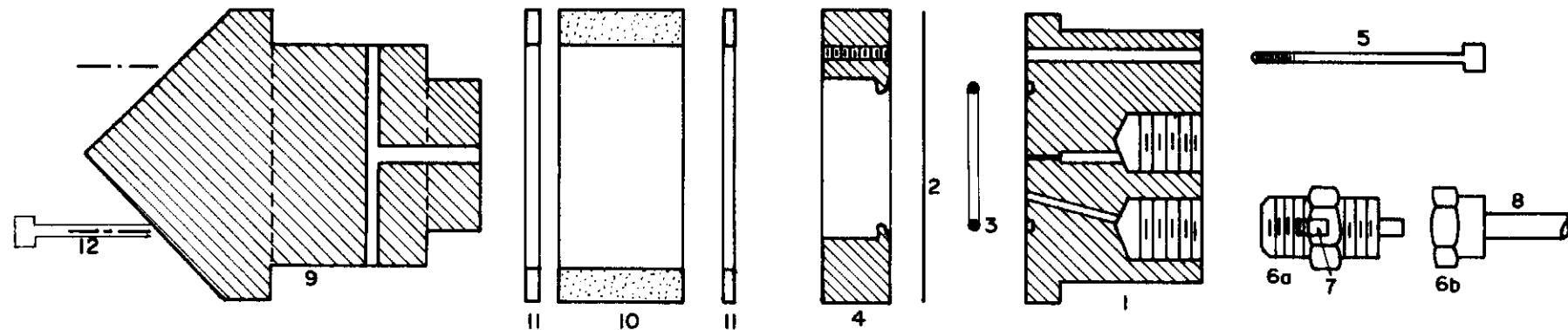


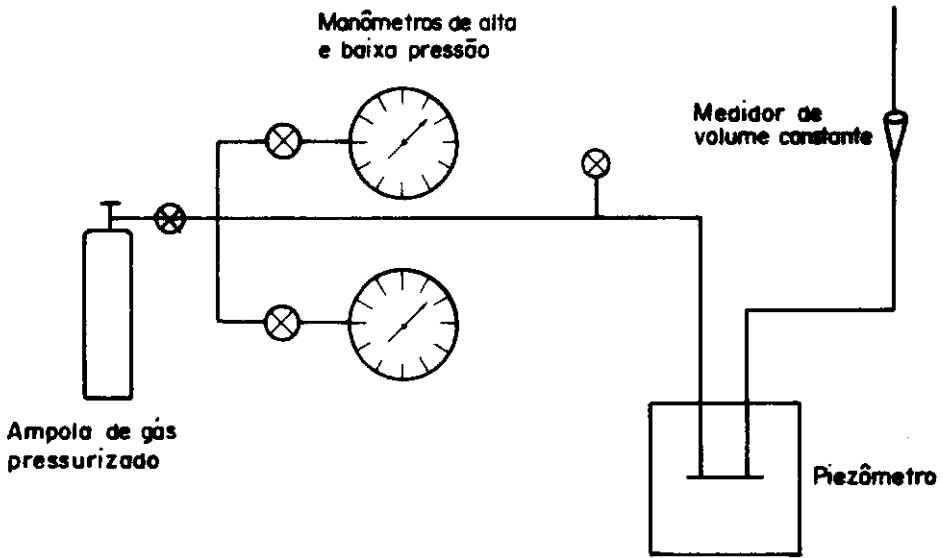
FIG. 3.19 — Piezômetro Geonor .



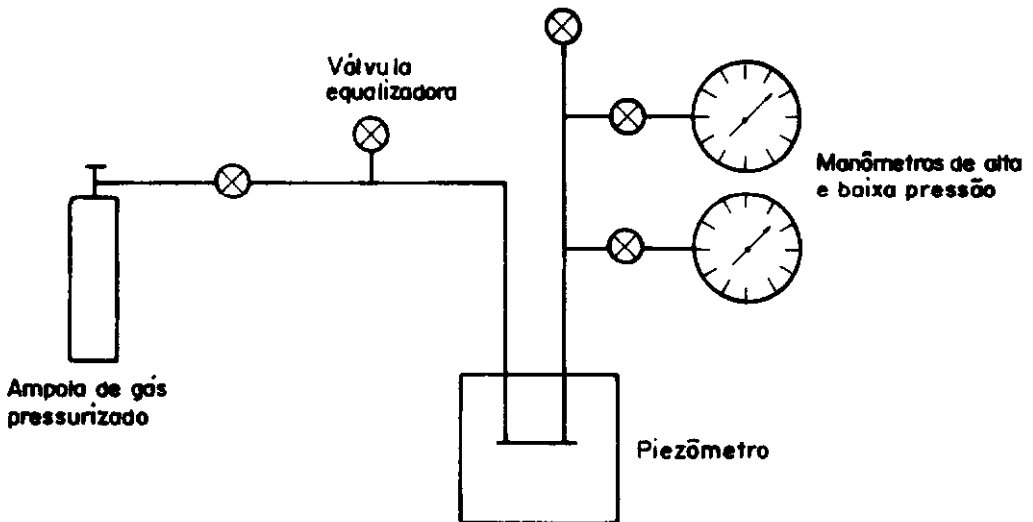
- 1 - Peça superior em metal
- 2 - Membrana de aço inoxidável
- 3 - Anel de vedação de borracha
- 4 - Anel de fixação de membrana
- 5 - Parafusos superiores de fixação
- 6 - Conexão do tubo de nylon

- 7 - Pastilha filtrante do gás
- 8 - Tubos de nylon
- 9 - Peça inferior em metal
- 10 - Elemento filtrante
- 11 - Anéis de borracha de fixação
- 12 - Parafusos inferiores de fixação

FIG. 3.20 - Vista desmontada do Piezômetro fabricado na COPPE .

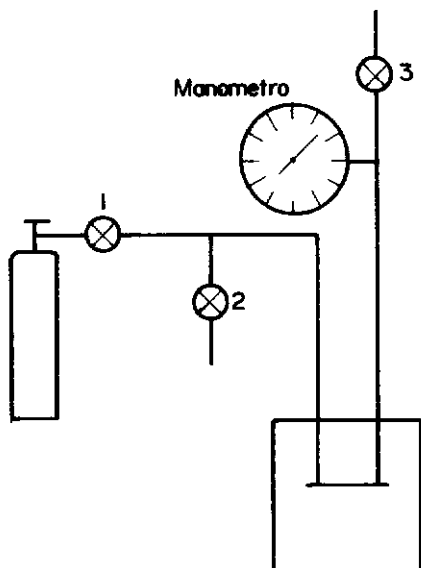


a) ESQUEMA ATUAL DO APARELHO DE LEITURA .

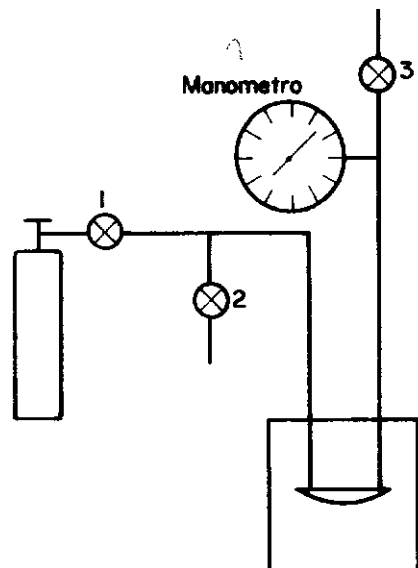


b) ESQUEMA PROPOSTO DO APARELHO DE LEITURA .

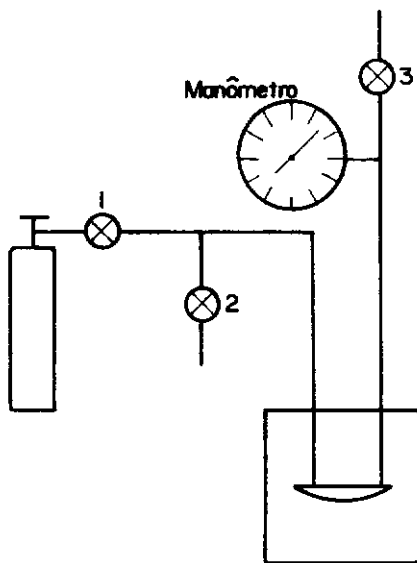
FIG. 3.21 — Esquema de operação de leitura .



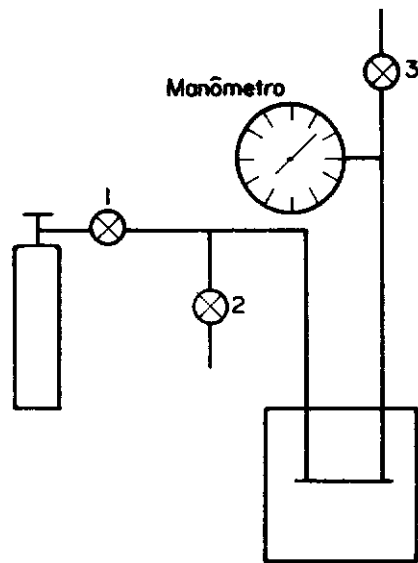
a) ESTADO INICIAL, VÁLVULA 1 ABERTA
VÁLVULAS 2 E 3 FECHADAS



b) SISTEMA PRESSURIZADO, MANÔMETRO
INDICA A PRESSÃO DO SISTEMA



c) EQUILIBRAÇÃO DA PRESSÃO, FECHA A
VÁLVULA 1 E ABRE A VÁLVULA 2



d) LEITURA, O EQUÍLBIO DA PRESSÃO FE-
CHA A MEMBRANA E MANTÉM A PRES-
SÃO NO MANÔMETRO

FIG. 3.22 — Fases de operação propostas do Piezômetro.

APÊNDICE 1PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO ELÉTRICO

A base do funcionamento da célula de carga é a deformação do cilindro de aço que compõe o núcleo do carretel, para o qual se emprega um conveniente fator de segurança de modo a garantir que esteja sempre trabalhando em sua fase elástica. Para auferir a resposta da compressão, já que as deformações são imperceptíveis à maioria dos equipamentos, usam-se os extensômetros elétricos, que são componentes construídos a partir de ligas metálicas que possuem a propriedade de variar suas resistências nominais quando submetidos a alongamentos ou encurtamentos de seu comprimento original.

Os mais utilizados atualmente são os produzidos por corte ou rebaixamento fotoquímico de uma lâmina de metal, na forma e dimensões adequadas, que são depois colados a uma base de plástico ou papel para facilitar o manuseio e a instalação.

A variação da resistência de um extensômetro elétrico, dentro de seus limites de linearidade, obedece à seguinte equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (A1.1)$$

onde:

R = resistência nominal do extensômetro elétrico;

L = comprimento nominal do extensômetro elétrico;

ΔR = variação na resistência quando sob esforço;

ΔL = variação no comprimento quando sob esforço; e

K = constante de proporcionalidade que depende da liga metálica da qual é feito o extensômetro.

Nas células de carga construídas pela COPPE, foram empregados quatro extensômetros elétricos, dois em sentido paralelo à geratriz do cilindro do carretel e dispostos diametralmente opostos de modo a poderem compensar eventual excentricidade na aplicação da carga, e os outros dois em direção ortogonal ao longo de uma circunferência do cilindro do carretel, conforme mostrado na figura A1.1. Tal disposição permite, quando o conjunto é ligado em ponte completa no aparelho de leitura, um sinal de saída maior e equilíbrio em relação à temperatura.

O sinal emitido pelos extensômetros elétricos horizontais, de amplitude contrária, provocada pelo aumento do diâmetro de carretel sob pressão, é de valor pequeno, bem como o erro cometido em se instalar compensadores de temperatura nesta mesma peça.

O aparelho de leitura é basicamente um comparador para a ponte de Wheastone que se forma com a ligação adequada destes quatro extensômetros elétricos. Para que se possa compreender como funciona o sistema, já que os quatro extensômetros elétricos variam em suas resistências com as deformações, pode-se analisar através da figura A1.2.

Na figura A1.2a os três resistores "R" estão dentro do aparelho de leitura, e com o resistor variável "Rvar" pode-se balancear a ponte quando o extensômetro elétrico está em uma célula de carga. Ao se aplicar um esforço na célula, esta se deforma, e deformando o extensômetro elétrico a ponte sairá do equilíbrio, variando o resistor variável consegue-se que ela se equilibre novamente. Esta variação poderá ser assumida como sendo proporcional ao valor da carga.

Na figura A1.2b, a deformação da célula de carga causará alteração nos valores dos dois extensômetros elétricos, assim teremos que o valor de "Rvar" aplicado será proporcional ao dobro do esforço aplicado. Já no caso da figura A1.2c, a utilização de quatro extensômetros elétricos prende-se a outra finalidade já que a variação dos extensômetros elétricos dispostos horizontalmente não implica em variação de sua resistência visto que têm grande área no ponto de curvatura dos filamentos. Assim a resposta de uma ligação em ponte completa será praticamente equivalente em intensidade a uma ligação em meia ponte, havendo entretanto o equilíbrio em relação à temperatura causada pelos extensômetros elétricos horizontais.

Os extensômetros elétricos são geralmente fabricados com resistência nominal de 120Ω , e caso este valor fosse real, os resistores internos do equipamento de leitura "R" poderiam ser iguais a eles, e a ponte seria equilibrada quando a célula de carga não estivesse submetida a esforços, se sob tensão poder-se-ia aplicar diretamente a equação A1.1. Entretanto, como isto não ocorre, passa-se a trabalhar com os valores como se fossem números absolutos e proceder aferições periódicas para verificar a

repetibilidade das leituras. Mesmo que ocorresse, as variações das resistências são muito pequenas e seriam necessários aparelhos de grande sensibilidade, portanto muito caros.

Os aparelhos de leitura dos sinais constituem-se basicamente de uma fonte de alimentação contínua de baixa voltagem, aproximadamente 10V, e bem estabilizada, que se aplica aos pontos A e C da ponte de Wheatstone formada, conforme se nota na figura A1.3, e em um resistor variável que é introduzido em um braço da ponte de modo a se poder equilibrá-la. Isto se observa quando um miliamperímetro, colocado entre os pontos B e D da ponte, acusa corrente nula.

Para a leitura foram utilizados os aparelhos fabricados pela Vishay e pela Kyowa. O valor lido no Vishay representa tão somente um valor de referência enquanto que o do Kyowa representaria diretamente o valor da deformação em $\mu\epsilon$ (microdeformação). Entretanto, devido à desigualdade entre as resistências nominais dos extensômetros elétricos, sua interpretação torna-se bem mais fácil quando considerado também somente como número, auxiliado de uma curva de calibração da célula.

Quanto aos extensômetros elétricos, como já foi dito, seu funcionamento se baseia na propriedade de certos materiais condutores de variarem suas resistências elétricas quando são deformados mecanicamente por alongamentos ou encurtamentos. A resistência do fio condutor é função de sua resistividade, do comprimento e da área de sua seção transversal, assim:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (A1.2)$$

diferenciando e dividindo por $R = \rho L/A$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

como $A = \pi r^2$ e $\frac{dA}{A} = \frac{dr}{r} = -\gamma \frac{dL}{L}$ e aplicando equação anterior

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1-2\gamma) \frac{dL}{L}$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dR}{L}} - \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}} + (1-2\gamma)K' \therefore \frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} K'$$

em termos finitos

$$\frac{\Delta R}{R} = K' \frac{\Delta L}{L} \quad (A1.2)$$

A ligação em quarto de ponte, conforme a figura A1.2a, pode ser simplificada, para maior facilidade de análise no sistema da figura A1.3, e alterando o valor da resistência variável mantêm-se zerada a leitura do miliamperímetro quando o valor da resistência do extensômetro R , varia com a deformação, assim:

$$V_{BC} = V \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (A1.3)$$

havendo variação no extensômetro $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$ teremos

$$V'_{BC} = V \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2}$$

a variação da voltagem será

$$V_{BC} = V'_{BC} - V_{BC}$$

$$\begin{aligned}\Delta V_{BC} &= V'_{BC} - V_{BC} \\ &= V \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \\ \Delta V_{BC} &= V \left(\frac{\Delta R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 + \Delta R_1 (R_1 + R_2)} \right)\end{aligned}$$

desprezando $\Delta R_1 (R_1 + R_2)$ por ser muito pequeno em relação ao quadrado $(R_1 + R_2)^2$ e multiplicando e dividindo por R_1 teremos:

$$\Delta V_{BC} = V \frac{R_1 R_2 \frac{\Delta R_1}{R_1}}{(R_1 + R_2)^2} = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} K_1 \epsilon_1 \quad (A1.4)$$

Assim, a partir da equação A1.4, obtendo ΔV_{BC} , V e R_2 com o aparelho de leitura e R_1 e K_1 das especificações do fabricante do extensômetro elétrico, teremos o valor do alongamento ϵ_1 dado por:

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta V_{BC} (R_1 + R_2)^2}{V R_1 R_2 K_1} \quad (A1.5)$$

A ligação em ponte completa, conforme a figura A1.4, funciona do mesmo modo e o seu desenvolvimento, através da variação da voltagem do miliamperímetro M_1 será o seguinte:

$$V_{BD} = V \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (A1.6)$$

variando os valores dos extensômetros elétricos com a deformação e estando a ponte inicialmente equilibrada, isto é, $R_1 R_3 = R_2 R_4 \rightarrow V_{BD} = 0$ para facilitar a demonstração teremos:

$$\Delta V_{BD} = V'_{BD} - \cancel{V_{BD}^0} = V'_{BD} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{[(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)][(R_3 + \Delta R_3) + (R_4 + \Delta R_4)]} =$$

$$= \frac{R_1 R_3 + R_1 \Delta R_3 + \Delta R_2 R_3 + \Delta R_1 \Delta R_3 - R_2 R_4 - R_2 \Delta R_4 - \Delta R_2 R_4 - \Delta R_2 \Delta R_4}{R_1 R_3 + R_1 \Delta R_3 + R_1 R_4 + R_1 \Delta R_4 + \Delta R_1 R_3 + \Delta R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_4 + \Delta R_1 \Delta R_4 +$$

$$+ R_2 R_3 + R_2 \Delta R_3 + R_2 R_4 + R_2 \Delta R_4 + \Delta R_2 R_3 + \Delta R_2 \Delta R_3 + \Delta R_2 R_4 + \Delta R_2 \Delta R_4}$$

como $R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0$, desprezando os produtos bivaricionais do numerador em relação aos monovariacionais, e também os valores bivariacionais e monovariacionais de denominador em relação aos sem variação, teremos uma grande simplificação:

$$\Delta V_{BD} = V'_{BD} = \frac{R_1 \Delta R_3 - R_2 \Delta R_4 + R_3 \Delta R_1 - R_4 \Delta R_2}{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4}$$

dividindo e multiplicando por $R_1 R_2 R_3 R_4$ teremos:

$$\Delta V_{BD} = V'_{BD} = \frac{\frac{K_3 \epsilon_3}{R_2 R_4} - \frac{K_2 \epsilon_2}{R_1 R_3} + \frac{K_1 \epsilon_1}{R_2 R_4} - \frac{K_4 \epsilon_4}{R_1 R_3}}{\frac{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4}{R_1 R_2 R_3 R_4}}$$

como $R_1 R_2 = R_3 R_4$ e fazendo igual a X teremos:

$$\Delta V_{BD} = V'_{BD} = \frac{\frac{K_3 \epsilon_3 - K_2 \epsilon_2 + K_1 \epsilon_1 - K_4 \epsilon_4}{X}}{\frac{(2X + R_1 R_4 + R_2 R_3)}{X^2}}$$

$$\Delta V_{BD} = V'_{BD} = \frac{X}{2X + R_1 R_4 + R_2 R_3} \cdot [K_1 \epsilon_1 - K_2 \epsilon_2 + K_3 \epsilon_3 - K_4 \epsilon_4] \quad (A1.7)$$

Em uma célula de carga com os extensômetros elétricos dispostos como na figura A1.4, teremos $\epsilon_1 = \epsilon_3$; $\epsilon_2 = \epsilon_4$ e $\epsilon_2 = \mu \epsilon_1$,

ainda se $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ e $K_1=K_2=K_3=K_4=K$, teremos:

$$\begin{aligned}
 V_{BD} = V'_{BD} &= \frac{R^2}{2R^2+R^2+R^2} \left[K(\epsilon_1 - \mu\epsilon_1 + \epsilon_1 - \mu\epsilon_1) \right] = \\
 &= \frac{R^2}{4R^2} \left[K(2\epsilon_1 - 2\mu\epsilon_1) \right] = \frac{1}{4} \left[2K\epsilon_1(1-\mu) \right] = \frac{K\epsilon_1(1-\mu)}{2} \quad (A1.8)
 \end{aligned}$$

Assim, a partir da equação A1.8, obtendo ΔV_{BD} com o aparelho de leitura, e K da especificação do fabricante do extensômetro elétrico, teremos o valor do alongamento dado por:

$$\epsilon_1 = \frac{2\Delta V_{BD}}{K(1-\mu)} \quad (A1.9)$$

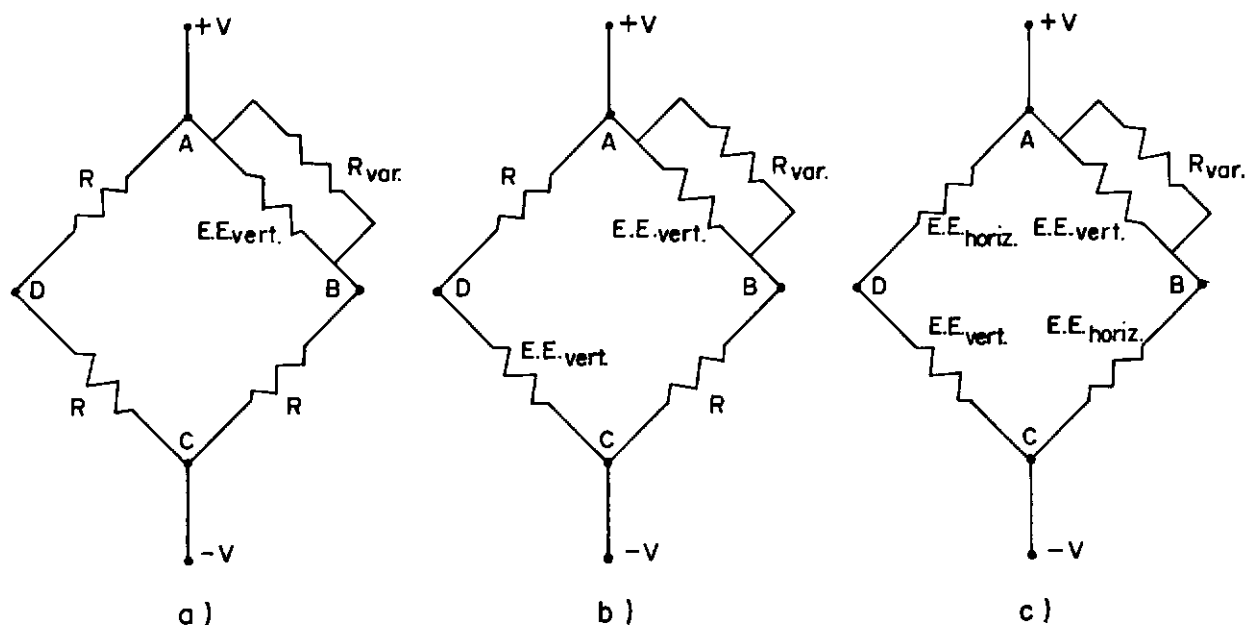


Figura A1.2 - Tipos de Ligação de Extensômetros Elétricos em Pontes de Wheaststone:

- a) Ligação em um quarto de ponte de um extensômetro;
- b) ligação em meia ponte de dois extensômetros; e
- c) ligação em ponte completa de quatro extensômetros.

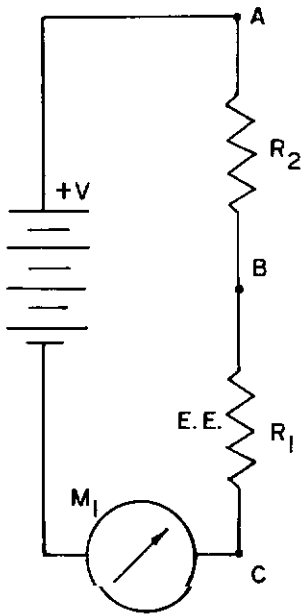


Figura A1.3 Esquema simplificado da ligação de um extensômetro elétrico. A variação de R_1 altera a leitura de M_1 deverá ser compensado variando-se o valor de R_2 , que é lido

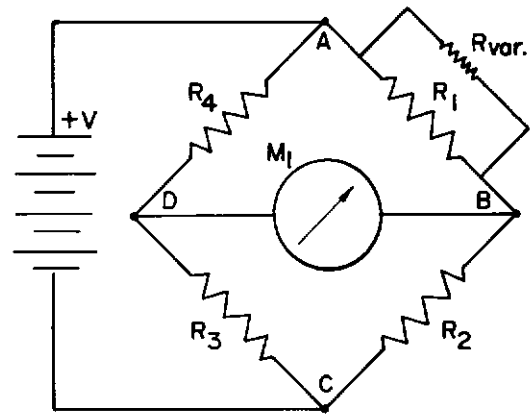


Figura A1.4 - Esquema de ligação de quatro extensômetros elétricos em ponte completa, com carga aplicada e miliamperímetro.

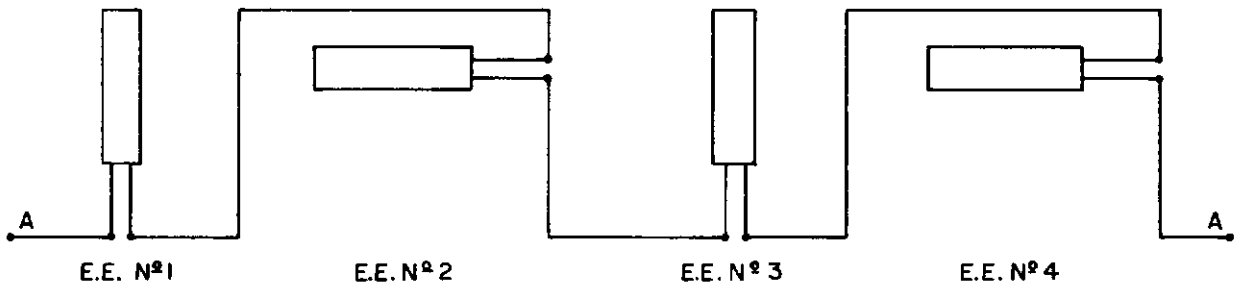


Figura A1.1 - Esquema de posicionamento dos quatro extensômetros elétricos no interior das Células de Carga

APÊNDICE 2PROJETOS DE CÉLULAS DE CARGA

O projeto de células de carga similares às do presente estudo, baseia-se na análise de seus elementos constitutivos principais, a saber a área da seção transversal do carretel de aço, que vai resistir ao esforço aplicado, bem como as características dos extensômetros elétricos empregados, que vão fornecer o sinal elétrico correspondente às suas deformações, assim como a quantidade utilizada, disposição e forma de ligação dos mesmos.

Quanto à seção de aço do carretel, esta pode ser dimensionada segundo dois princípios: (1) o de não se poder permitir deformação apreciável da estrutura arrimada, quando consideramos este movimento e/ou condicionamos a deformação específica da célula de carga com a do estroncamento ou atirantamento, e (2) o da deformação da estrutura arrimada não ser importante quando dimensionamos a célula de carga para trabalhar nos limites de linearidade dos extensômetros elétricos ou do carretel de aço.

O segundo princípio conduz a projetos de células de carga bem mais esbeltas, conseqüentemente mais leves, com as vantagens daí decorrentes do manuseio facilitado e tamanho reduzido.

O material a ser empregado nas partes metálicas da célula deverá ser o aço, com um tratamento superficial anti-corrosivo de boa qualidade, visto que as situações em que normalmente se empregam as células de carga são de meios bastante agressi

vos, ao relento, sujeitas às intempéries, enterradas e raramente são feitas inspeções de limpeza e manutenção.

As equações que regem o dimensionamento da seção de aço de carretel são as da resistência dos materiais:

$$P = S\sigma \quad (A2.1)$$

$$\sigma = \delta E \quad (A2.2)$$

onde:

P = esforço de solicitação no carretel de aço;

S = área da seção de aço do cilindro do carretel;

σ = tensão admissível à compressão do aço;

δ = deformação específica do aço sob compressão; e

E = módulo de elasticidade do aço.

Para o primeiro caso, de não se permitir deformação sensível entre as estruturas em que os esforços estão atuando, vamos considerar para efeito de cálculo, que a ordem de grandeza da deformação permissível específica seja de 0,05%, isto é, de 0,5mm por metro, assim:

$$\sigma = \delta E = \frac{0,05}{100} \times 2.100.000 = 1050 \text{ kg/cm}^2$$

Como isto representa aproximadamente a quarta parte do valor admissível da resistência à compressão do aço, caso da ordem de 4200 kg/cm^2 , uma célula de carga de 100t de carga de tamanho seria capaz de suportar 400t em seu limite de linearidade. Neste caso o diâmetro necessário para o carretel de uma célula seria definido de acordo com a equação a seguir:

$$P = A\sigma = \frac{\pi D^2}{4} \sigma \therefore D = \sqrt{\frac{4P}{\sigma\pi}} \quad (A2.3)$$

e definida a carga de trabalho teremos o diâmetro mínimo necessário. Como exemplo, para uma carga de trabalho de 150t, aplicando a tensão admissível de $\sigma = 1050 \text{ kg/cm}^2$ teremos:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{1050\pi}} = \sqrt{1.2126 \times 10^{-3} \times P} = 13.49 \text{ cm}$$

Para as cargas usuais de projeto iremos obter, aplicados os critérios anteriormente descritos, a coluna 3 da tabela A2.1 e o gráfico A2.1, que fornece diâmetro do núcleo do carretel de aço em função da carga de trabalho.

Para as células de carga que se pretenda utilizar no emprego dos tirantes, é necessário que tenham um furo em seu eixo, isto é, que sejam anelares. Esta forma é particularmente interessante em todas as células de carga pois aumenta o seu diâmetro contribuindo para uma melhoria da estabilidade, sem contudo aumentar o seu peso, o que dificulta o manuseio. É o que se nota nas células pequenas, pois a maciça de 50t necessita de um núcleo de carretel de aço de somente 8 cm de diâmetro.

O diâmetro do furo central é função do que se pretende passar por ele, que tanto pode ser um tirante de barra de diâmetro de 1 1/4" para 20t quanto um tirante de fios de aço para cargas elevadas. Para simplificação de exemplo o furo será padronizado entre 5 e 15 cm e o cálculo do diâmetro do carretel de aço de reação será feito de acordo com a equação a seguir:

$$P = A\sigma = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) \sigma = \frac{\sigma \pi}{4} (D^2 - d^2) \therefore D = \sqrt{\frac{4}{\sigma \pi} P + d^2} \quad (\text{A2.4})$$

e definida a carga de trabalho teremos o diâmetro mínimo necessário. Como por exemplo, para a carga de trabalho de 150 t, aplicando a tensão admissível de 1050 kg/cm² e para um furo de diâmetro de 7,5 cm vem:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{1050\pi} + 7,5^2} = \sqrt{1,2126 \times 10^{-3} P + 56,25} = 15,43 \text{ cm}$$

Para as cargas usuais de projeto iremos obter, aplicados as premissas anteriores e os diâmetros dos furos entre 5 e 15 cm, as colunas 7 e 8 da tabela A2.1, e o gráfico na figura A2.1, que fornece o diâmetro mínimo do núcleo do carretel de reação de aço em função da carga de trabalho para as células com tirantes.

Para o segundo caso, em que se permitam maiores deformações entre as estruturas em que os esforços estão atuando, temos que considerar os limites de deformação elástica dos extensômetros elétricos associados ao limite de deformação elástica à compressão do aço do cilindro de reação. Dependendo do tipo, os extensômetros elétricos podem ser deformados até 10% ou mais de seu comprimento nominal, sendo que os empregados na montagem da COPPE são deformáveis até 2,8%. Já o aço teria seu limite dado por:

$$\delta = \frac{\sigma}{E} = \frac{4200}{2.100.000} = \frac{0,2}{100} \text{ ou } 0,2\%$$

logo o limite de deformação a ser atingido primeiro seria o do carretel de aço, em 0,2% de seu comprimento.

As equações que regem o dimensionamento são as mesmas já apresentadas anteriormente, (A2.3 e A2.4) tanto para as células de cargas maciças quanto para as vazadas, sendo a única diferença o aumento do valor da deformação permissível. Assim vamos obter as colunas 4, 5 e 6 da tabela A2.1 para células maciças e deformações de 0,10, 0,15 e 0,20%, mostradas também na figura A2.2, e as colunas 9, 10 e 11 da mesma tabela para células vazadas e deformações de 0,10, 0,15 e 0,20%, mostradas também na figura A2.3.

Vemos, portanto, que a área de aço necessária para a construção de células de carga que permitam maiores deformações é bastante pequena, mesmo para cargas elevadas, gerando equipamentos leves e econômicos. Certamente os menores diâmetros serão impraticáveis por razões técnicas, construtivas ou de manuseio, mas isto poderia ser solucionado com o emprego de outros materiais, que não o aço, para elemento de reação, com módulo de deformação menor.

Antes da montagem das células de carga é necessário proceder a um pré-carregamento cíclico do anel de aço de reação com o objetivo de diminuir os efeitos de fenômeno da histerese ou, pelo menos, torná-lo constante para que a histerese possa ser controlada. Esta constância se dará quando, em ciclos sucessivos e carga e descarga, os pontos de carga nula a máxima sejam sempre os mesmos bem como os caminhos de ascensão e decréscimo das cargas dos vários ciclos de teste sejam coincidentes entre si, mes-

mo que o caminho de ascensão seja diferente ao de decréscimo de carga.

Quanto aos extensômetros elétricos, os que foram empregados apresentaram boa relação de sinal (aproximadamente 650 unidades para cada 100t de carga) e uma maneira de aumentar este sinal seria aumentar o número de extensômetros elétricos, por exemplo, passando de quatro para oito. Entretanto a maior vantagem disto seria melhorar a resposta às cargas excêntricas, colocando-os em forma de "T" como mostrado na figura 2.12c. Com esta disposição a célula de carga se compensaria para qualquer direção de excentricidade, o que não ocorre com o projeto atual que só está compensado se a excentricidade dos esforços for na direção dos extensômetros verticais.

A possibilidade das células de carga fabricadas pela COPPE serem solicitadas por esforços superiores aos previstos, somente causaria danos à célula se estes fossem quatro vezes o valor da carga de projeto, quando então o limite de cedência do aço à compressão será excedido com a tensão no aço passando de 4200 kg/cm^2 . Os extensômetros elétricos nada sofreriam pois o limite da deformação específica permissível para estes é bem superior.

Desta forma poderíamos considerar que estas células de carga possuem um fator de segurança de 4 em relação ao limite de cedência do aço. Considerando as tensões de compressão do aço nos outros dimensionamentos, teremos fatores de segurança de 3, 2 e 1 para as deformações de 0,1, 0,15 e 0,20% do comprimento nominal, respectivamente.

A utilização de células de carga com menor fator de segurança se daria em situações de maior definição das cargas a serem monitoradas, e uma célula de carga utilizada até $F_s = 1$ fornece um maior sinal com mais facilidade de manipulação. Na realidade tudo é uma questão de solicitação, pois se as células atuais forem carregadas até 4 vezes a carga de projeto estarão trabalhando no limite de linearidade do aço à compressão, portanto com $F_s = 1$, e a célula de carga de 150t poderia monitorar esforços até 600t.

Como os extensômetros elétricos se deformam muito mais do que o aço, podem ser pesquisados outros materiais com maior elasticidade, de forma a se obter um maior sinal do aparelho. Também materiais com menos resistências à compressão implicariam em células maiores, tornando mais estáveis as células de carga para observação de cargas baixas.

	CARGA DE TRABALHO (t)	DIÂMETROS DO CARRETEL MACIÇO				DIÂMETROS DO CARRETEL VAZADO				
		CLASSES DE DEFORMAÇÃO				φ INTERNO (cm)	CLASSES DE DEFORMAÇÃO			
		0,05%	0,10%	0,15%	0,20%		0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
1	50	7,79	5,51	4,50	3,89	5,0	9,25	7,44	6,72	6,34
2	100	11,01	7,79	3,36	5,51	5,0	12,09	9,25	8,09	7,44
3	100					7,5	13,32	10,81	9,83	9,30
4	150					5,0	14,38	10,77	9,25	8,39
5	150	13,49	9,50	7,79	6,74	7,5	15,43	12,13	10,81	10,09
6	200	15,57	11,01	8,99	7,79	7,5	17,28	13,32	11,71	10,81
7	200					10,0	18,51	14,87	13,45	12,67
8	250					7,5	18,96	14,42	12,54	11,49
9	250	17,41	12,31	10,05	8,71	10,0	20,08	15,86	14,18	13,26
10	300	19,07	13,49	11,01	9,54	10,0	21,54	16,79	14,87	13,82
11	300					12,5	22,80	18,39	16,66	15,72
12	350					10,0	22,90	17,67	15,54	14,36
13	350	20,60	14,57	11,89	10,30	12,5	24,10	19,20	17,25	16,20
14	400	22,02	15,57	12,72	11,01	12,5	25,32	19,97	17,83	16,66
15	400					15,0	26,65	26,62	19,66	18,61
16	450					12,5	26,49	20,71	18,39	17,11
17	450	23,36	16,52	13,49	11,68	15,0	27,76	22,31	20,17	19,01
18	500	24,62	17,41	14,22	12,31	15,0	28,83	22,98	20,67	19,41
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tabela A2.1

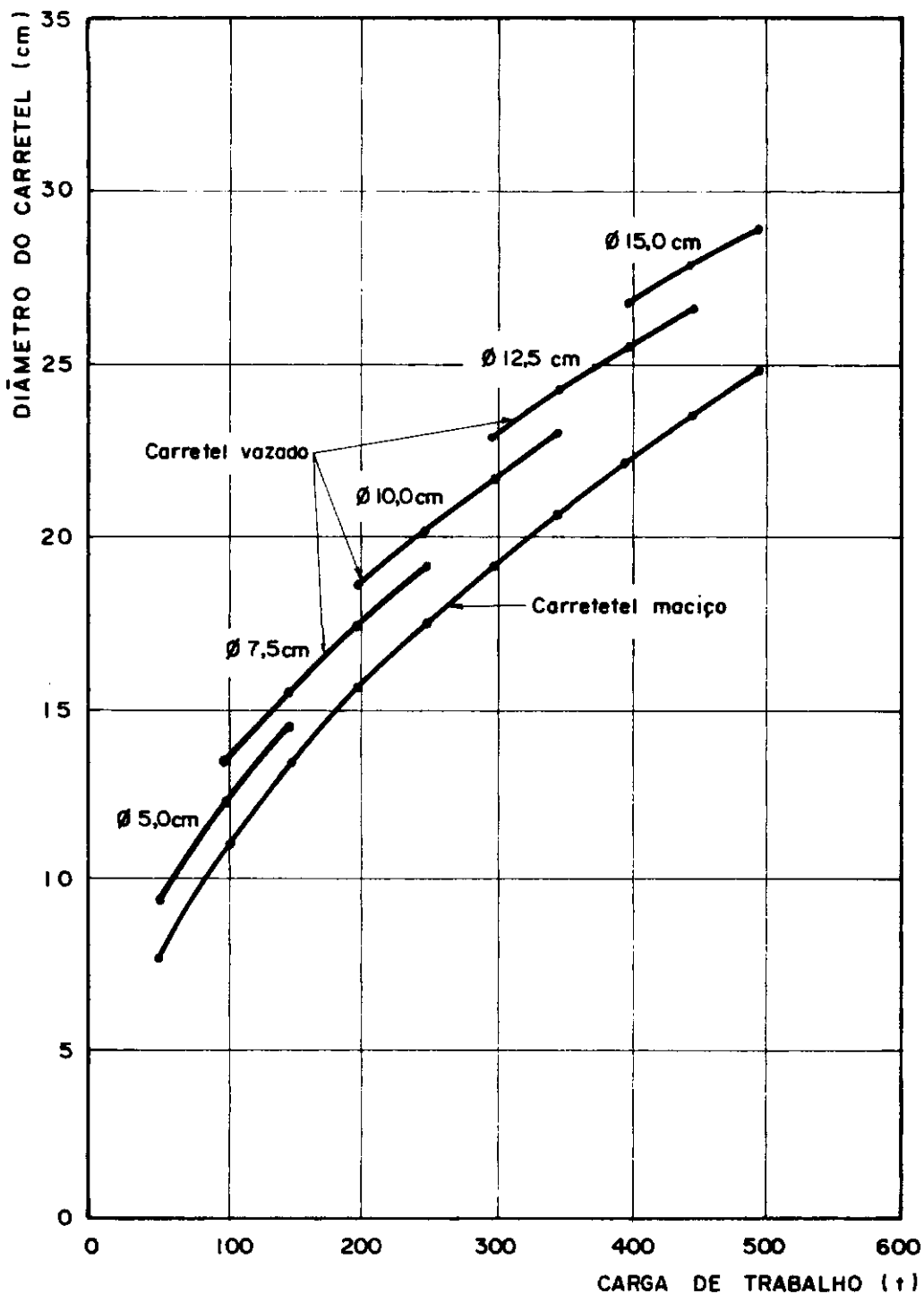


FIG. A 2.1 — Gráfico diâmetro versus carga de trabalho para células de carga maciças e vazadas e para deformação do carretel de reação de 0,05 %.

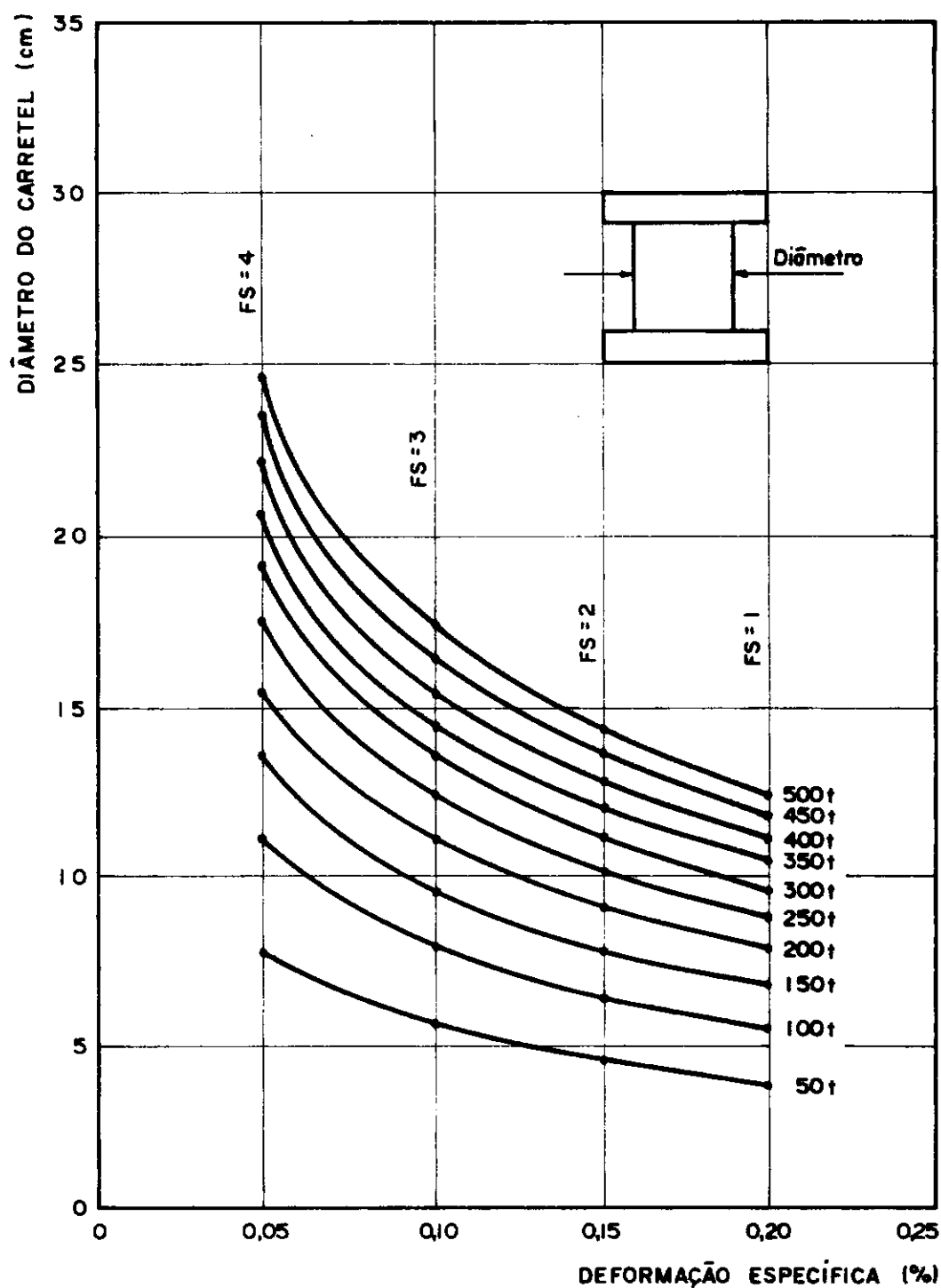


FIG. A 2.2 — Gráfico diâmetro versus deformação específica para células de carga maciças e para várias cargas de trabalho.

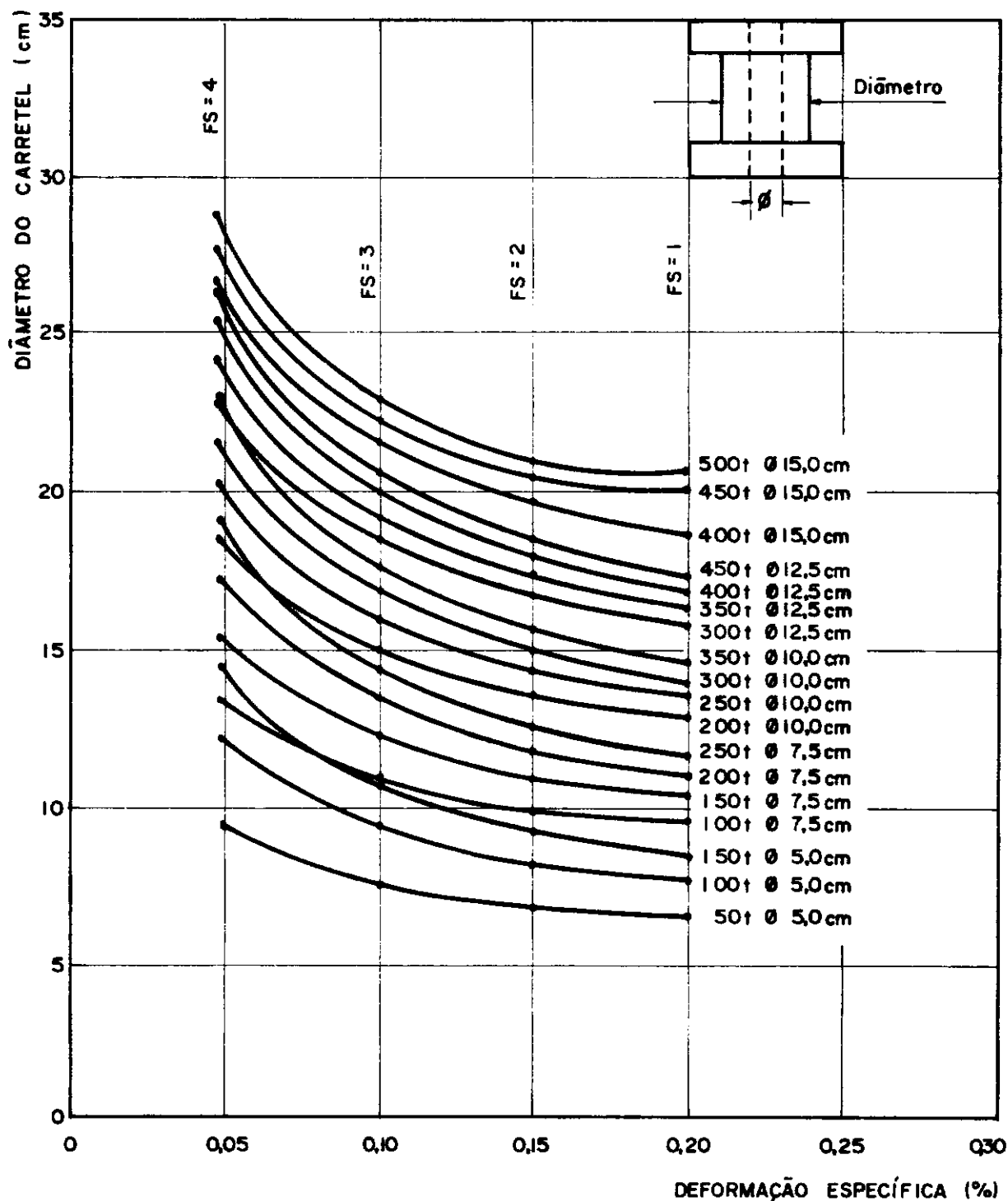


FIG. A 2.3 — Gráfico diâmetro versus deformação específica para células de carga vazadas e para várias cargas de trabalho .

APÊNDICE 3CURVAS DE CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA

Neste apêndice são apresentadas as curvas de calibração das células de carga construídas pela COPPE, realizadas entre os anos de 1973 e 1980. Para o trabalho de verificação do funcionamento das células de carga produzidas pela COPPE, foram executadas três etapas:

- a) reunir, catalogar e realizar uma limpeza geral das células de carga, com o desmonte da caixa de passagem e retirada dos cabos, de modo a facilitar o manuseio e eliminar sua possível influência na calibração;
- b) reunir as diversas calibrações existentes, executadas entre os anos de 1973 e 1979, para comparações; e
- c) realizar nova série de calibrações para análise conjunta com as calibrações anteriores.

Quanto ao primeiro item não se encontrou maiores dificuldades já que a maioria das células se encontrava nos laboratórios. Entretanto no que se refere ao segundo item, desde a fabricação do primeiro conjunto de células de carga, em 1973, diversas calibrações foram executadas, mas a interpretação eficiente do conjunto das mesmas foi dificultada por dois motivos.

O primeiro é que existem células de carga com a mesma numeração, sem outra marcação que as identifique, e portanto somente um registro de calibração. Assim, ou a calibração das mesmas se perdeu ao longo dos anos ou estão misturadas entre si sem que se tenha podido identificar. Destas hipóteses a mais provável é a segunda, já que existem ensaios bastante diferentes entre si. O segundo motivo é que as ligações dos quatro fios provenientes do interior da célula fornecem, como já vimos anteriormente, dois valores iniciais coerentes de leitura. No medidor Kyowa estes valores são mais ou menos simétricos em relação ao sinal (deveriam na realidade ser iguais em módulo), e no Vishay eles são tais que sua soma é uma constante própria do aparelho, como pode ser notado na tabela A3.1.

Ainda quanto ao Vishay, o aparelho apresenta um balanço interno cuja finalidade é zerar a leitura para se poder partir desta referência. Isto implica que, caso não se tome a precaução de saber como foi a posição do balanço na fase de calibração, as leituras serão incoerentes. O jogo máximo de balanço para a esquerda e para a direita, e as respectivas leituras observadas, estão na tabela A3.1 para as células de carga de 150t analisadas. Observa-se que o balanço interno fornece uma constante da ordem de 3940 unidades.

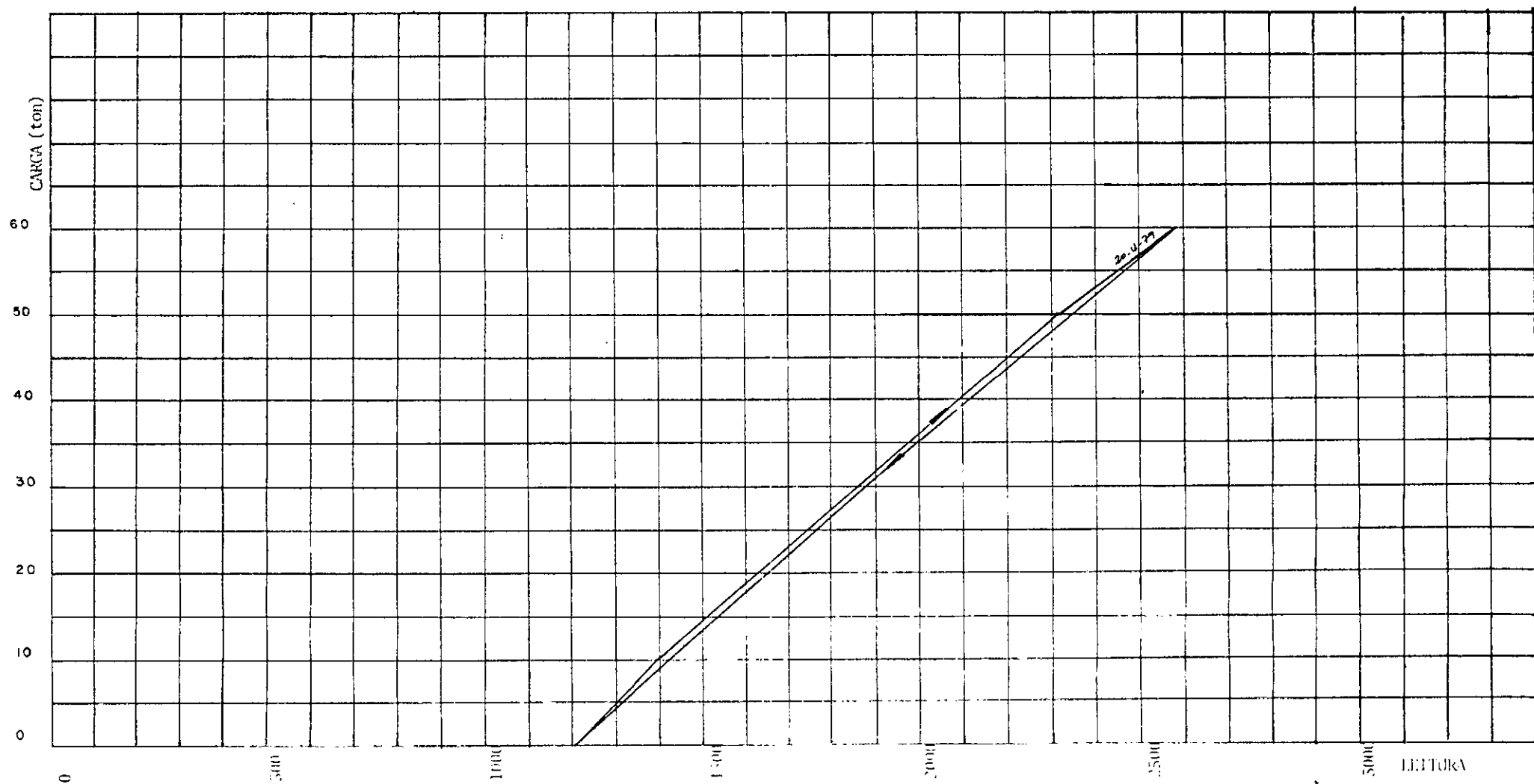
A constatação destas características permitiu alterar as curvas de calibração anteriores de modo a compará-las com as calibrações efetuadas em 1979 e 1980, obtendo-se os gráficos a seguir apresentados. A calibração das células de carga revelou resultados muito bons de curva de resposta sendo que, após

os cálculos de correlação em mais de 200 ensaios, encontrou-se o coeficiente de correlação médio de 0,998, obtido através do processo dos mínimos quadrados, considerando toda a variação da carga, e desprezando os 20% iniciais da carga aplicado o coeficiente de correlação média subiu para 1.000.

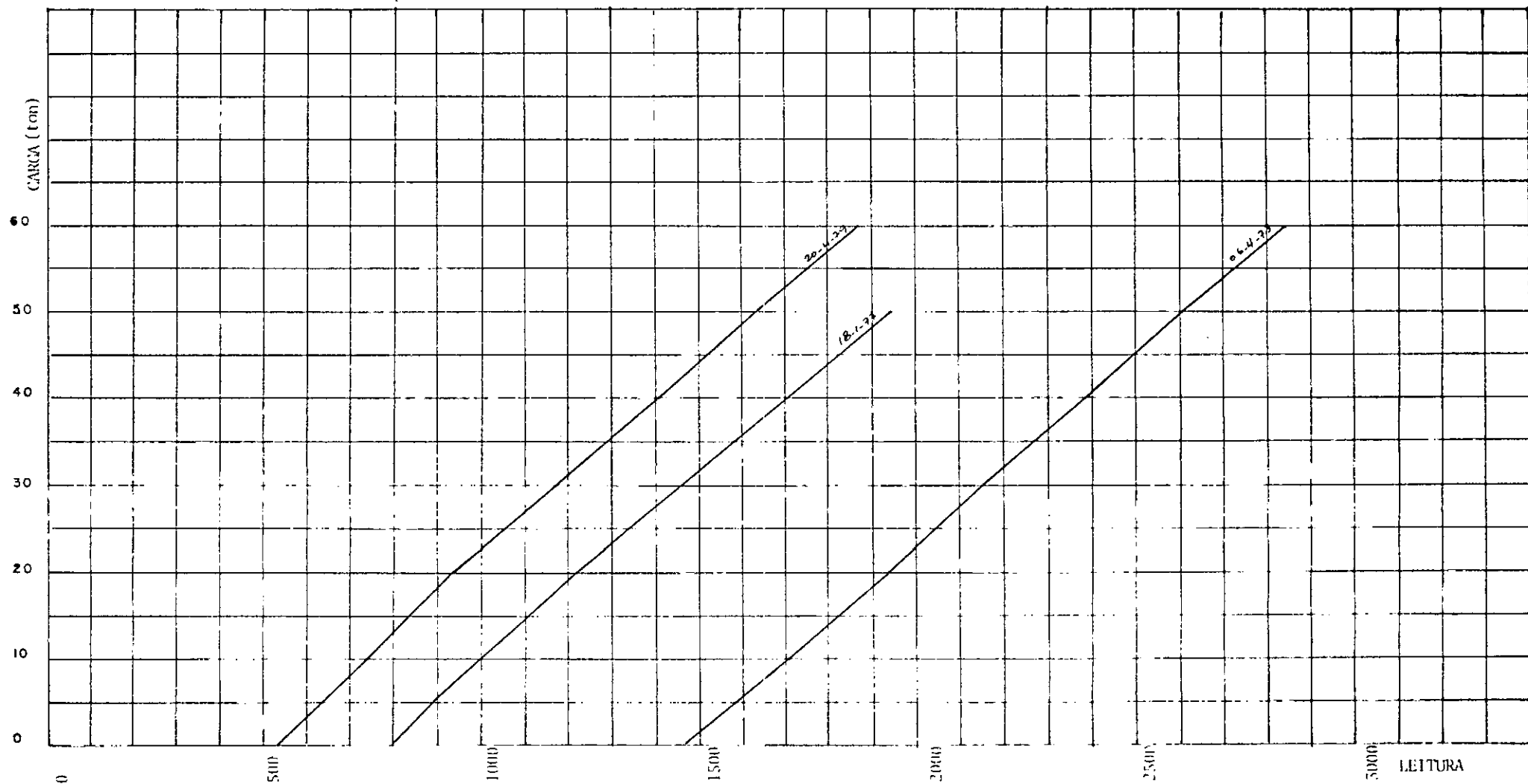
ORDEM DOS FIOS		SOMA	CÉLULA NÚMERO	POS. DO BALANÇO		DIFER.
VeBVoP	BVeVoP			ESQ.	DIR.	
+1622	+2335	3957	150-1	+1610	-2329	3939
+2014	+1940	3954	150-2	+2011	-1927	3938
+1454	+2475	3929	150-3	-1518	-2421	3939
+364	+3609	3973	150-3B	+356	-3592	3948
-851	-4820	3969	150-4	-858	-4800	3942
+2161	+1800	3961	150-4B	+2158	-1786	3944
+1268	+2694	3962	150-5	+1269	-2670	3939
+1147	+2812	3959	150-6	+1146	-2790	3936
-759	+4732	3973	150-6B	-757	-4707	3950
+2057	+1895	3952	150-7	+2055	1880	3935
+1832	+2122	3954	150-7B	+1871	-2055	3926
+1521	+2454	3975	150-8	+1815	-2424	3942
+1850	+2104	3954	150-8B	+1849	-2086	3935
+1455	+2501	3956	150-9	+1452	-2482	3934
+1018	+2936	3954	150-9B	+1012	-2922	3934
+383	+3580	3963	150-10	+370	-3571	3941
-	-	-	150-10BN	+5120	+1165	3955
-	-	-	150-10BM	-1152	-5100	3948
+840	+3115	3955	150-11	+828	-3106	3934
+1627	+2333	3960	150-12	+1645	-2296	3941
+2054	+1895	3949	150-13	+2048	-1882	3930
+1071	+2884	3955	150-13B	+1070	-2863	3933
+933	+3038	3971	150-14	+927	+3008	3935
+1081	+2877	3958	150-14B	+1056	-2880	3936
+3975	-5	3970	150-15	+3973	+12	3961
+1883	+2072	3955	150-16	+1878	+2057	3935
+1221	+2773	3995	150-17	+1257	-2682	3939
+1746	+2211	3957	150-20	+1749	-2190	3939
+1238	+2720	3958	150-21	+1241	-2697	3938
-1270	+5245	3975	150-22	-1260	-5208	3948
-1508	+5477	3969	150-23	-1517	-5460	3943
+917	+3040	3957	150-24	+917	-3016	3933
+825	+3131	3956	150-SN1	+804	-3132	3936
+485	+3433	3968	150-SN2	+466	-3480	3946
-500	+4466	3966	150-SN3	-505	-4447	3942

Tabela A3.1

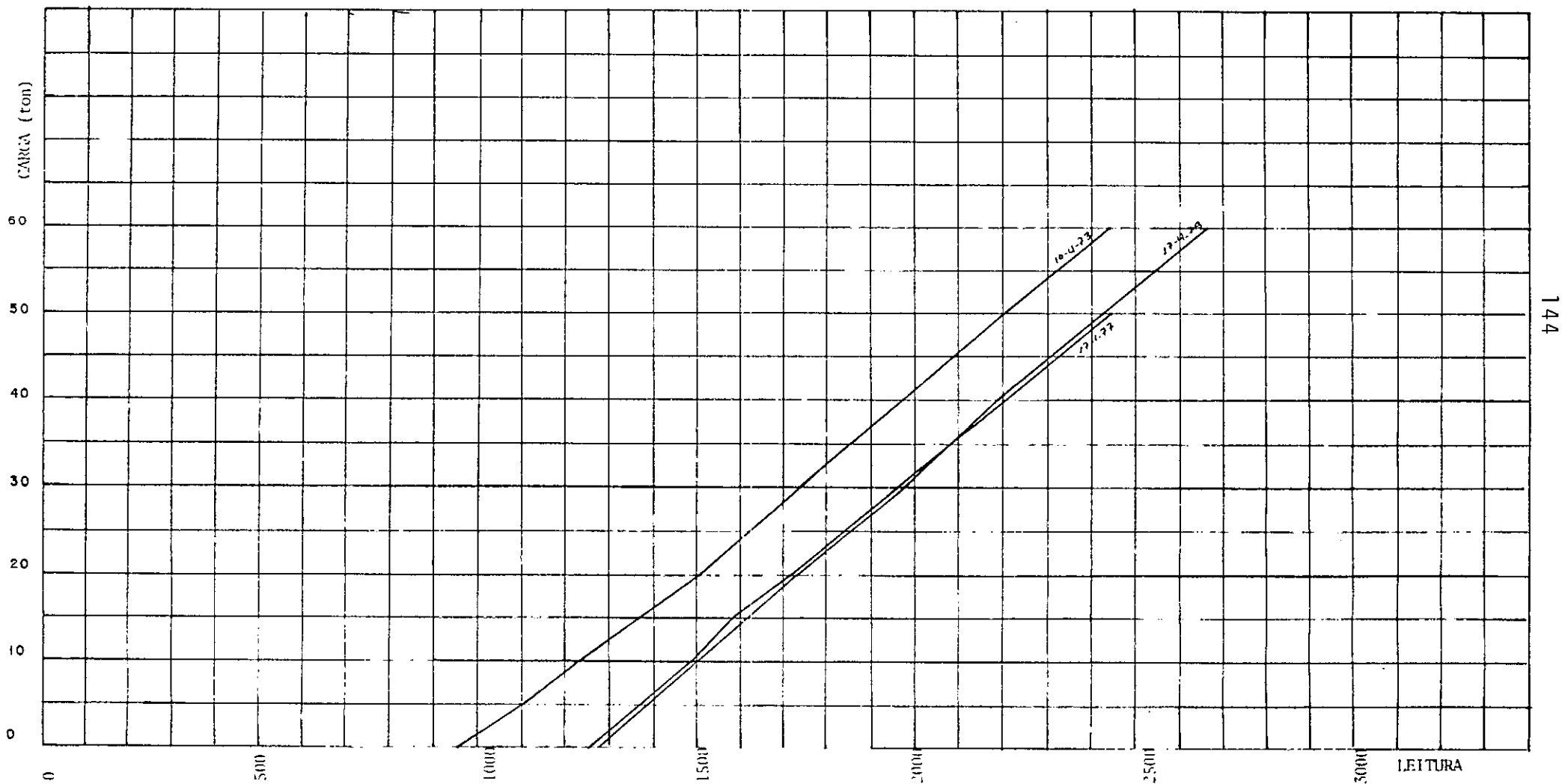
CELULA DE CARGA Nº 60-1



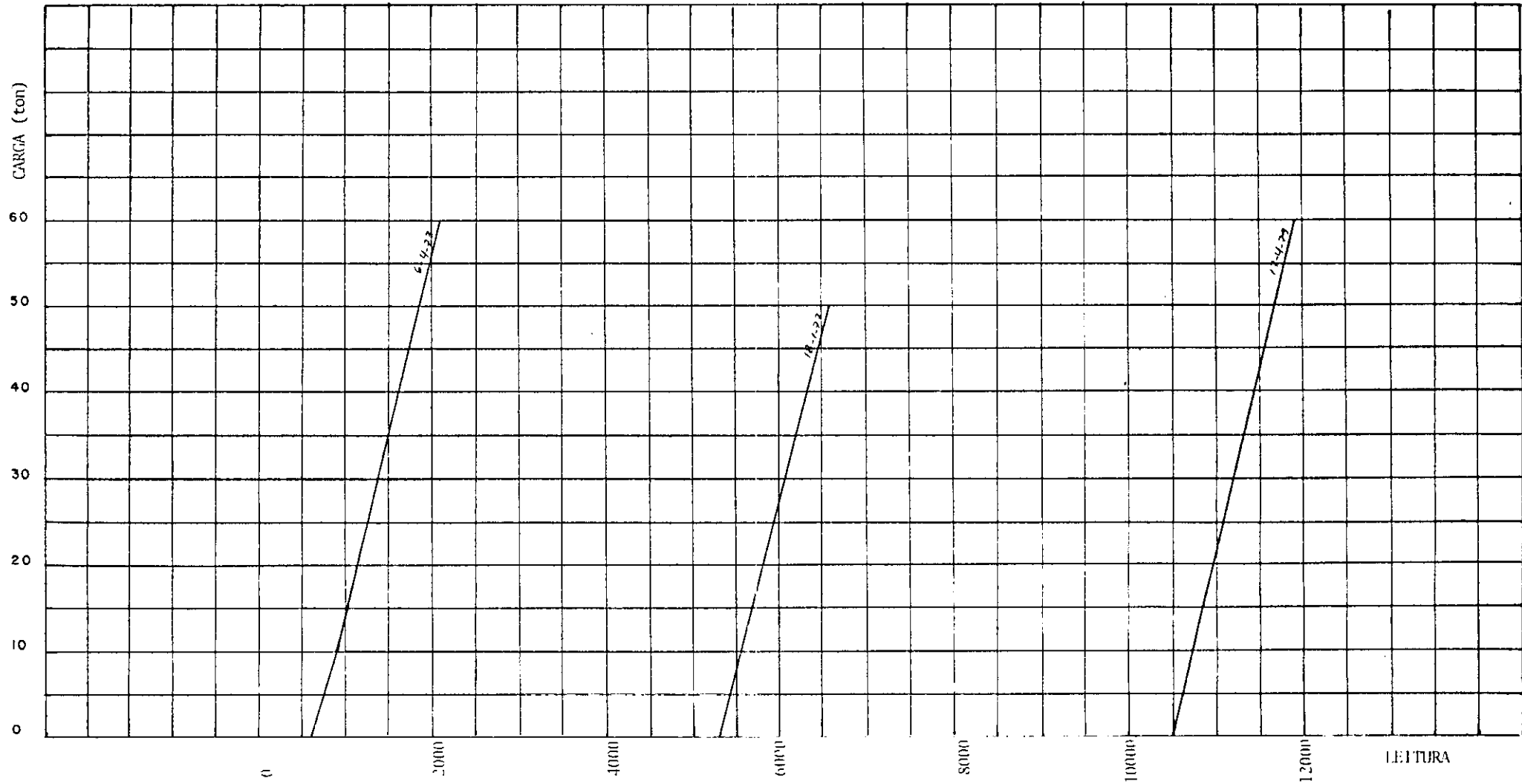
CELULA DE CARGA Nº 60-2



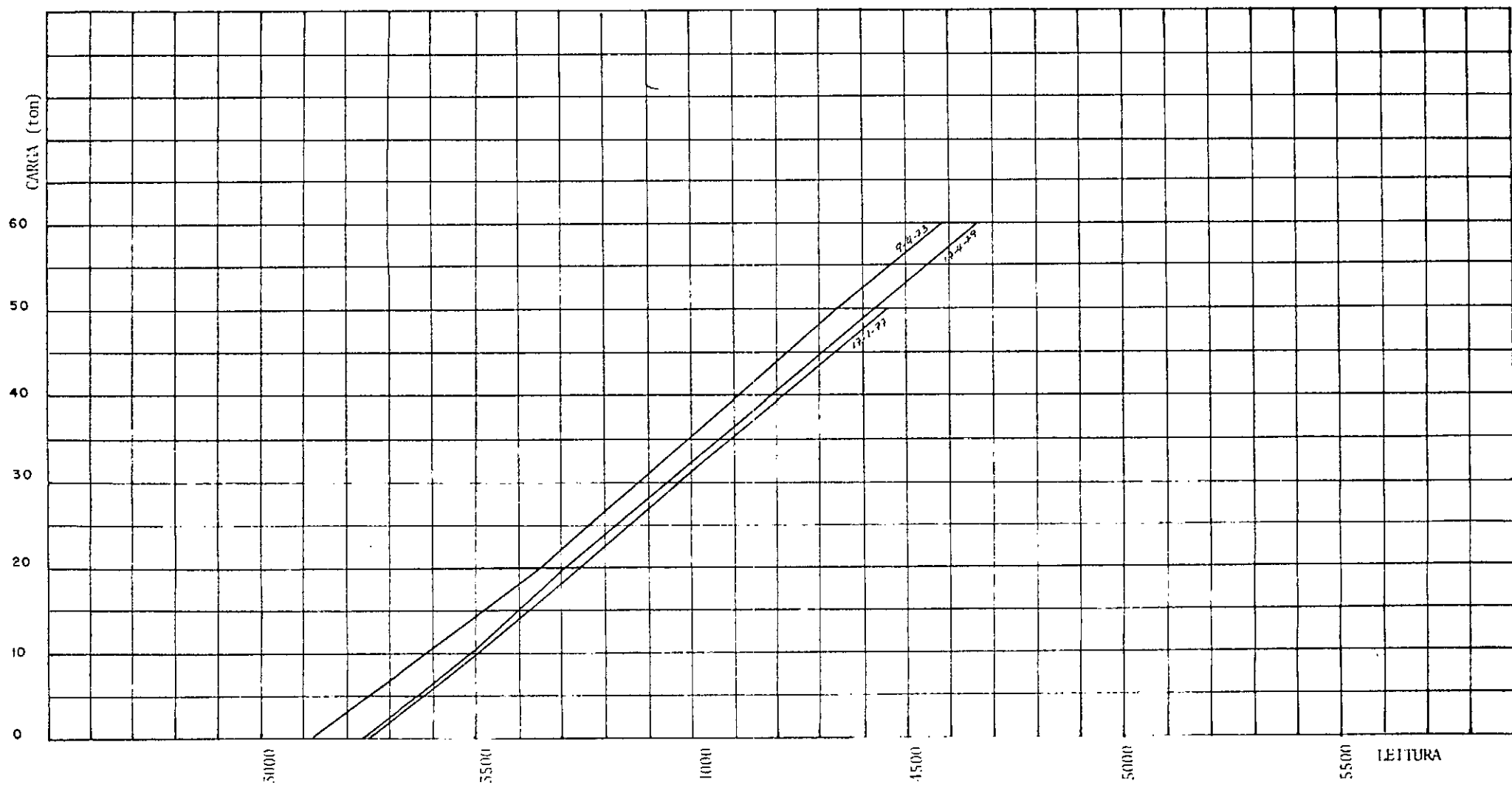
CELULA DE CARGA Nº 60 - 3



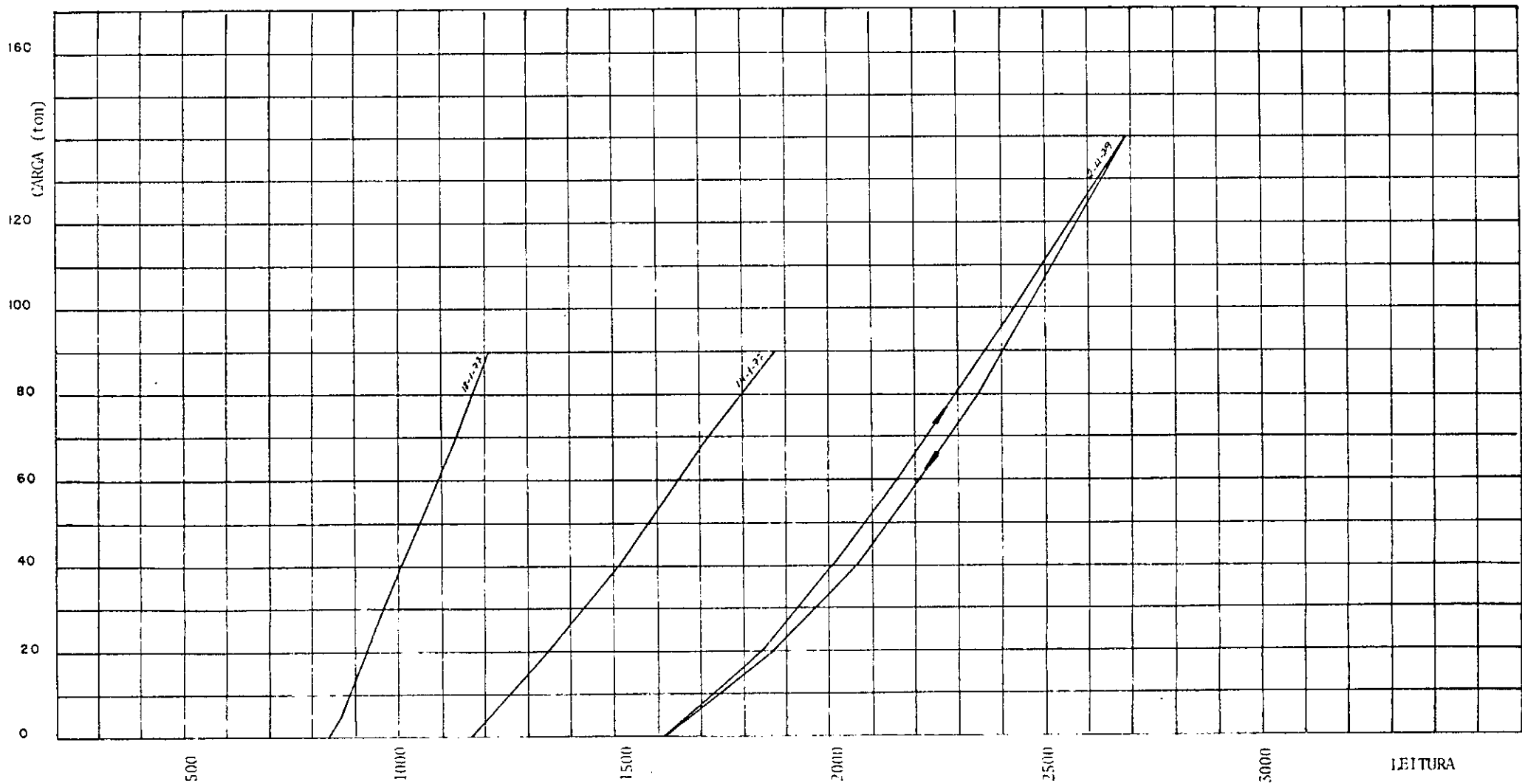
CELULA DE CARGA Nº 60-4



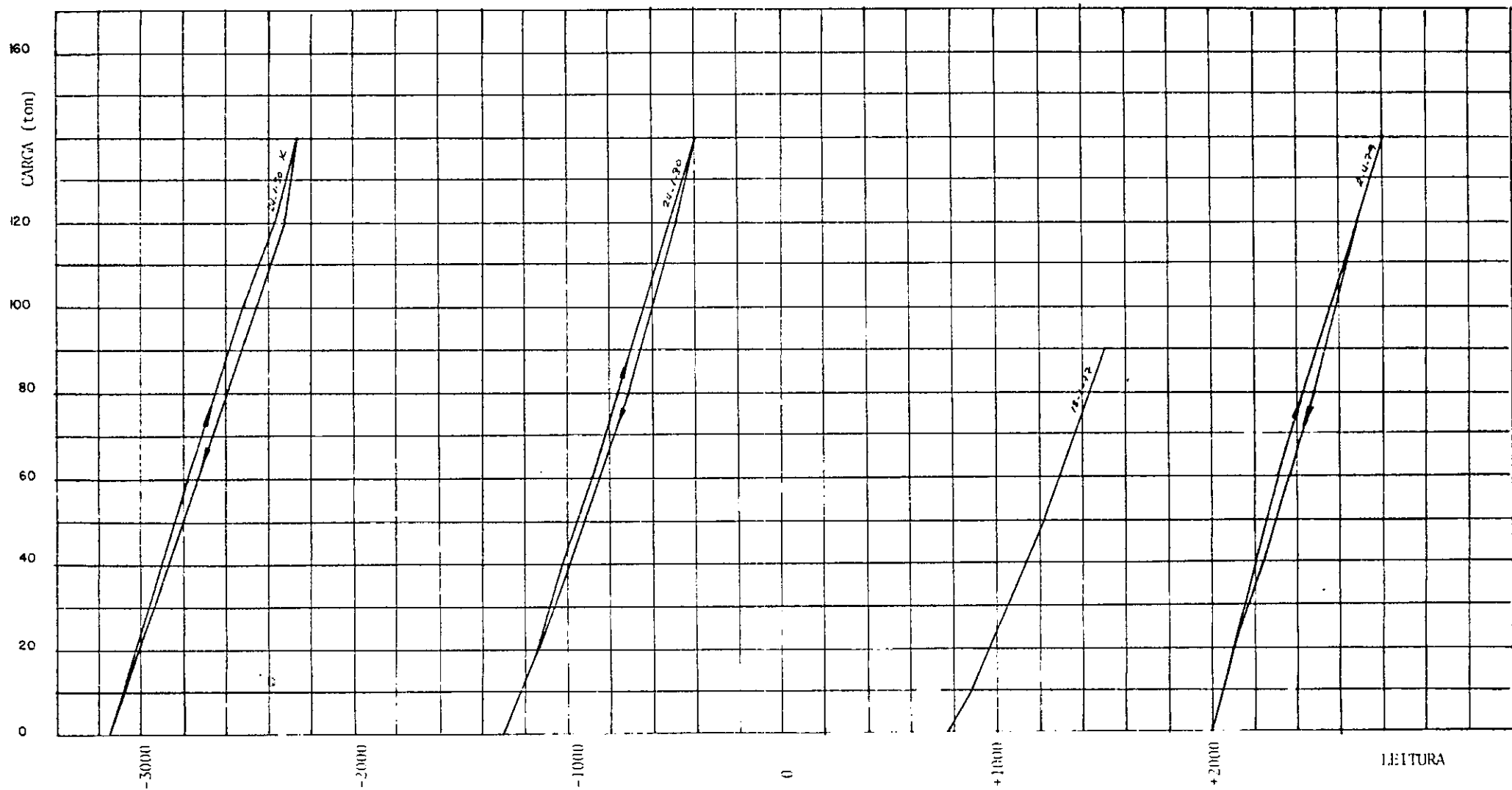
CELULA DE CARGA N° 60-5



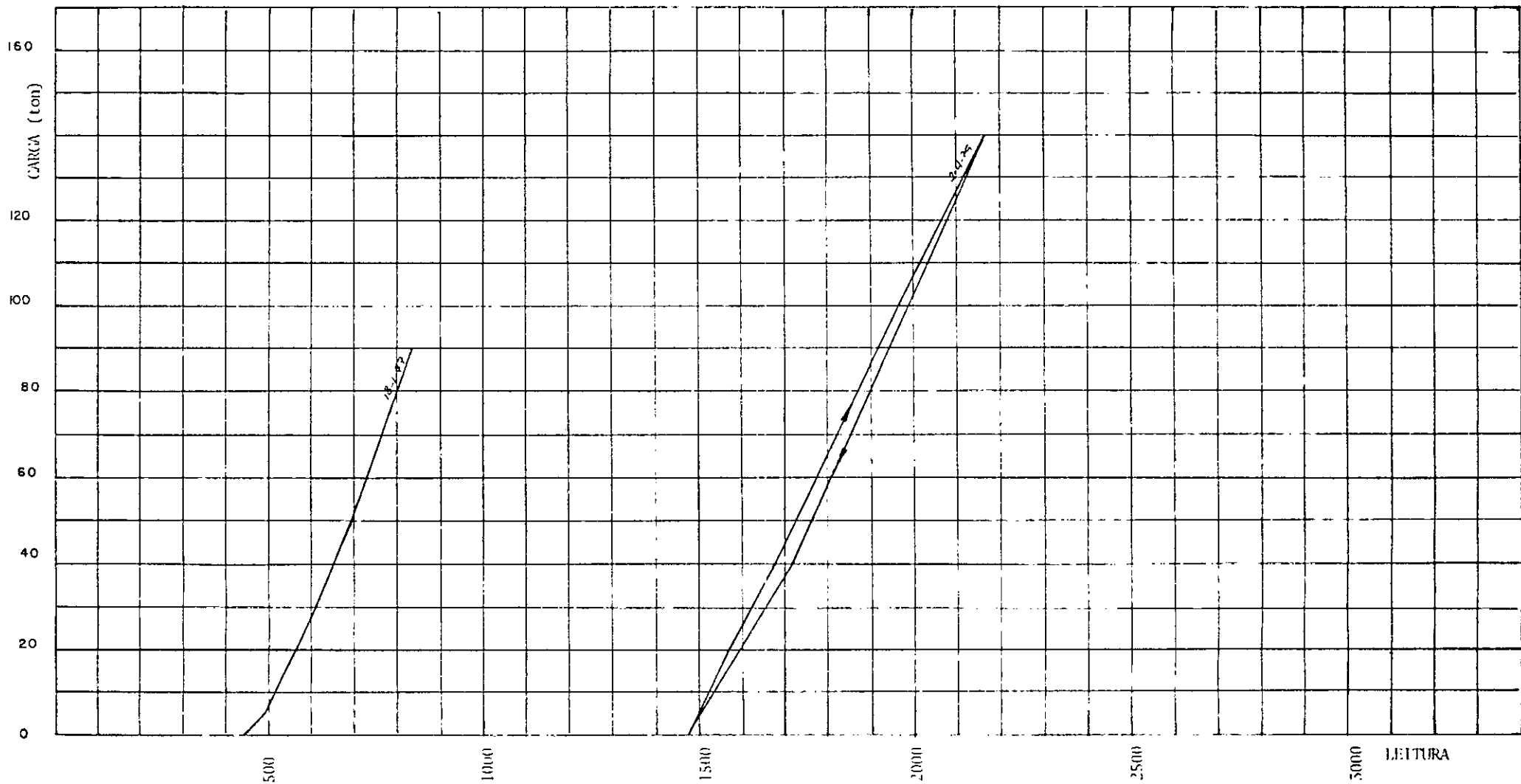
CELULA DE CARGA Nº 150-1



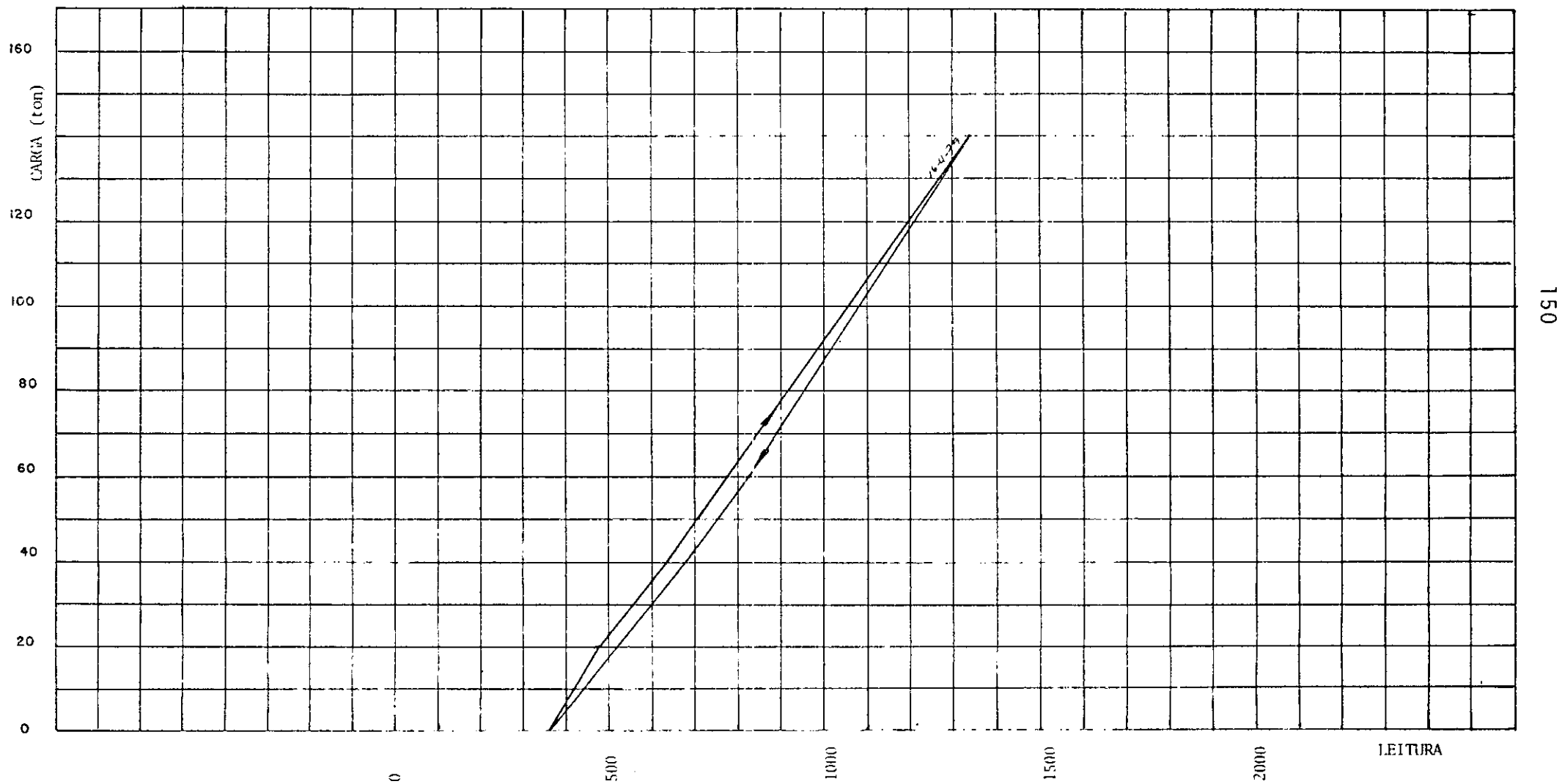
CELULA DE CARGA Nº 150-2



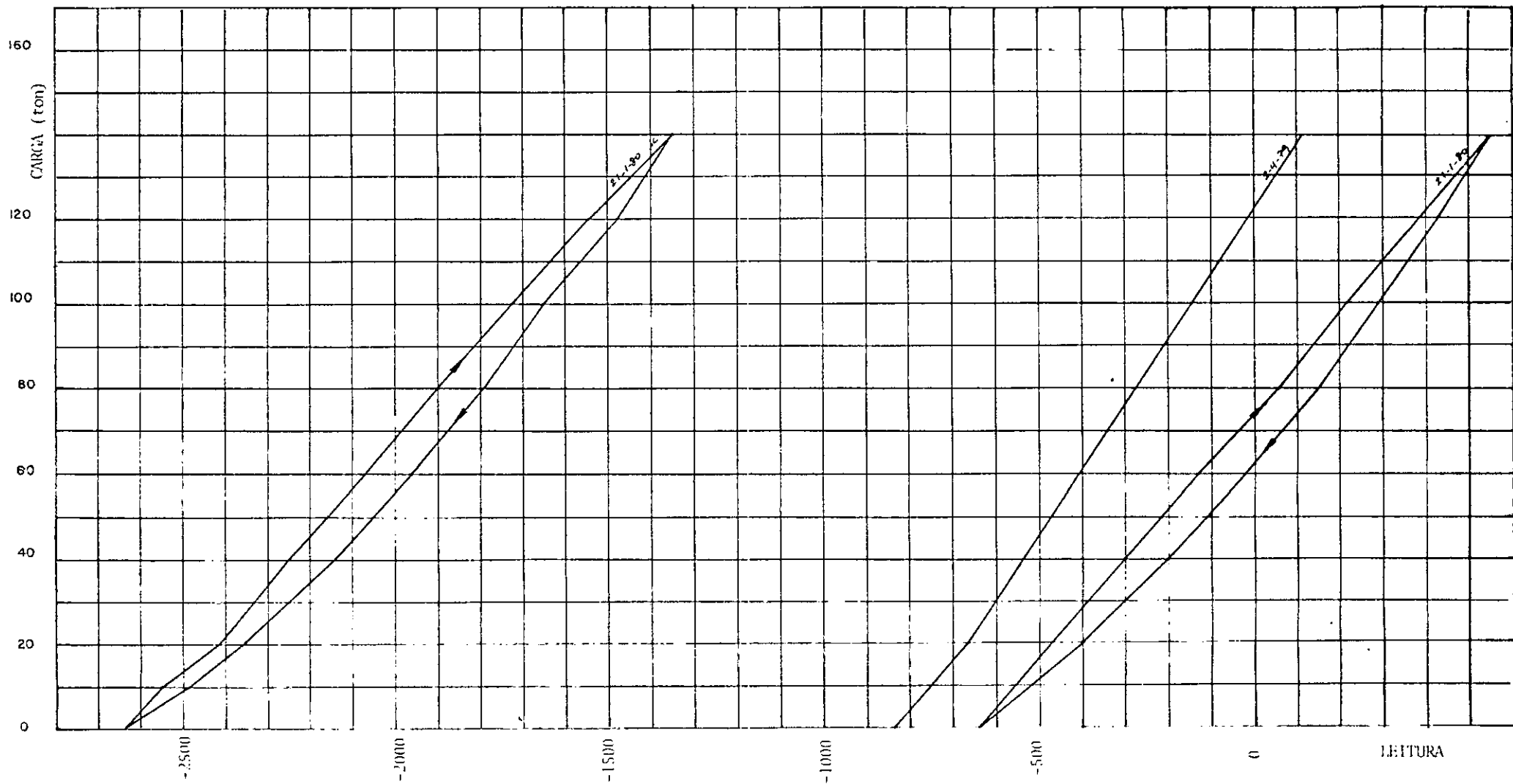
CELULA DE CARGA Nº 150-3



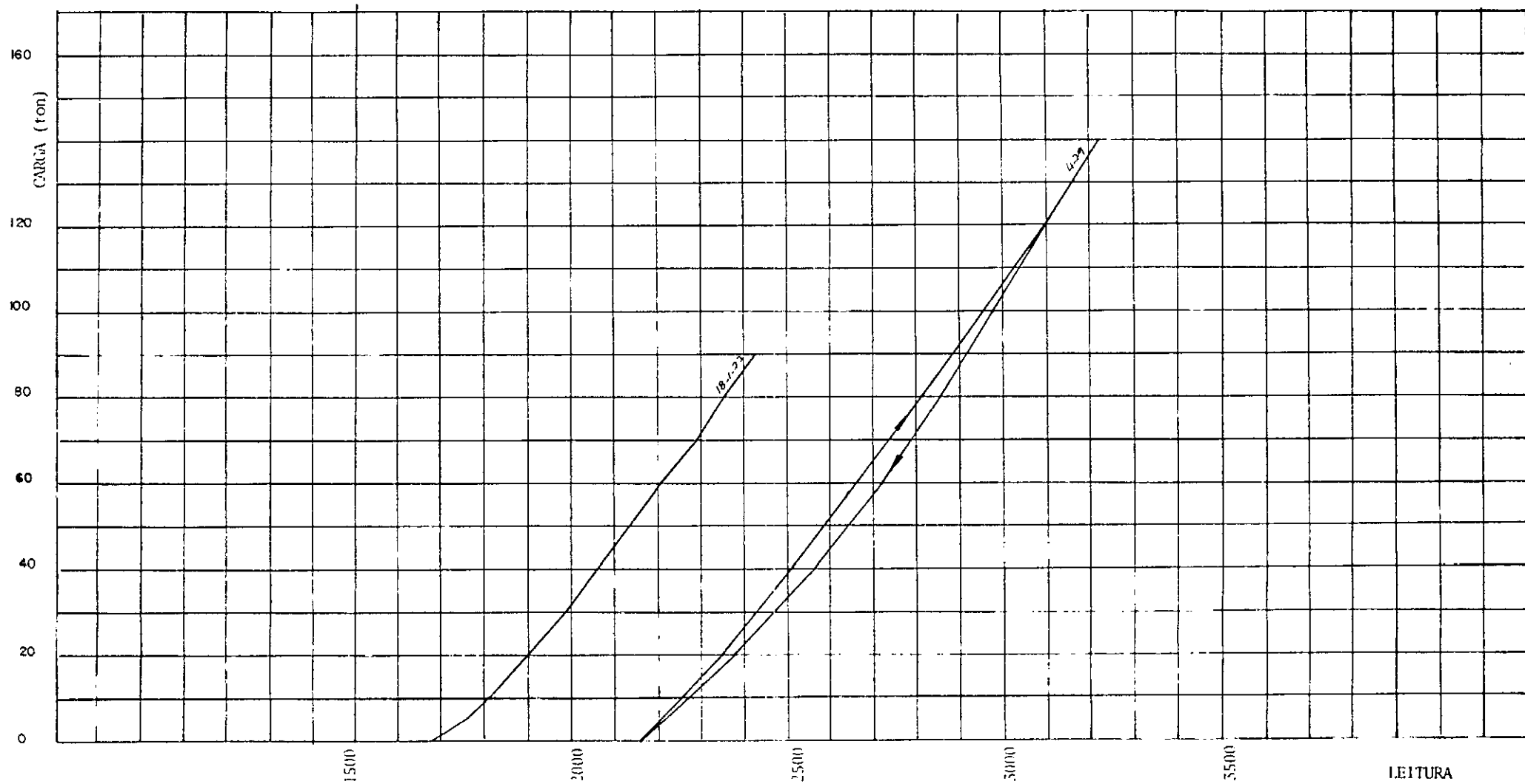
CELULA DE CARGA Nº 150-3B



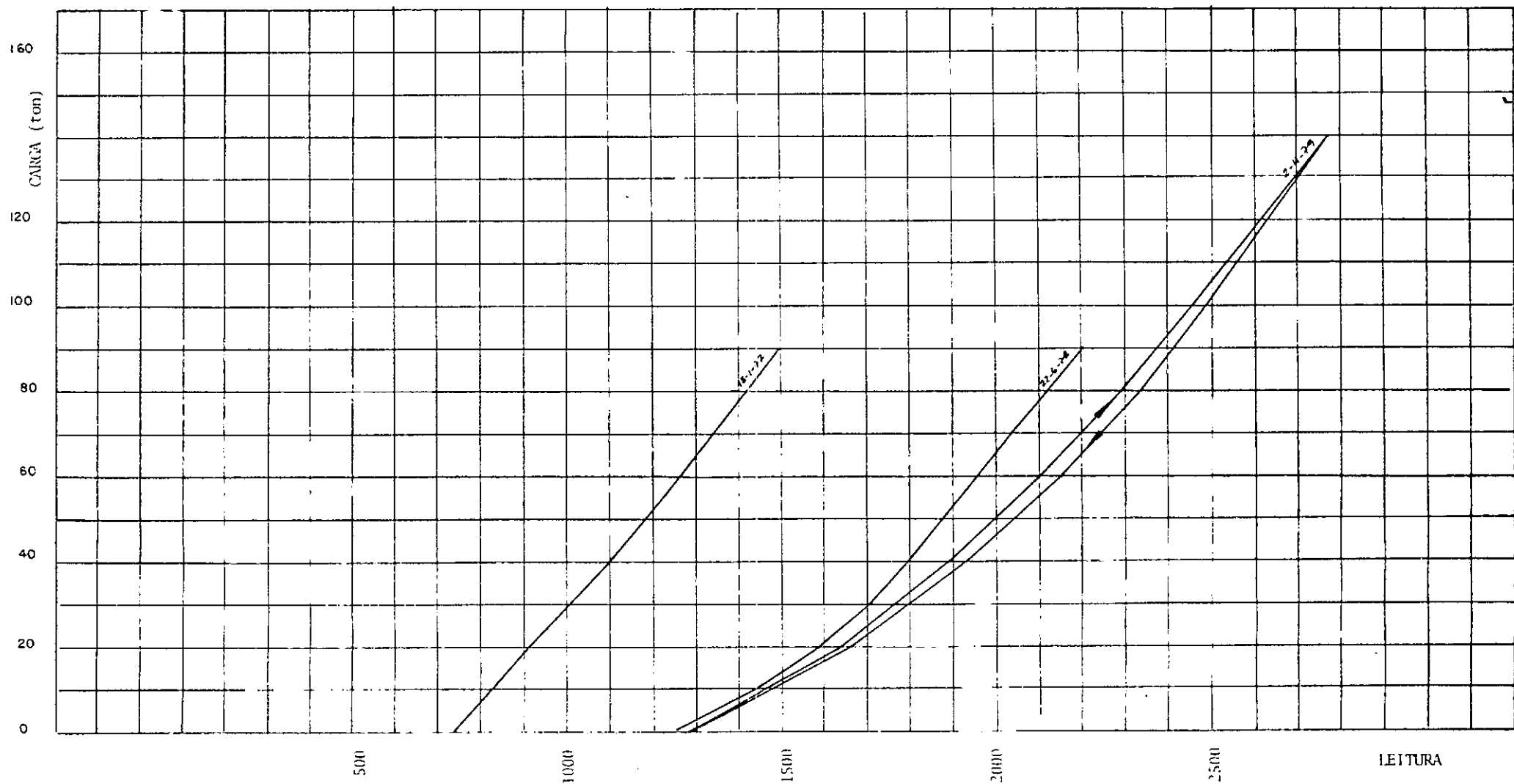
CELULA DE CARGA N° 150-4



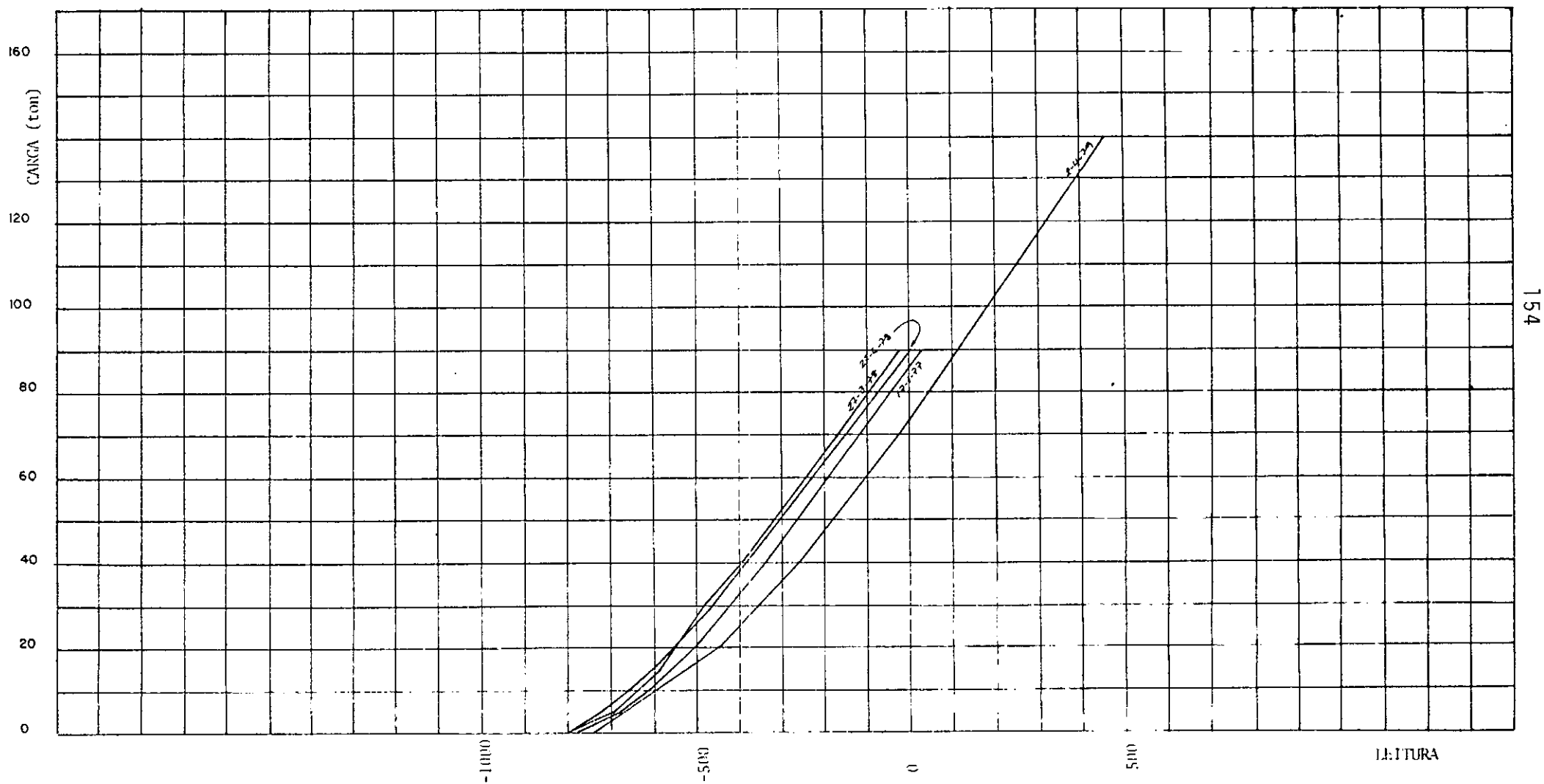
CELULA DE CARGA N° 150-4B



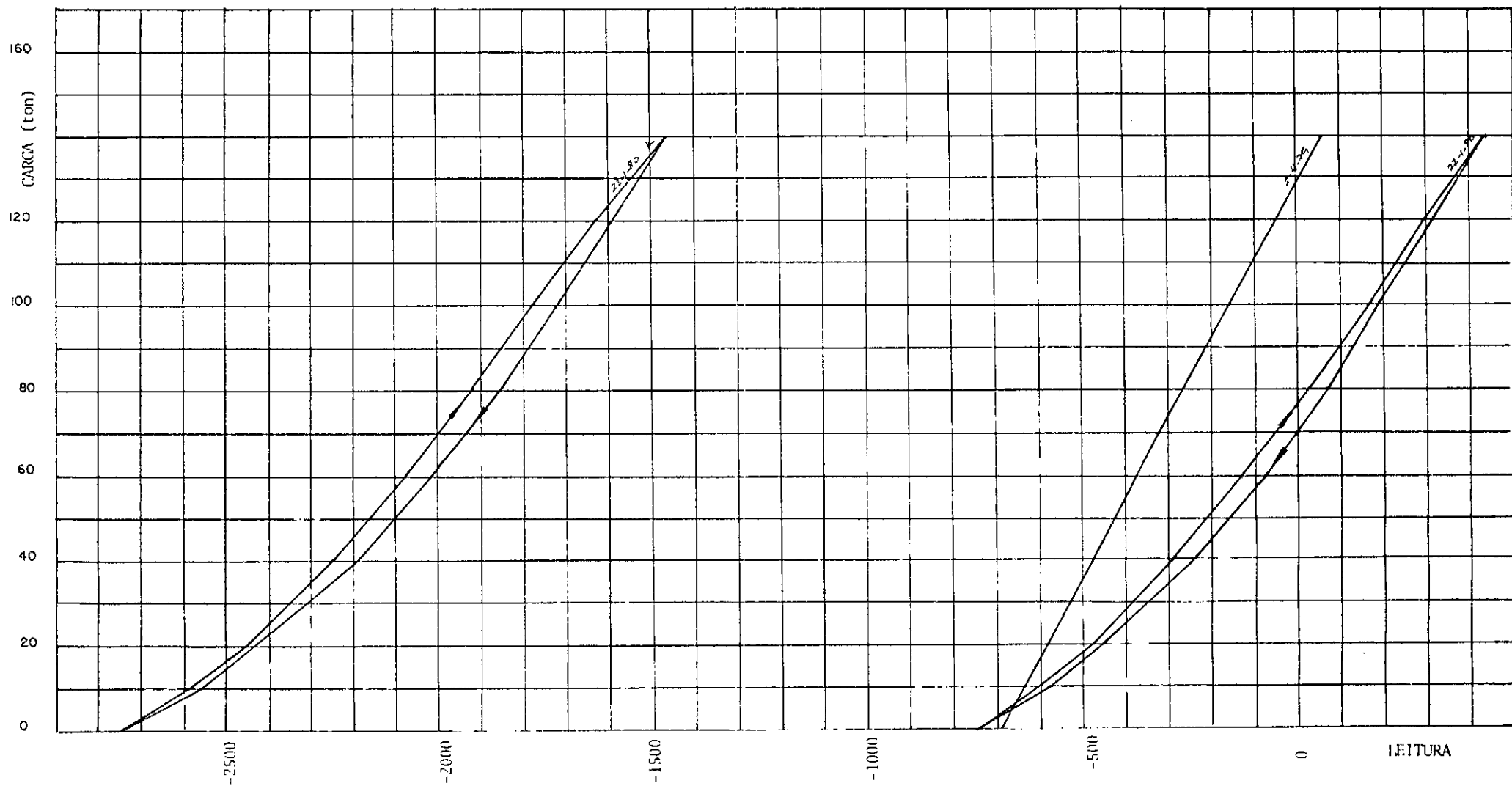
CELULA DE CARGA N° 150-5



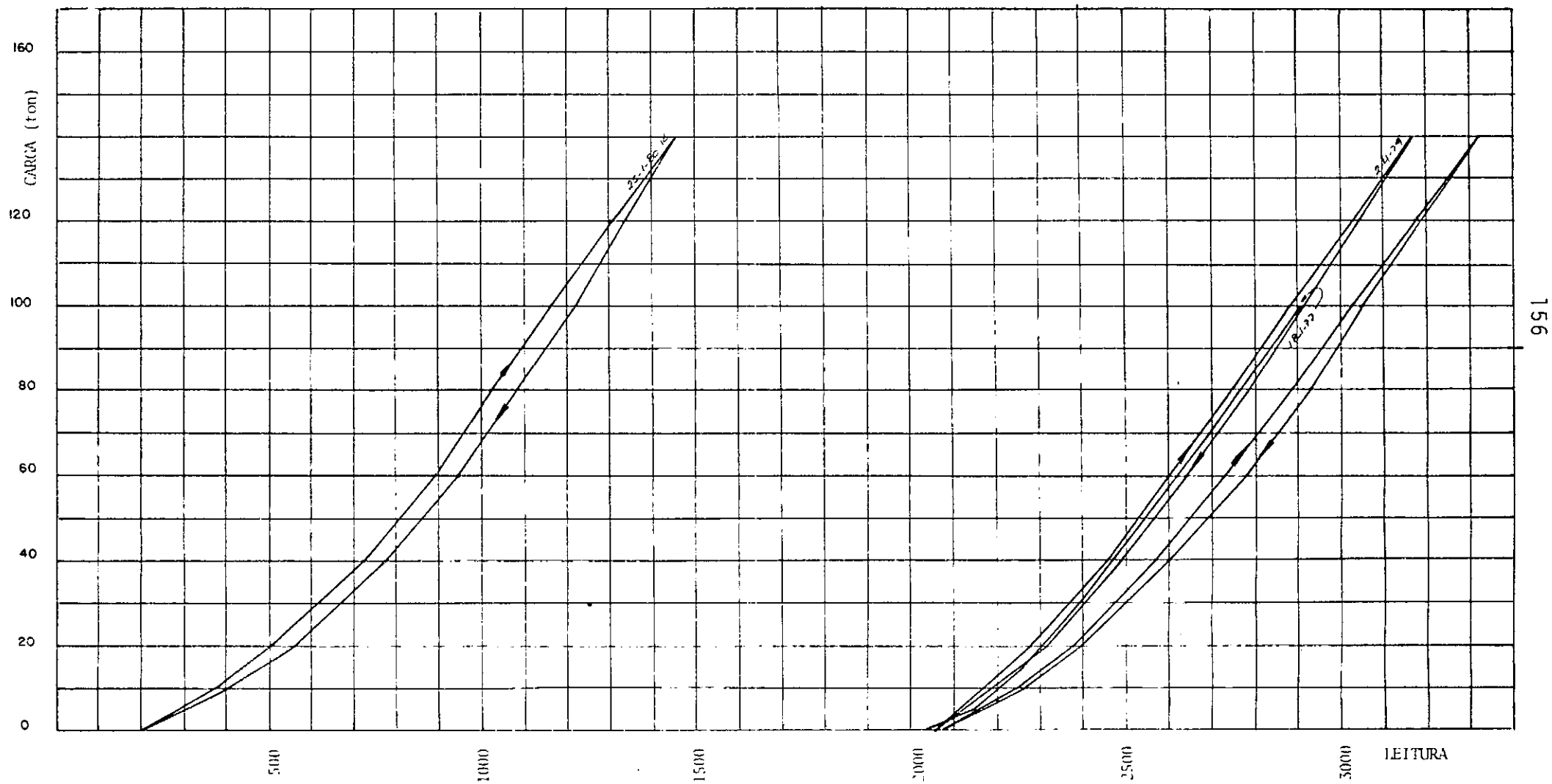
CELULA DE CARGA Nº 150-6



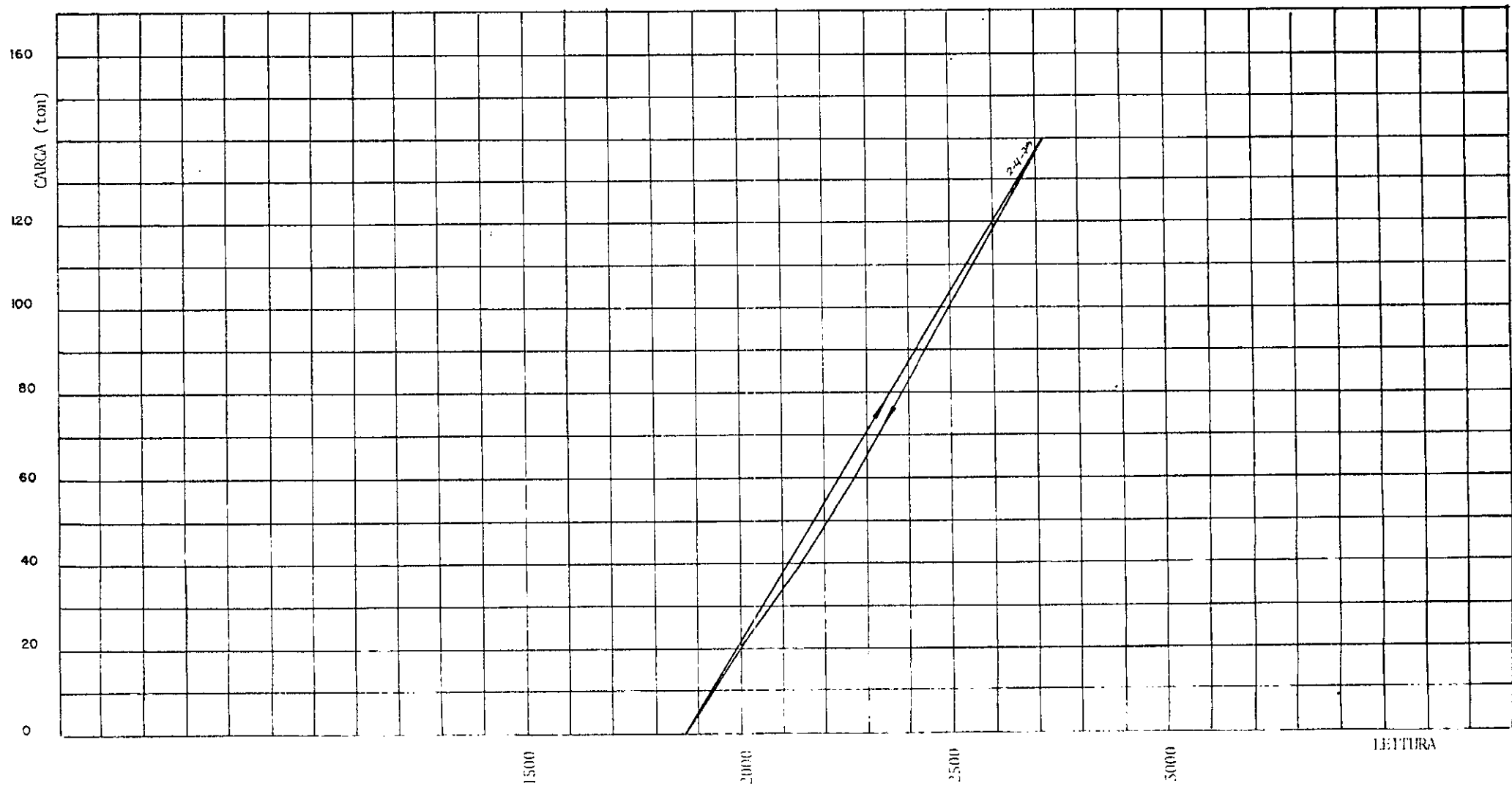
CELULA DE CARGA Nº 150-6B



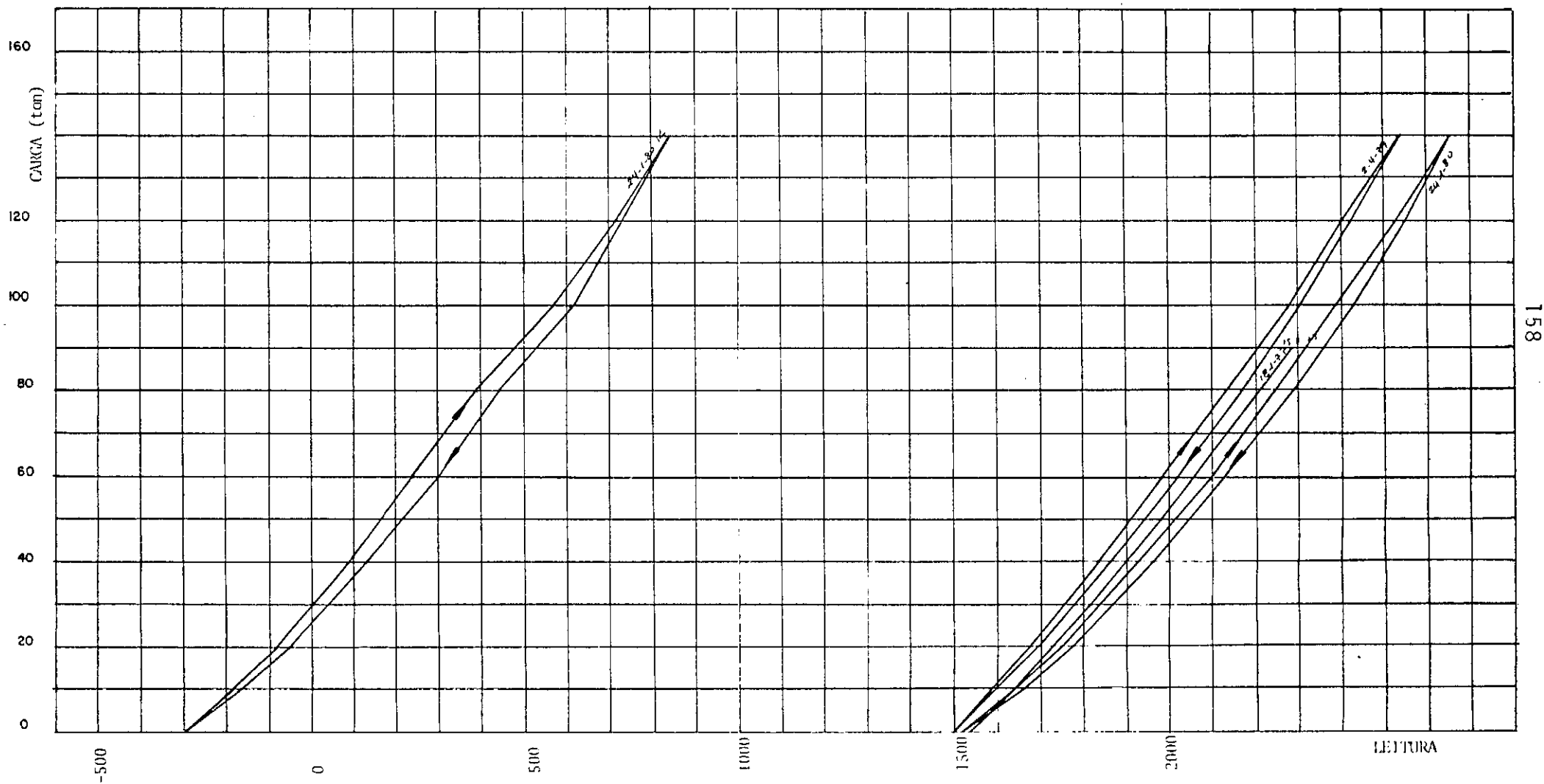
CELULA DE CARGA Nº 150-7



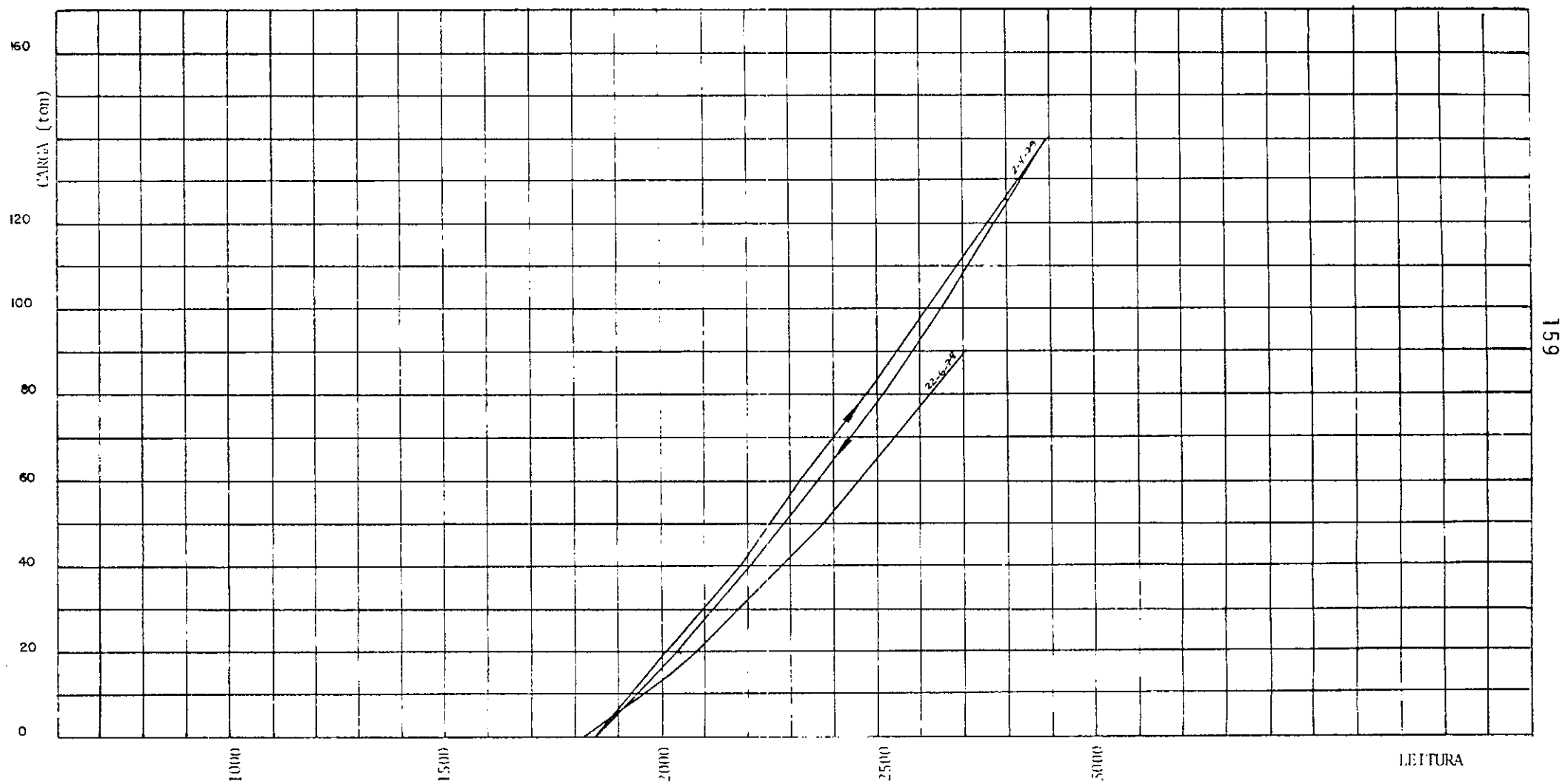
CELULA DE CARGA N° 150-7B



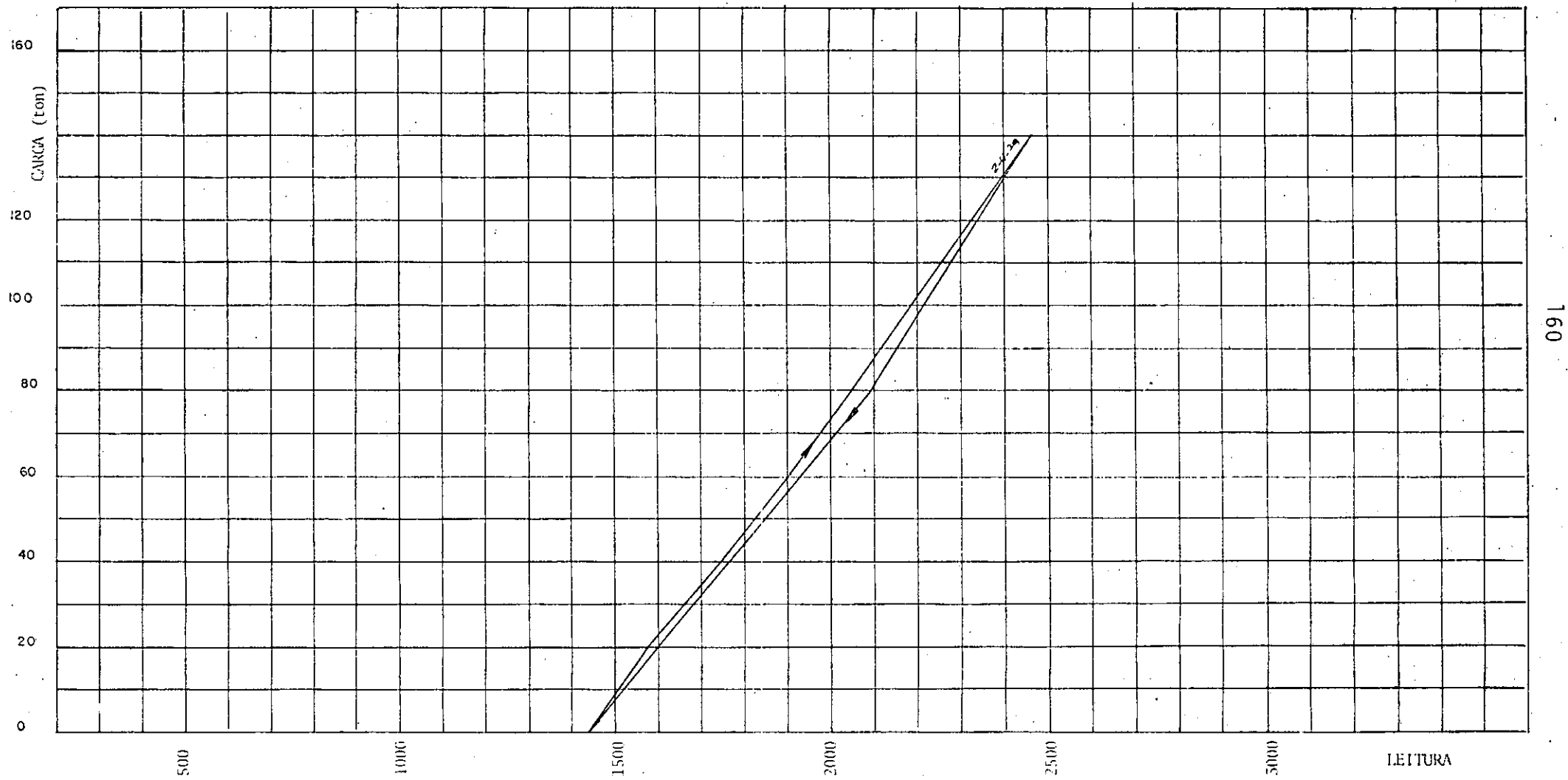
CELULA DE CARGA N° 150-8



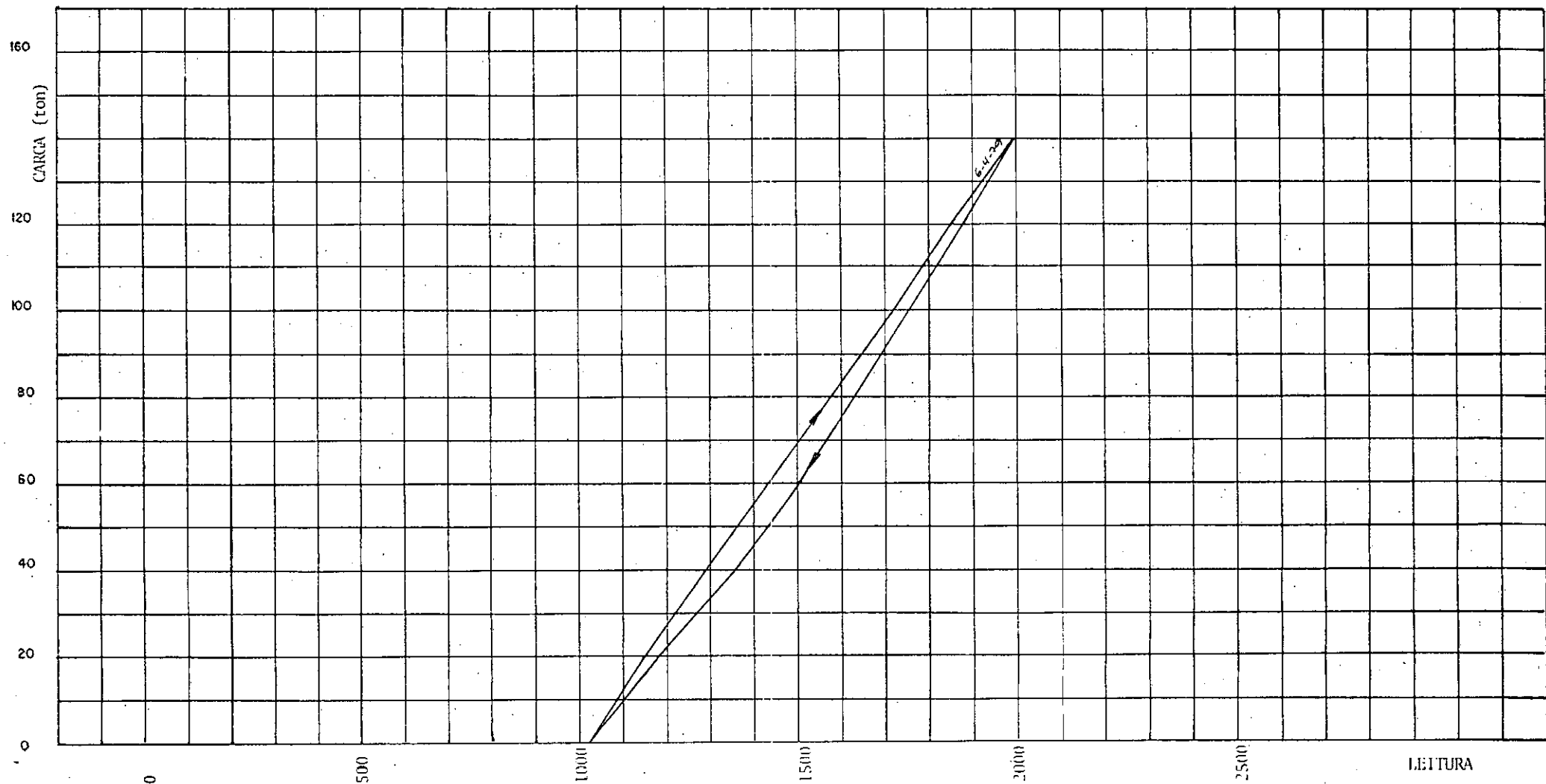
CELULA DE CARGA Nº 150-8B



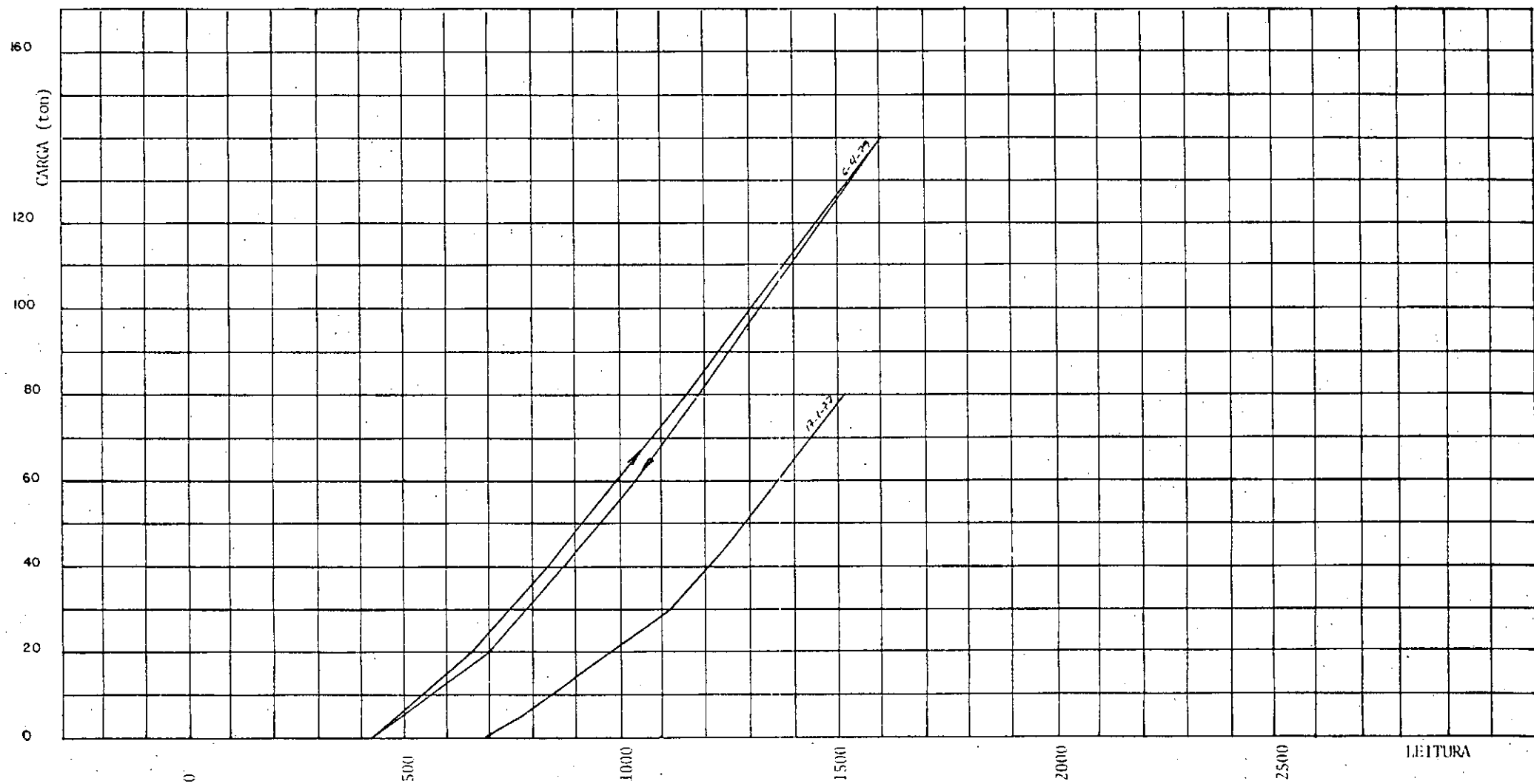
CELULA DE CARGA Nº 150-9



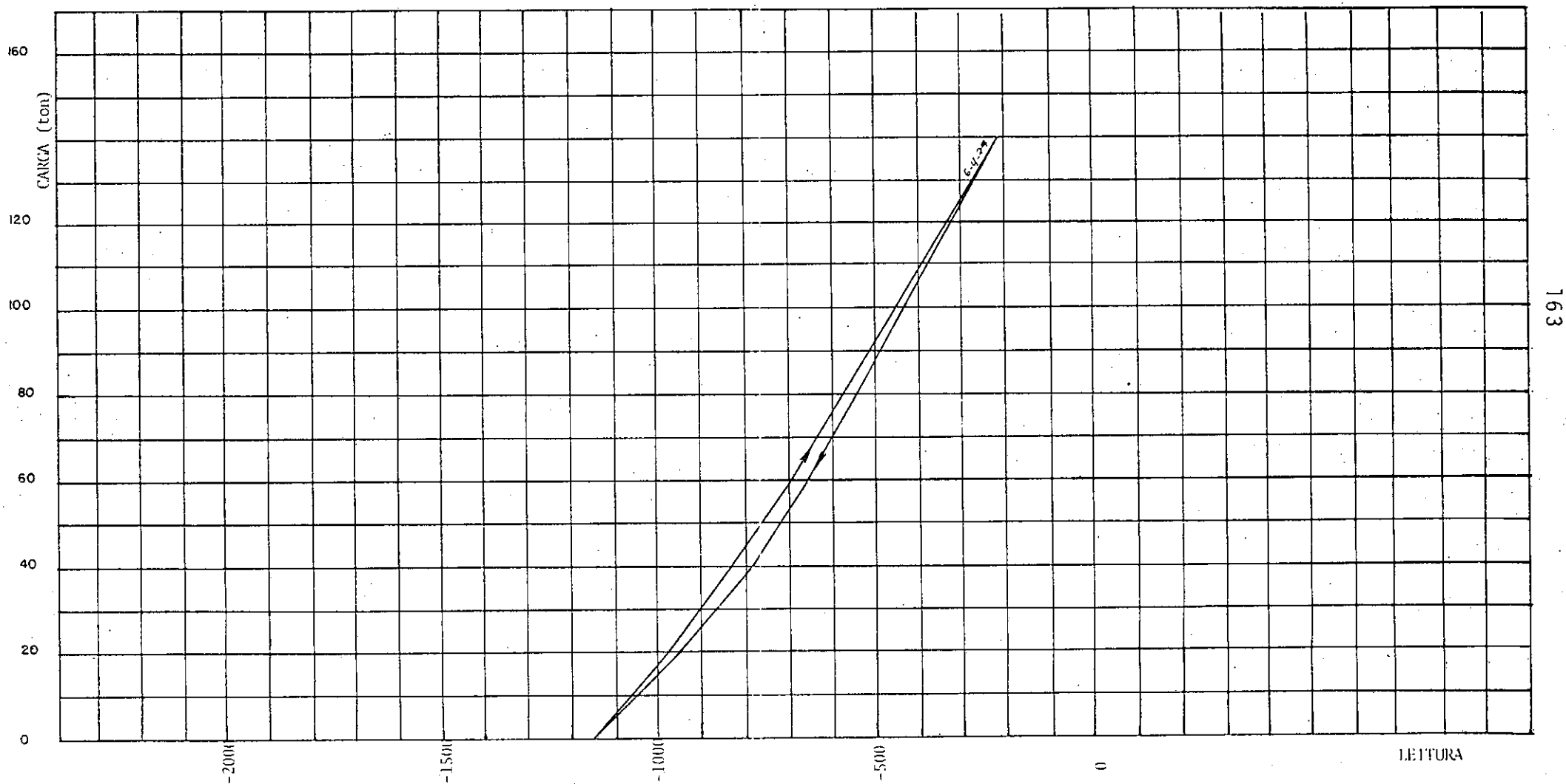
CELULA DE CARGA Nº 150-9B



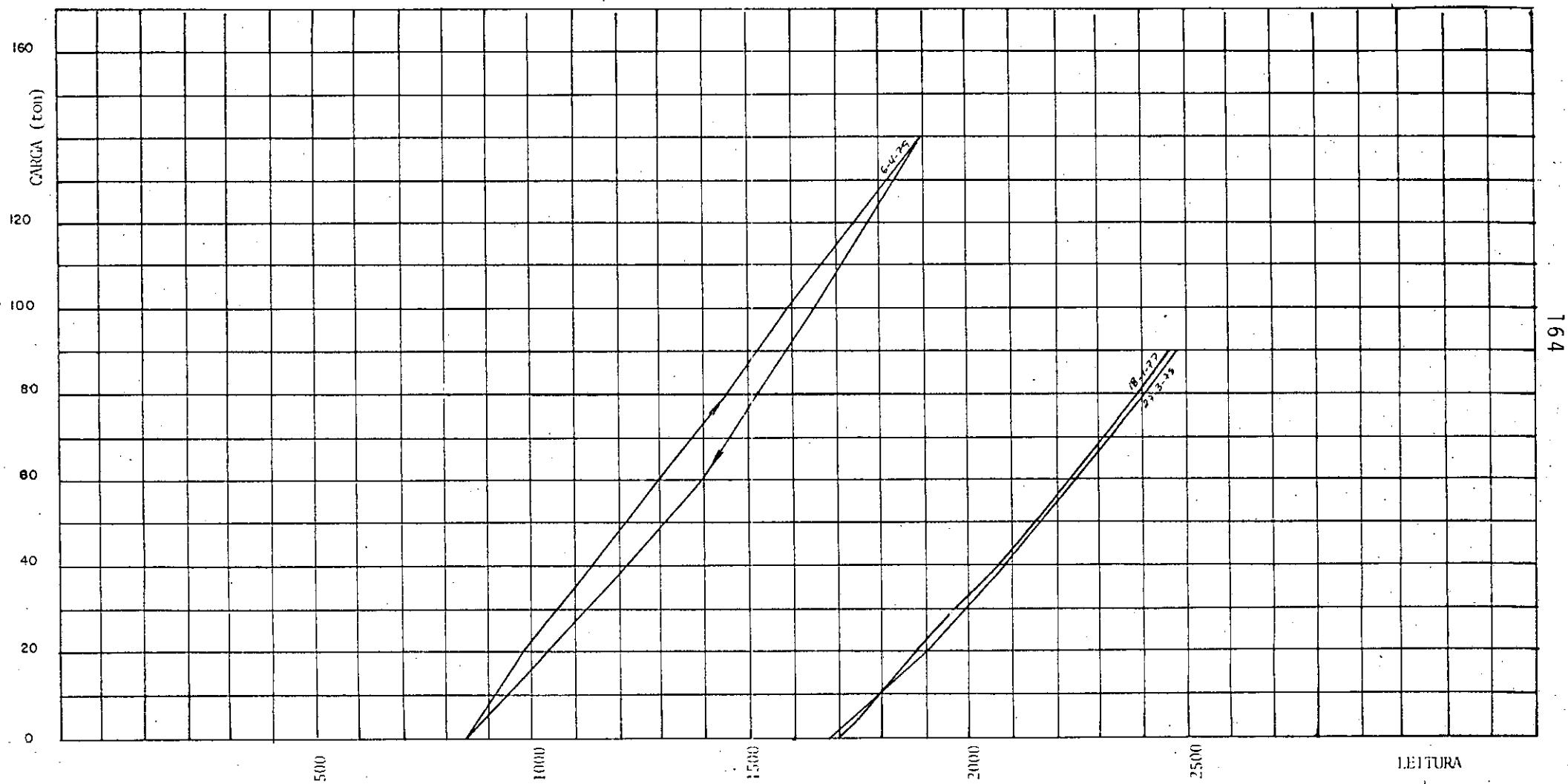
CELULA DE CARGA Nº 150-10



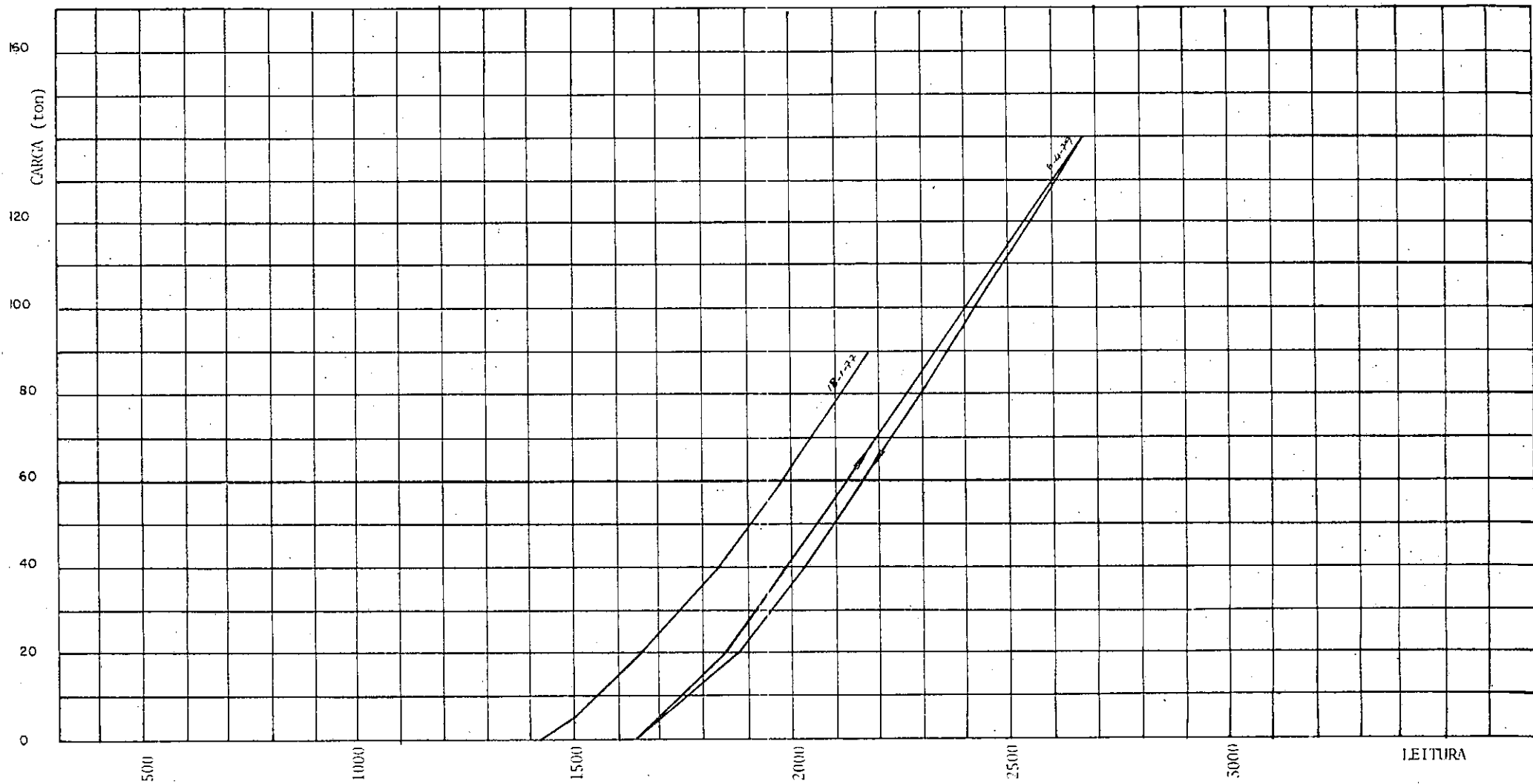
CELULA DE CARGA Nº 150-10B



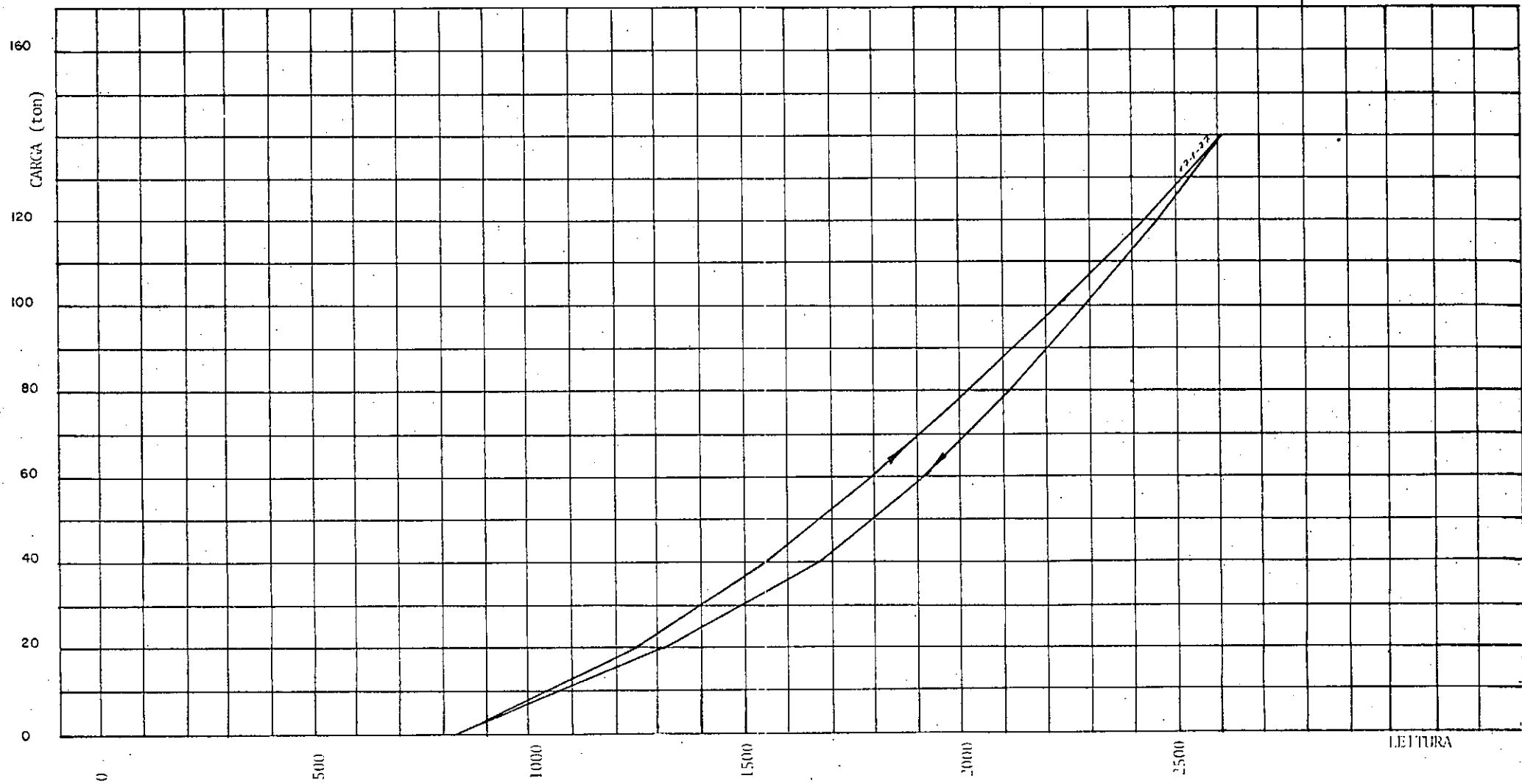
CELULA DE CARGA Nº 150-II



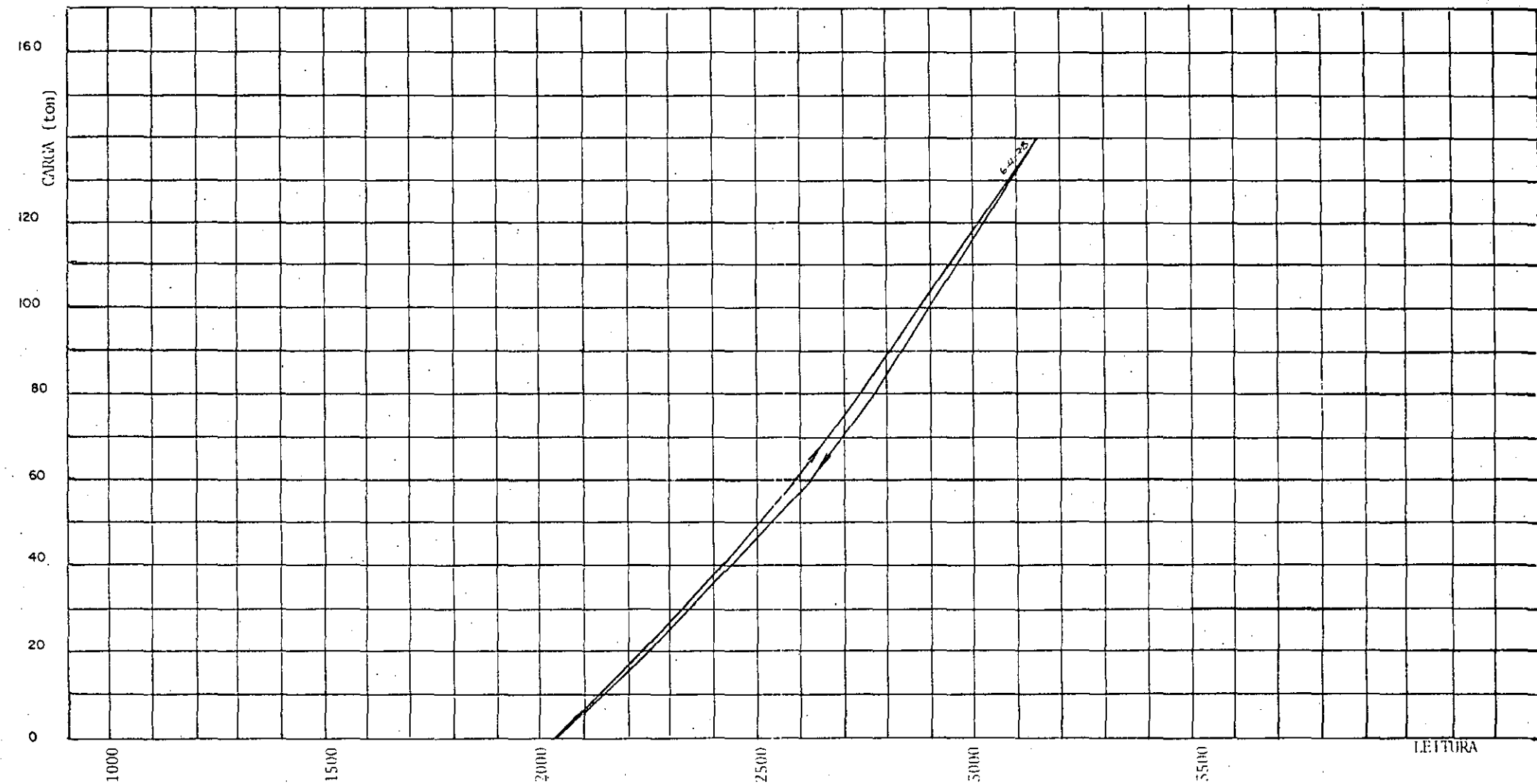
CELULA DE CARGA N° 150-12



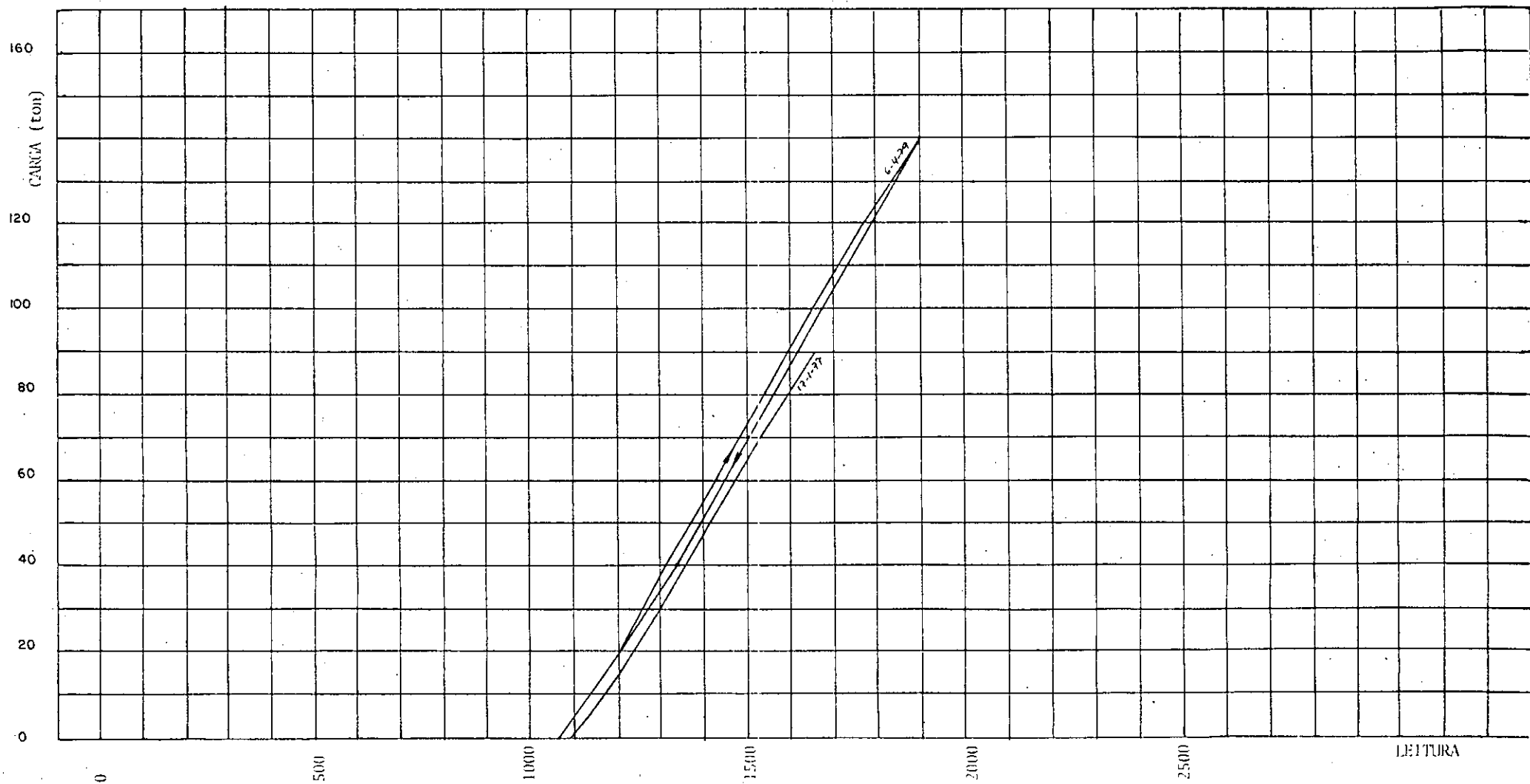
CELULA DE CARGA Nº 150-12-1



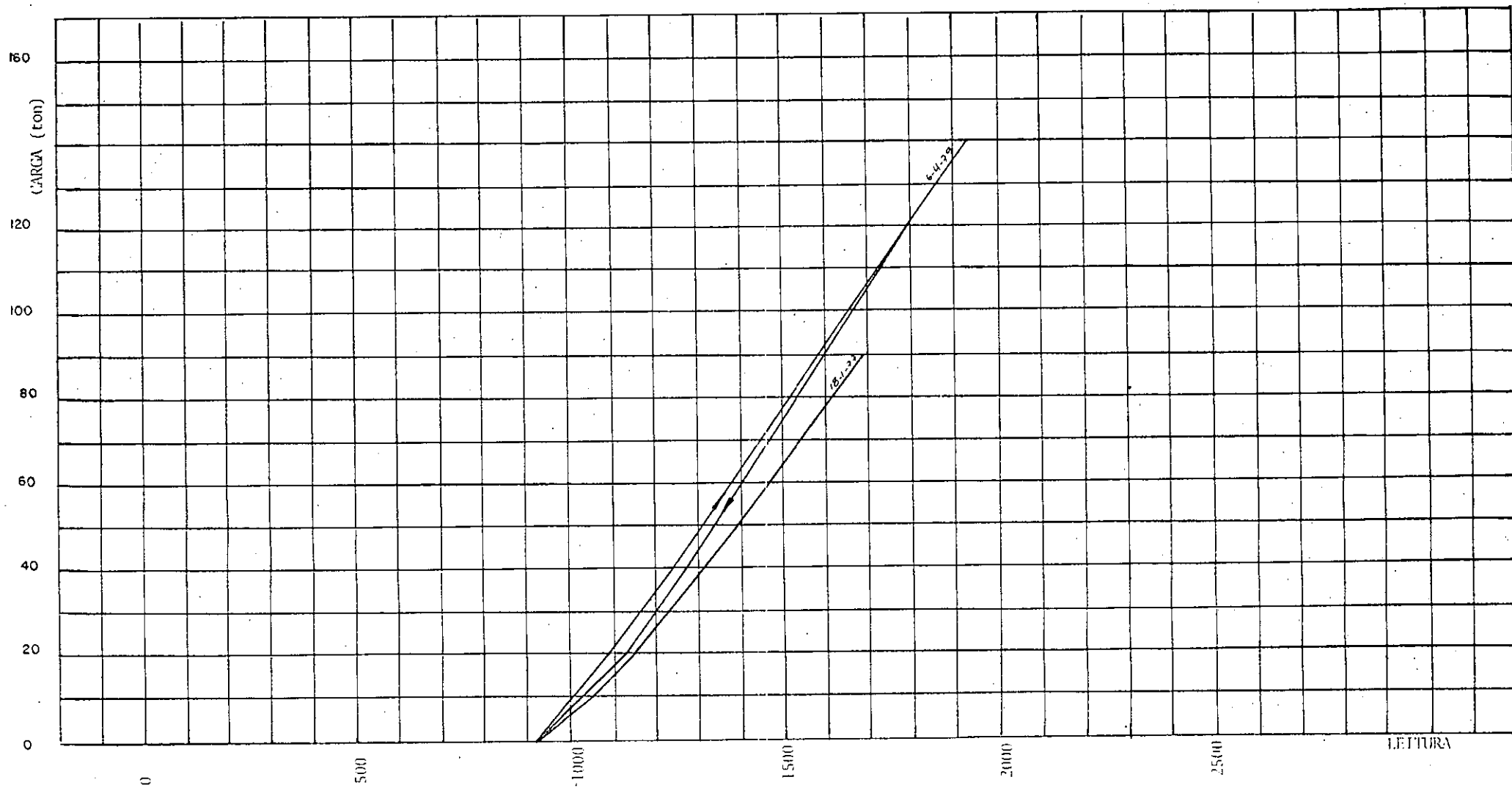
CELULA DE CARGA N° 150-13



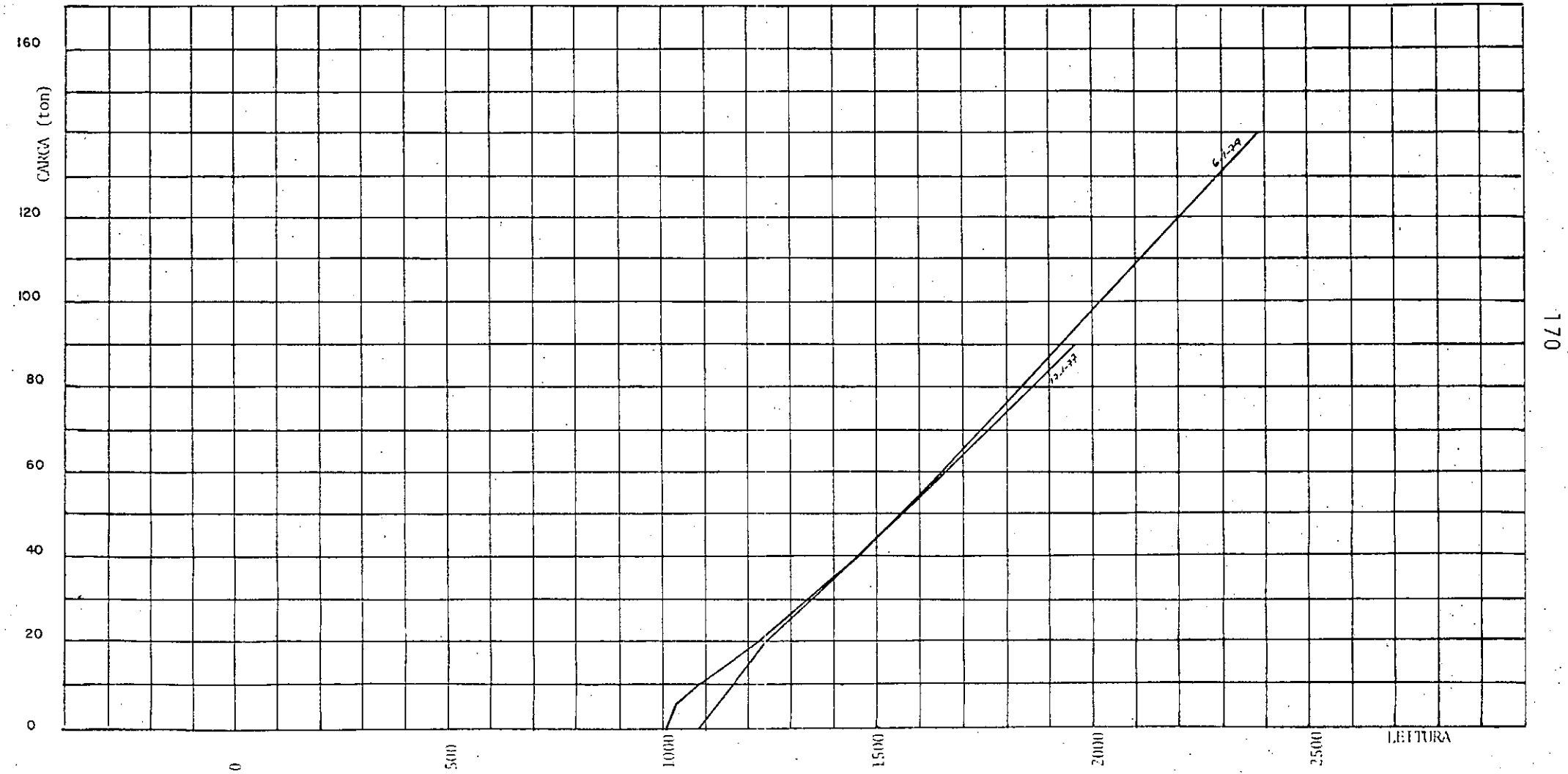
CELULA DE CARGA Nº 150-13B



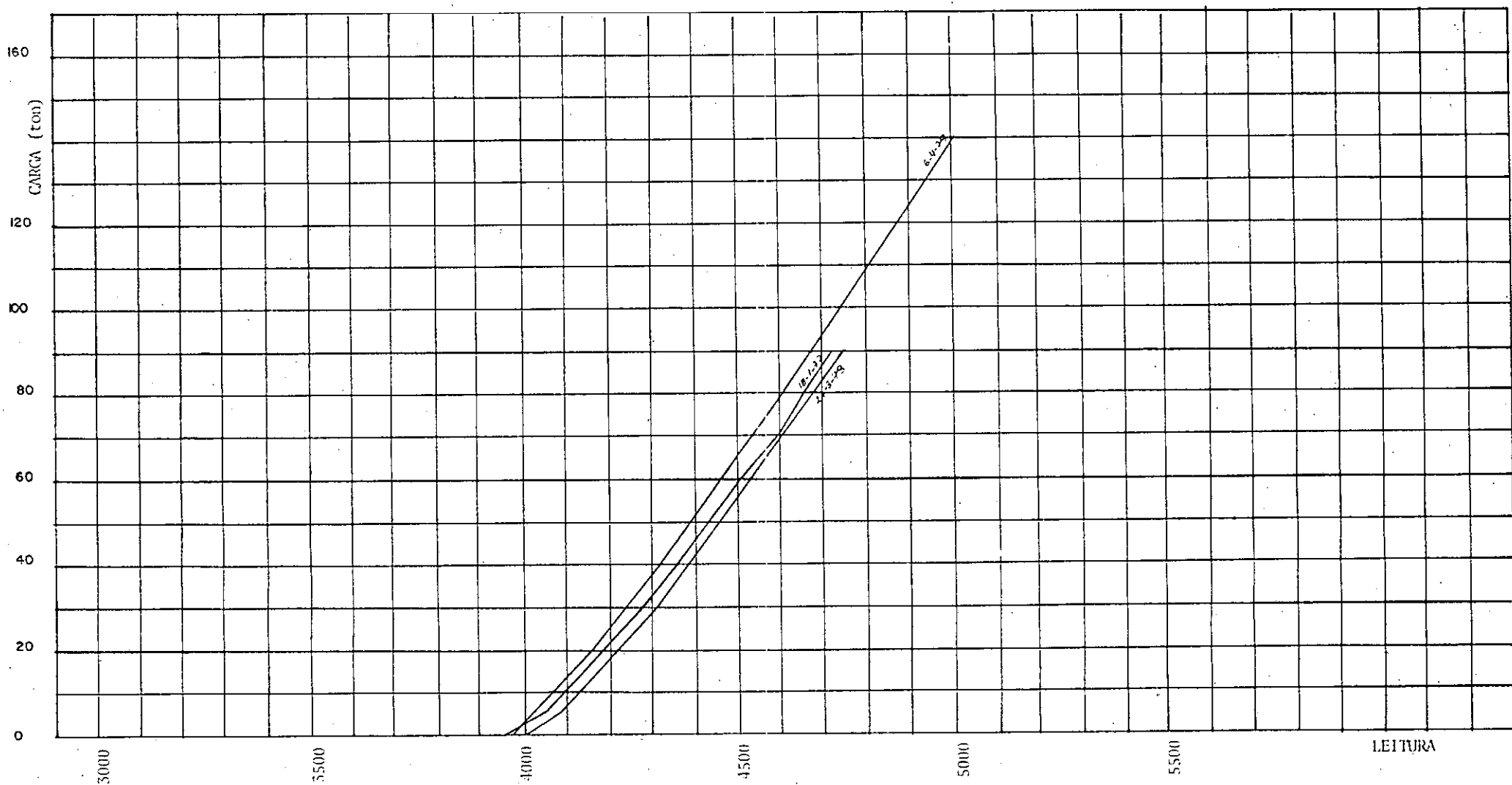
CELULA DE CARGA N° 150-14



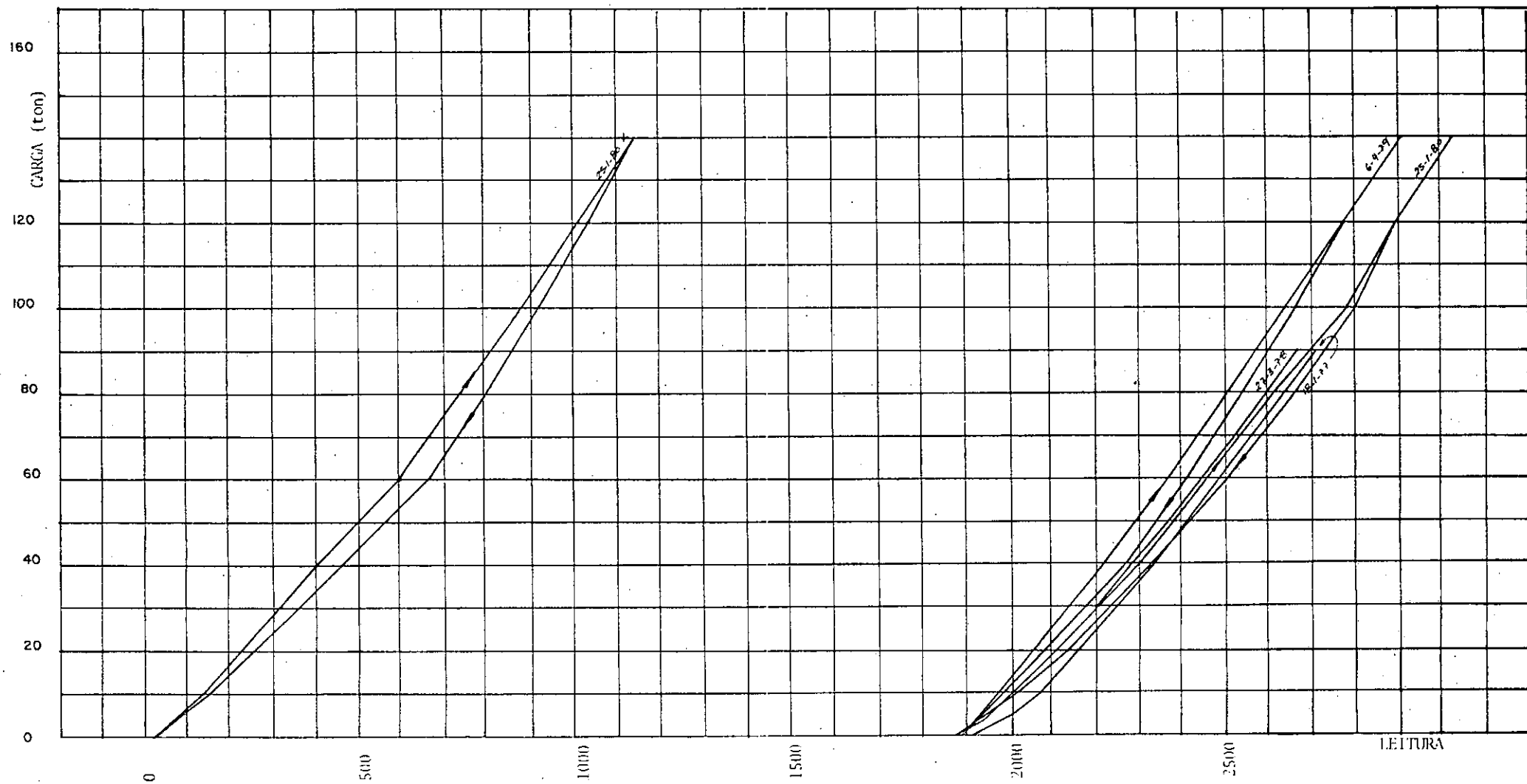
CELULA DE CARGA N° 150-14-1



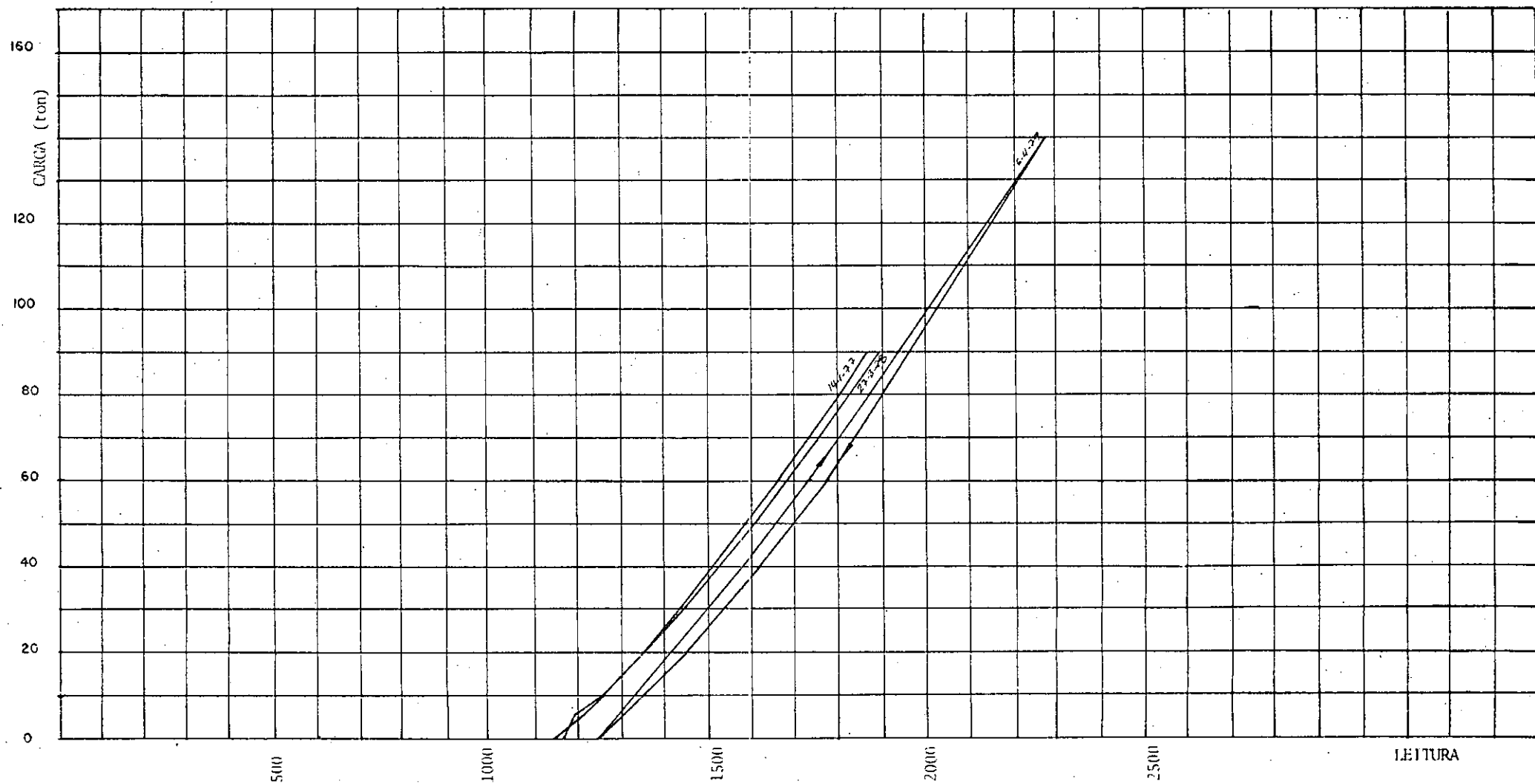
CELULA DE CARGA N° 150-15



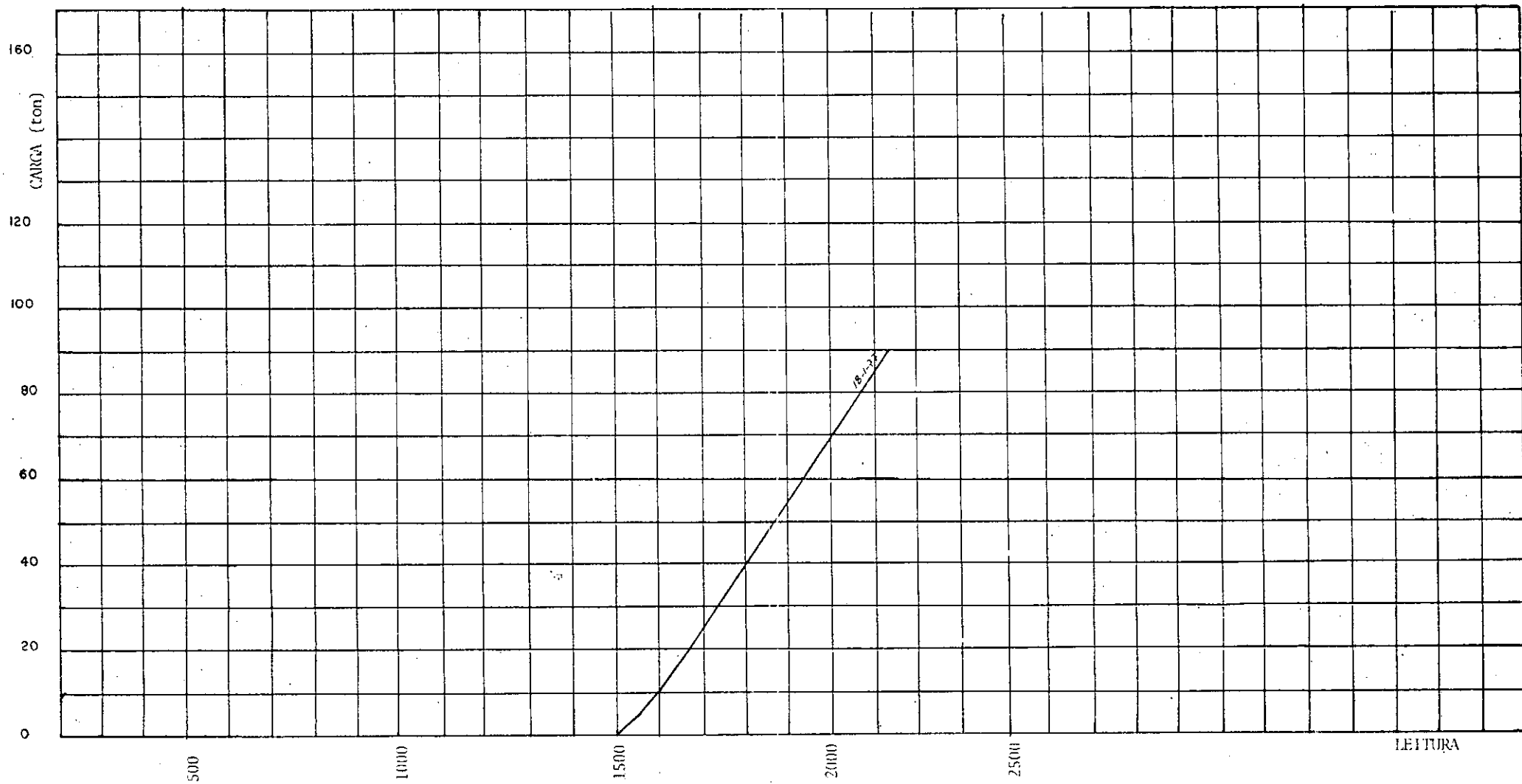
CELULA DE CARGA Nº 150-16



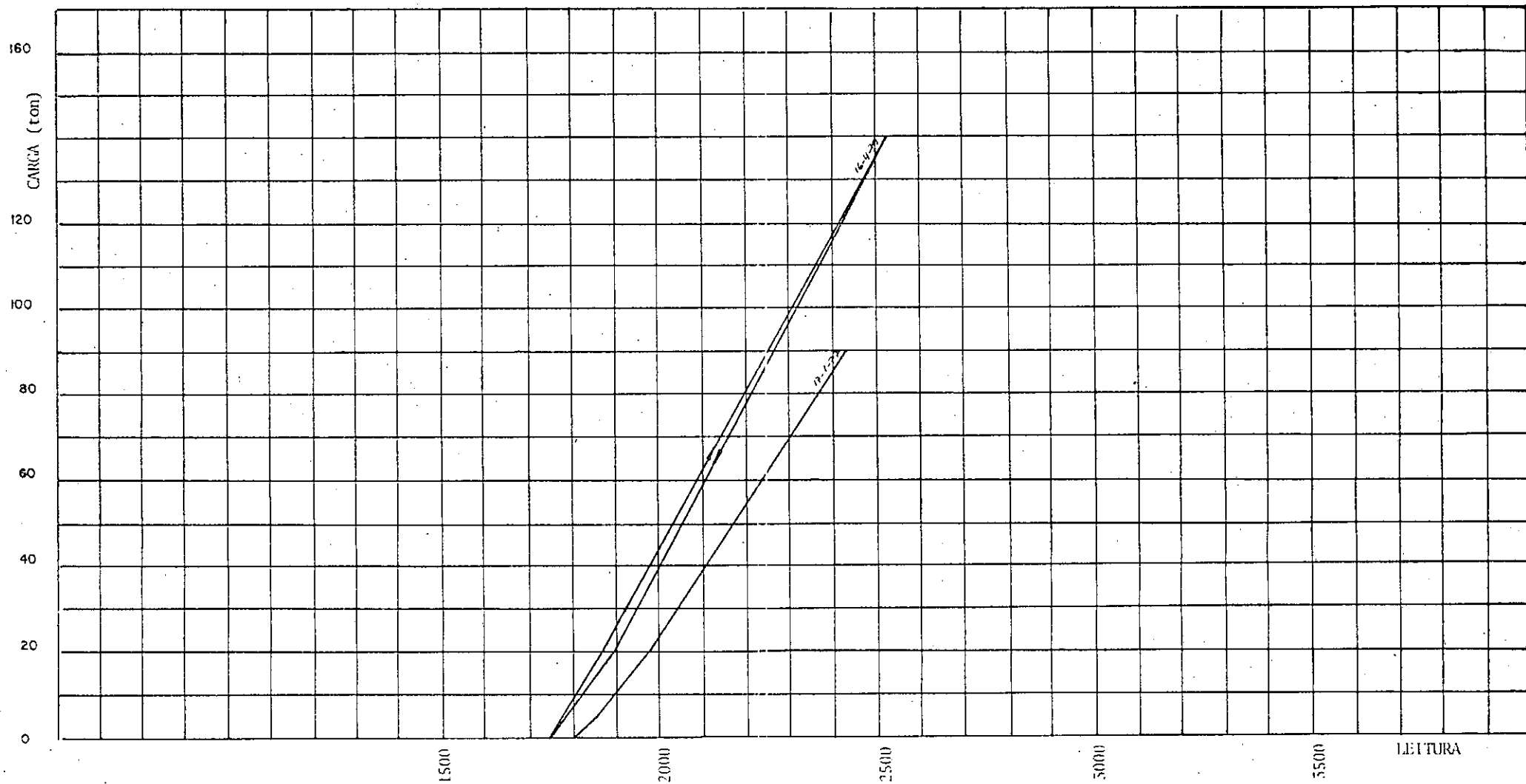
CELULA DE CARGA Nº 150-17



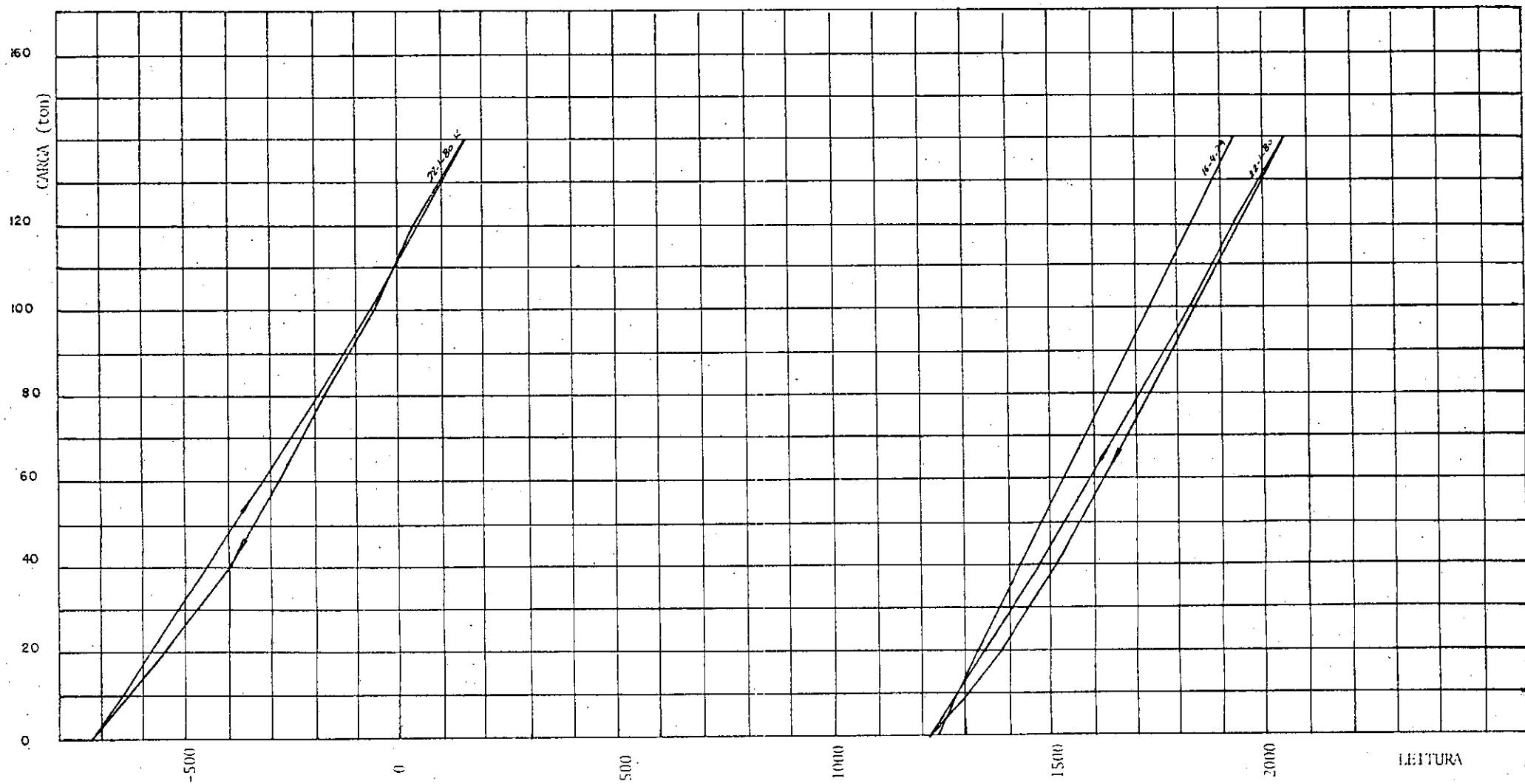
CELULA DE CARGA N° 150-19



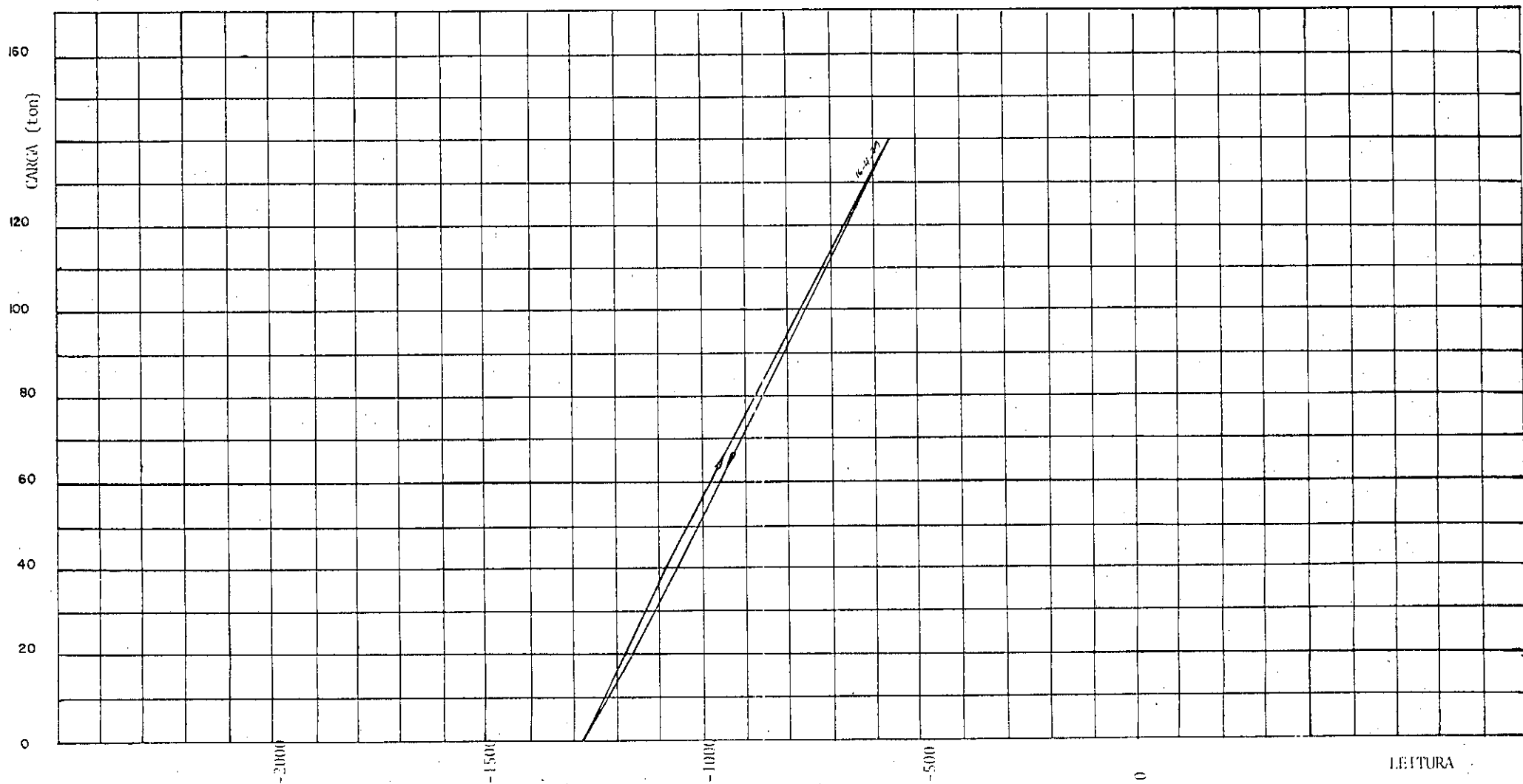
CELULA DE CARGA Nº 150-20



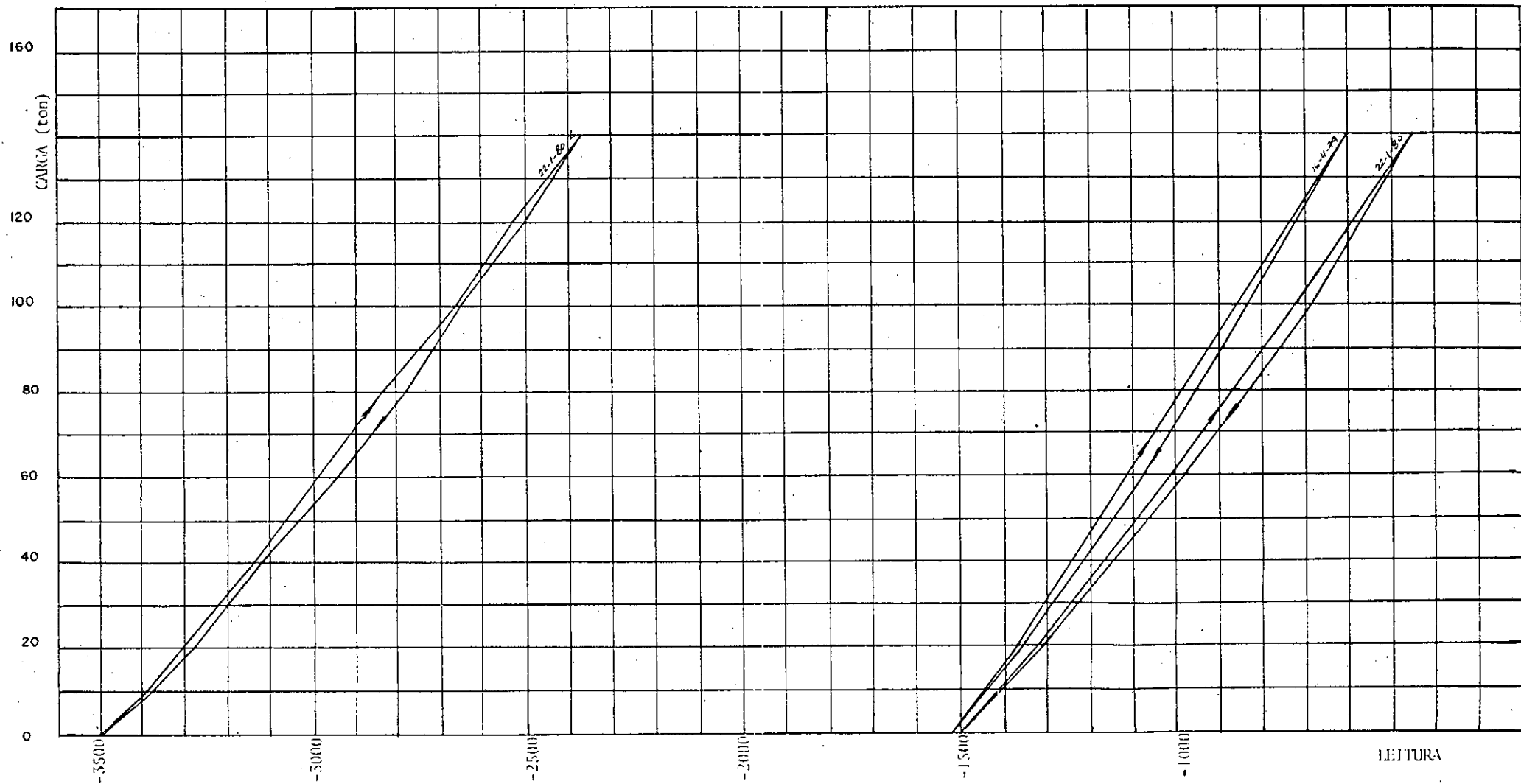
CELULA DE CARGA Nº 150-21



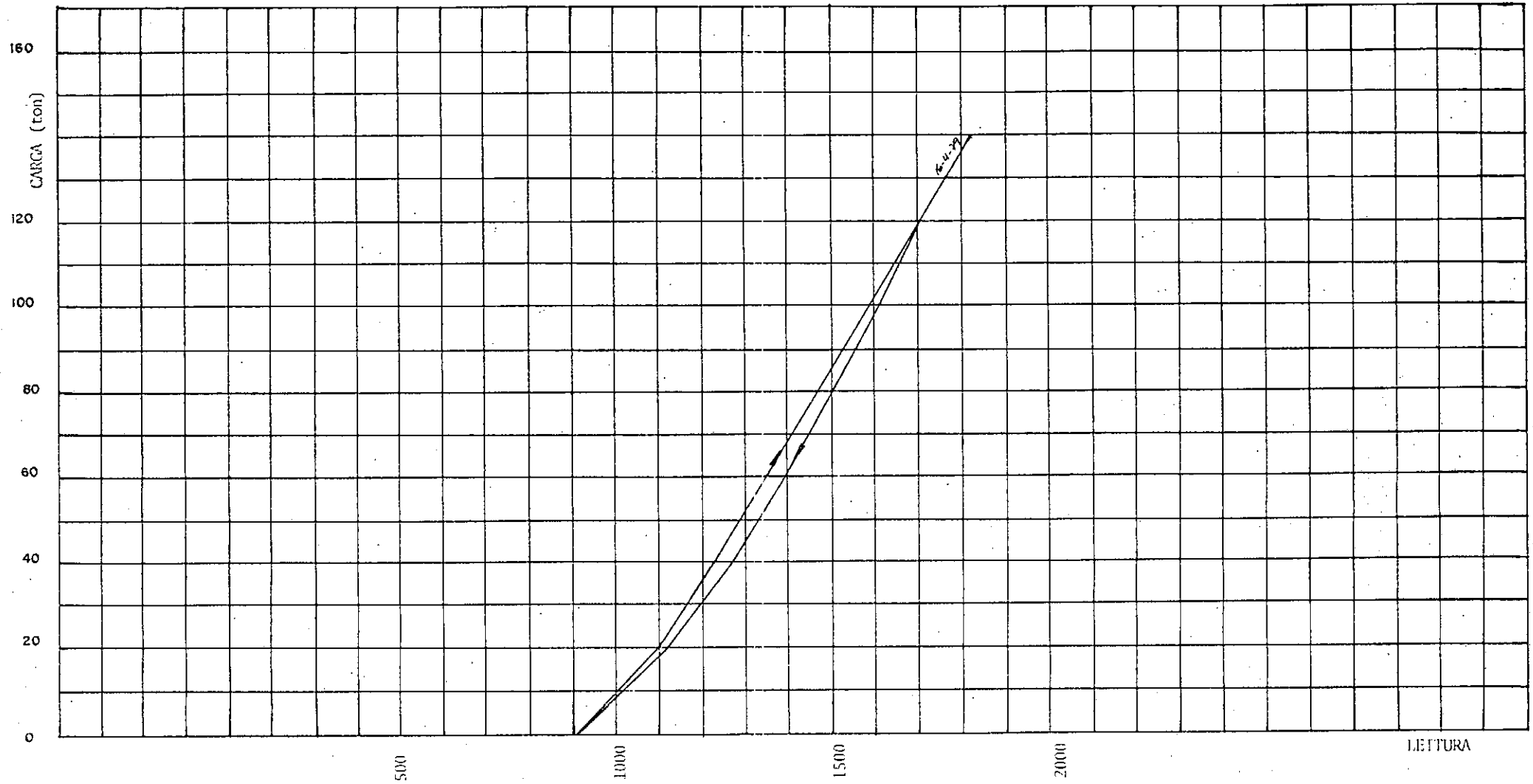
CELULA DE CARGA Nº 150-22



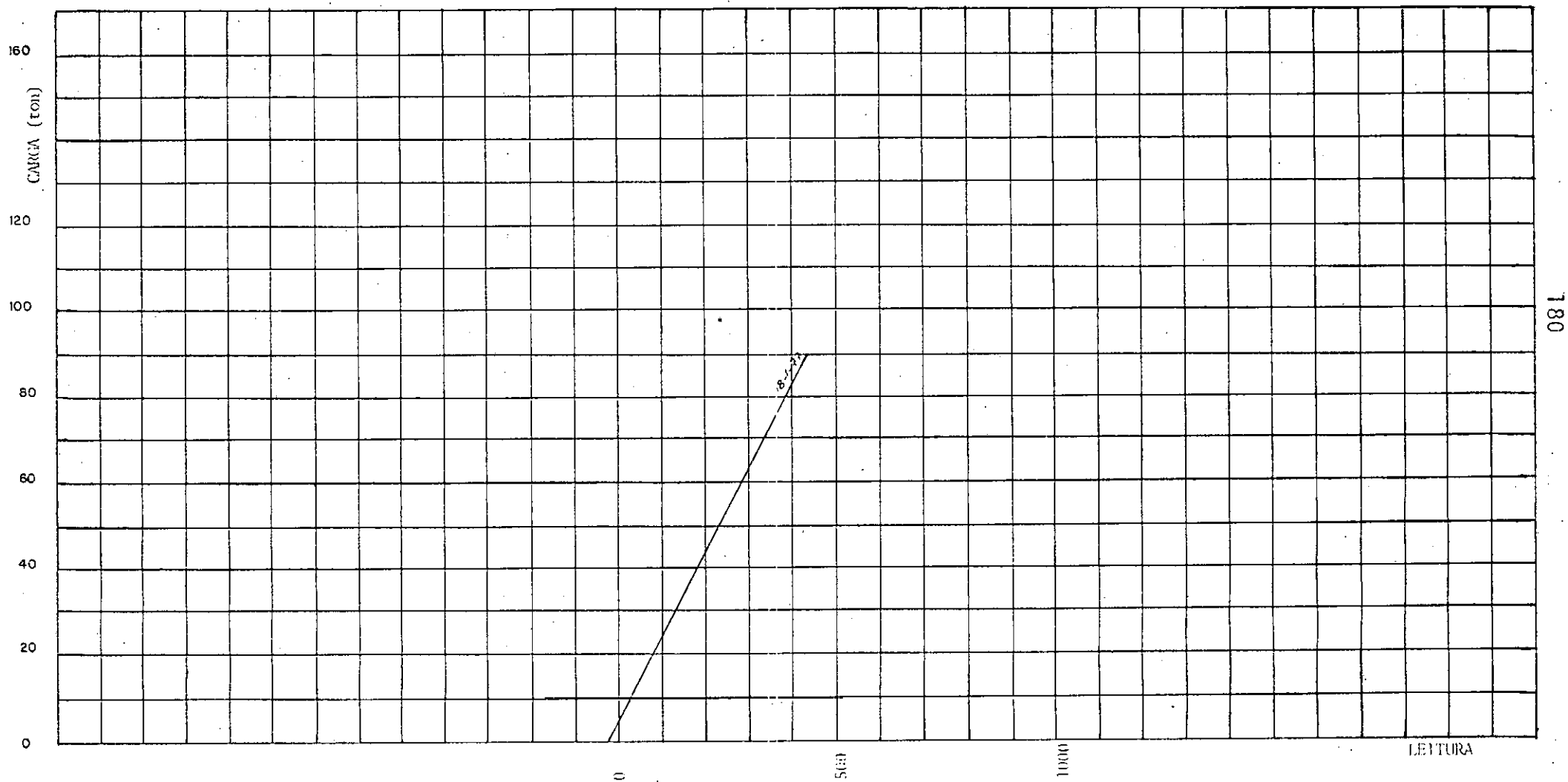
CELULA DE CARGA Nº 150-23



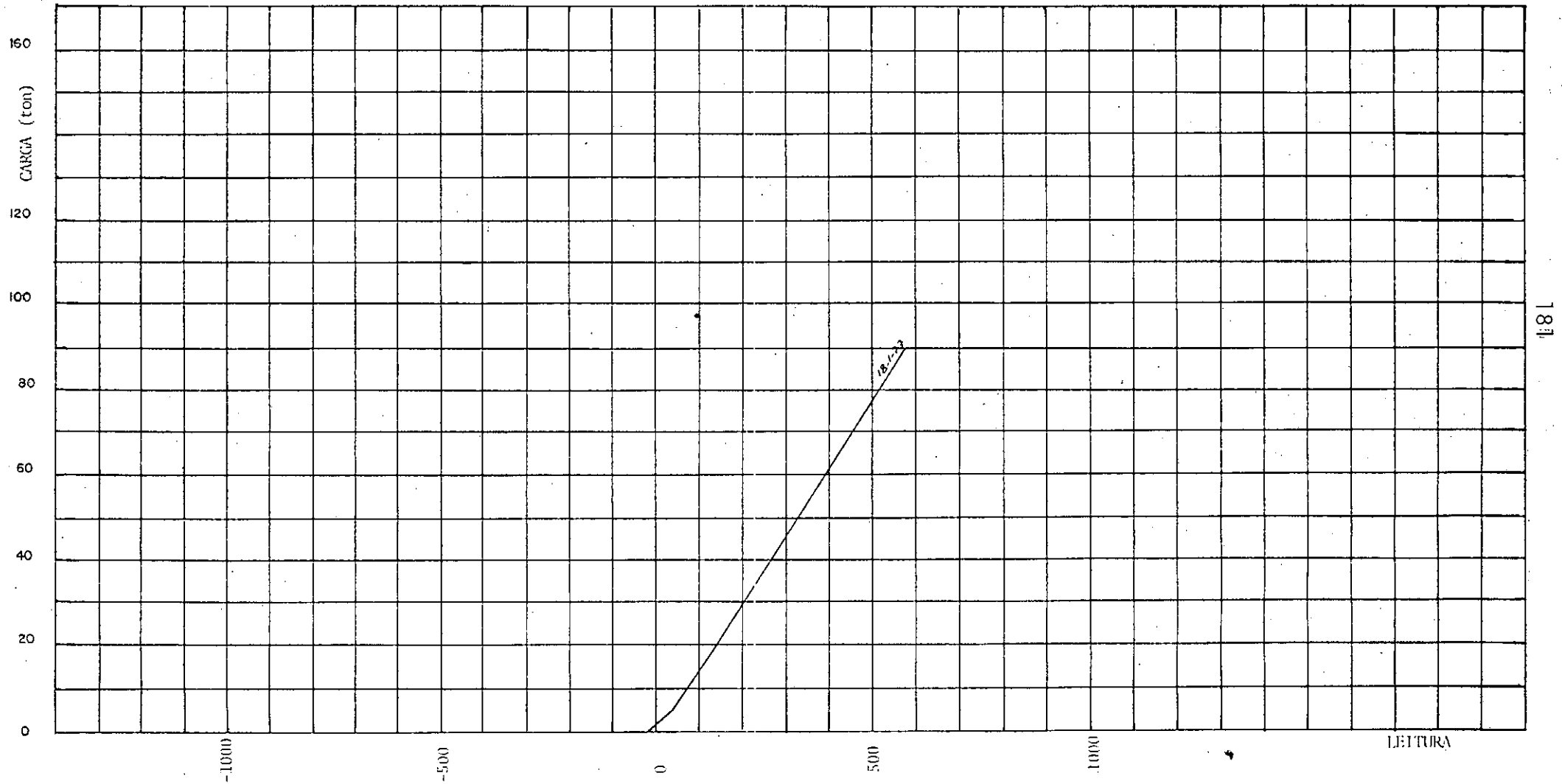
CELULA DE CARGA N° 150-24



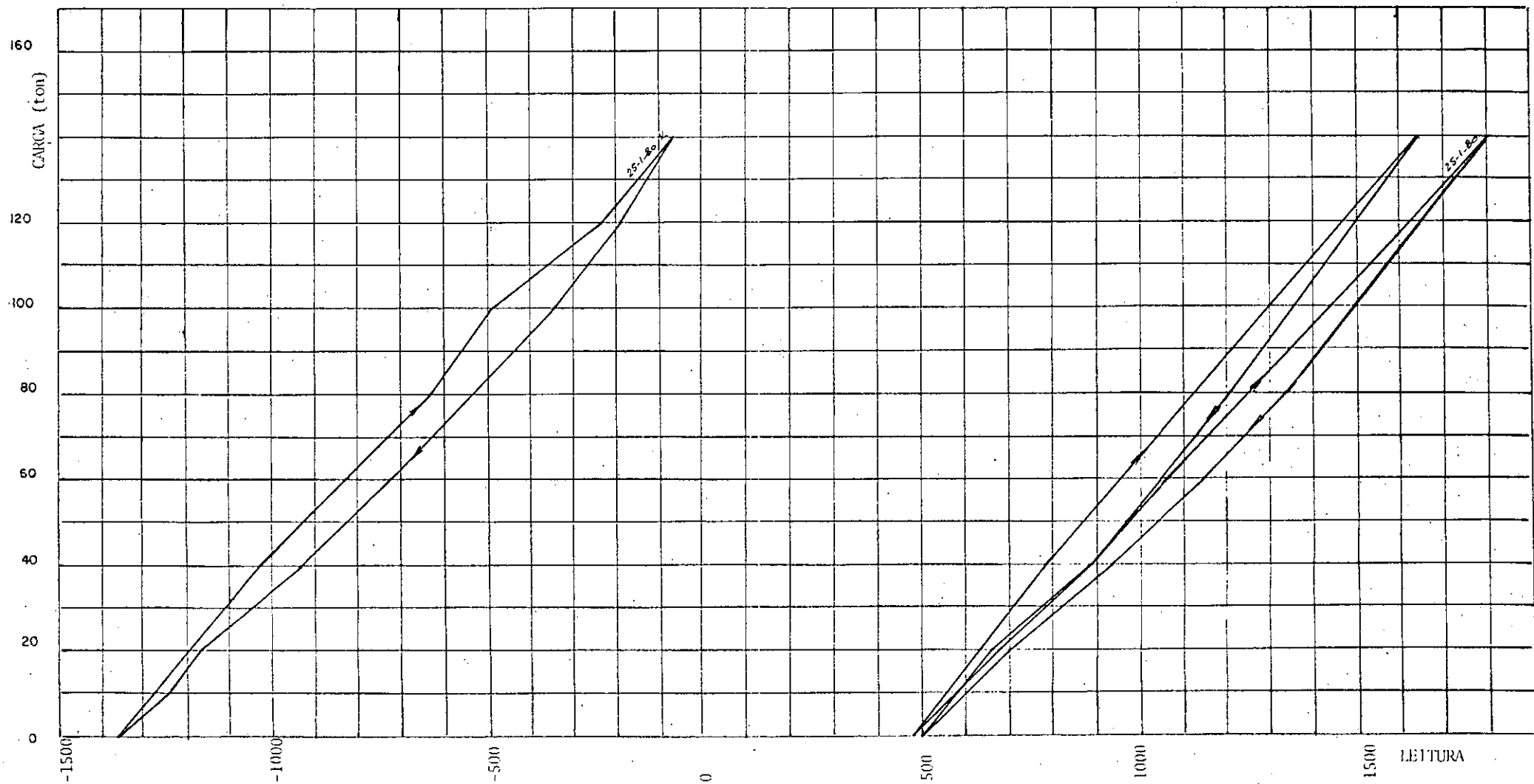
CELULA DE CARGA N° 150-25



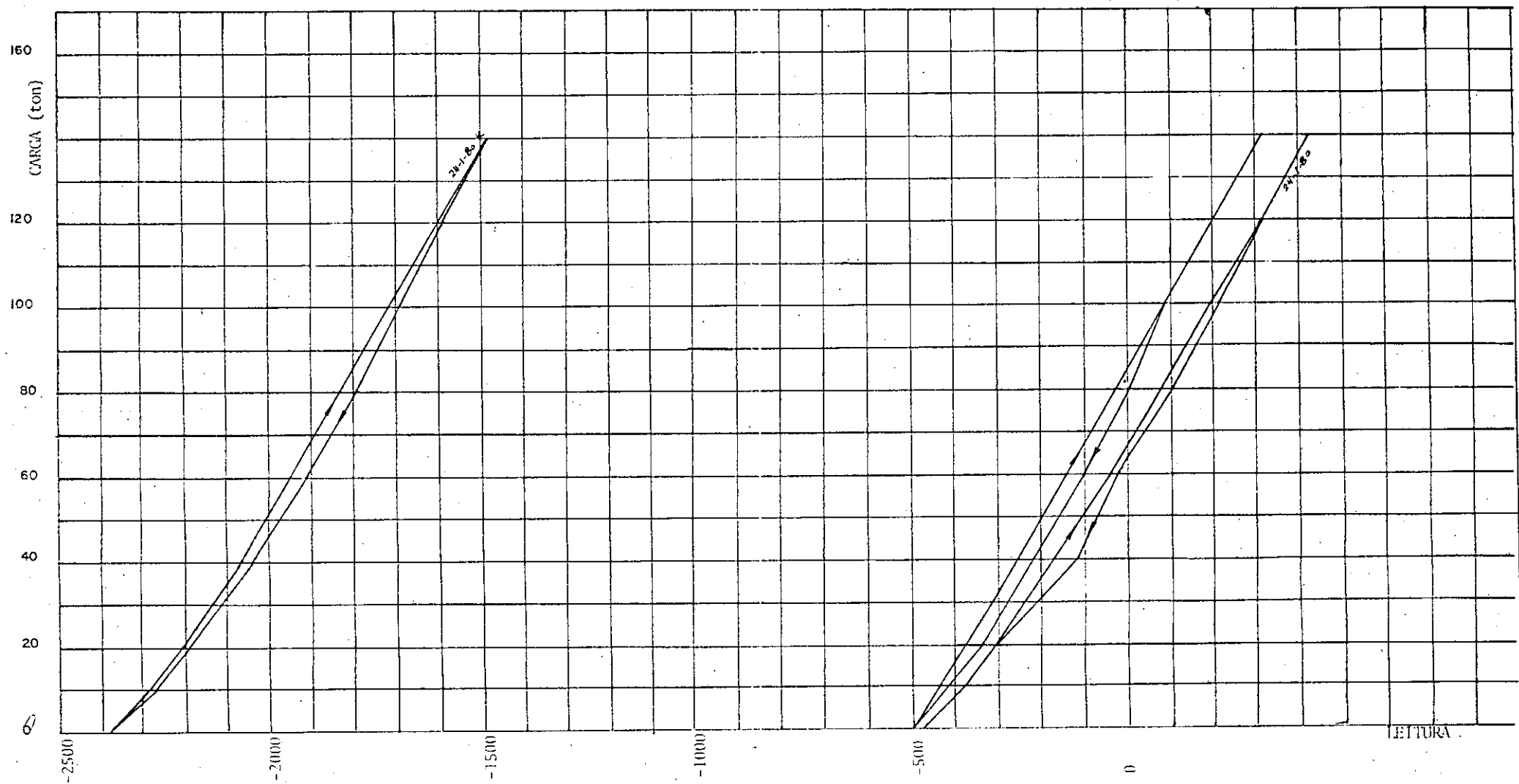
CELULA DE CARGA Nº 150-26



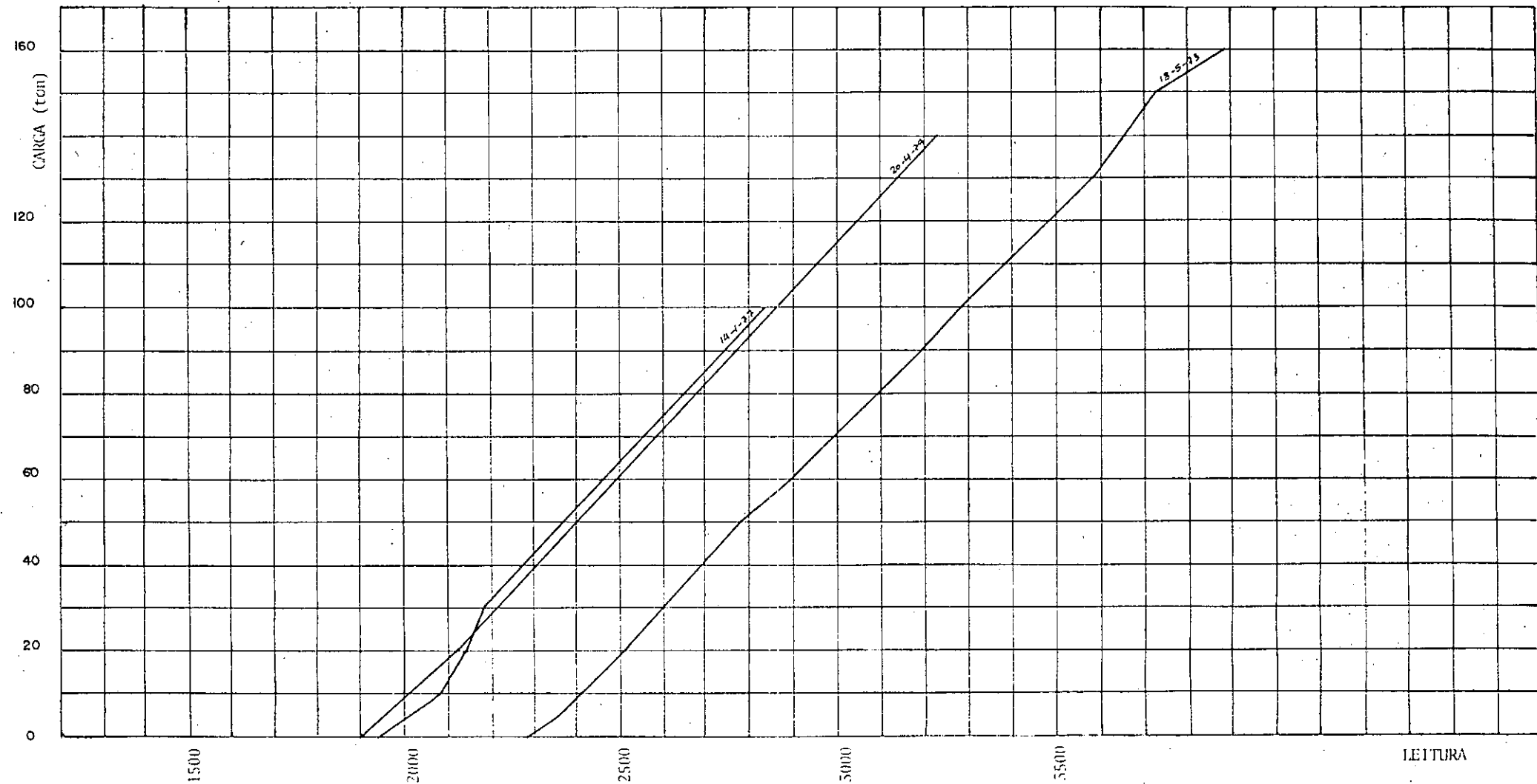
CELULA DE CARGA Nº 150-SN2



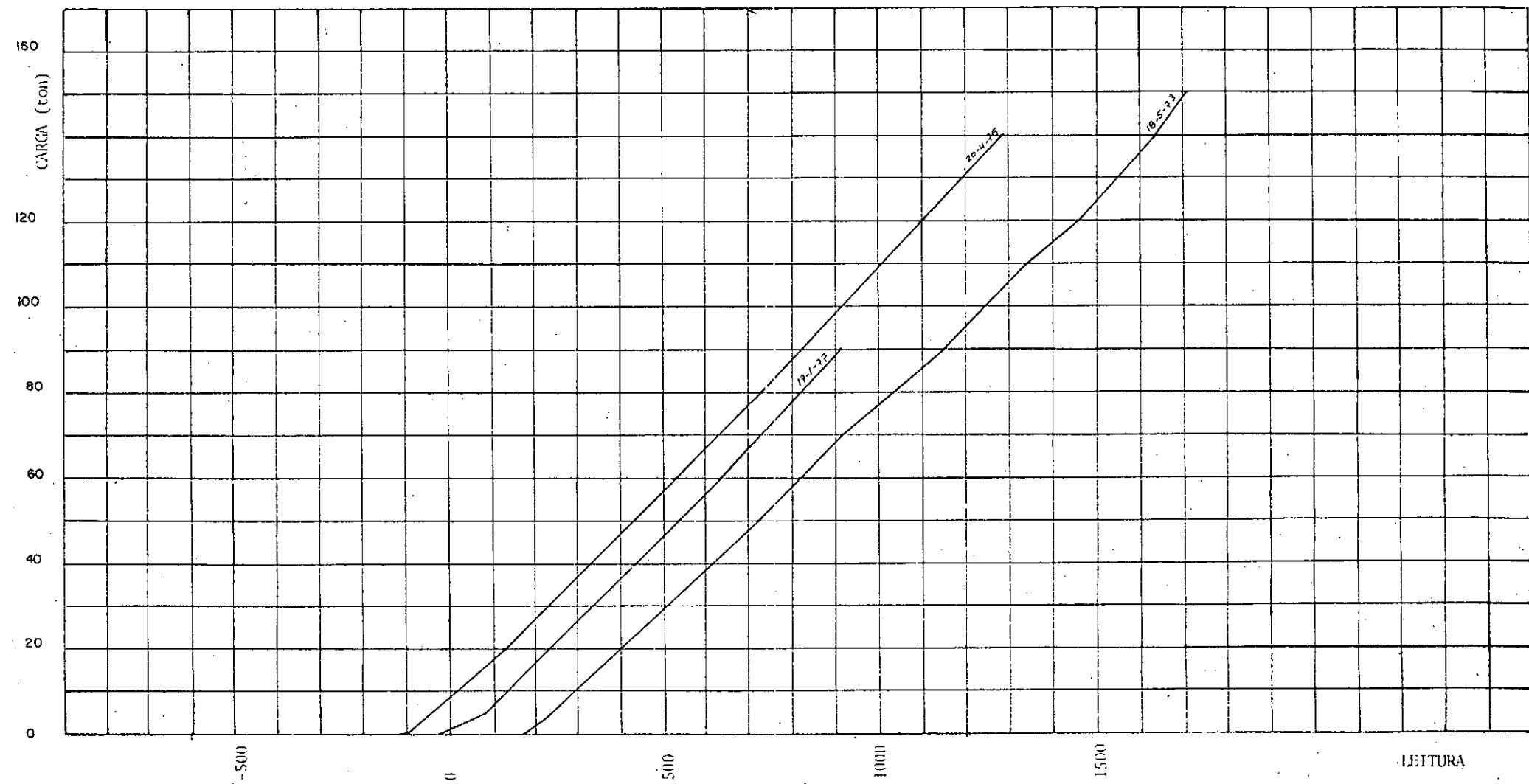
CELULA DE CARGA Nº 150-SN3



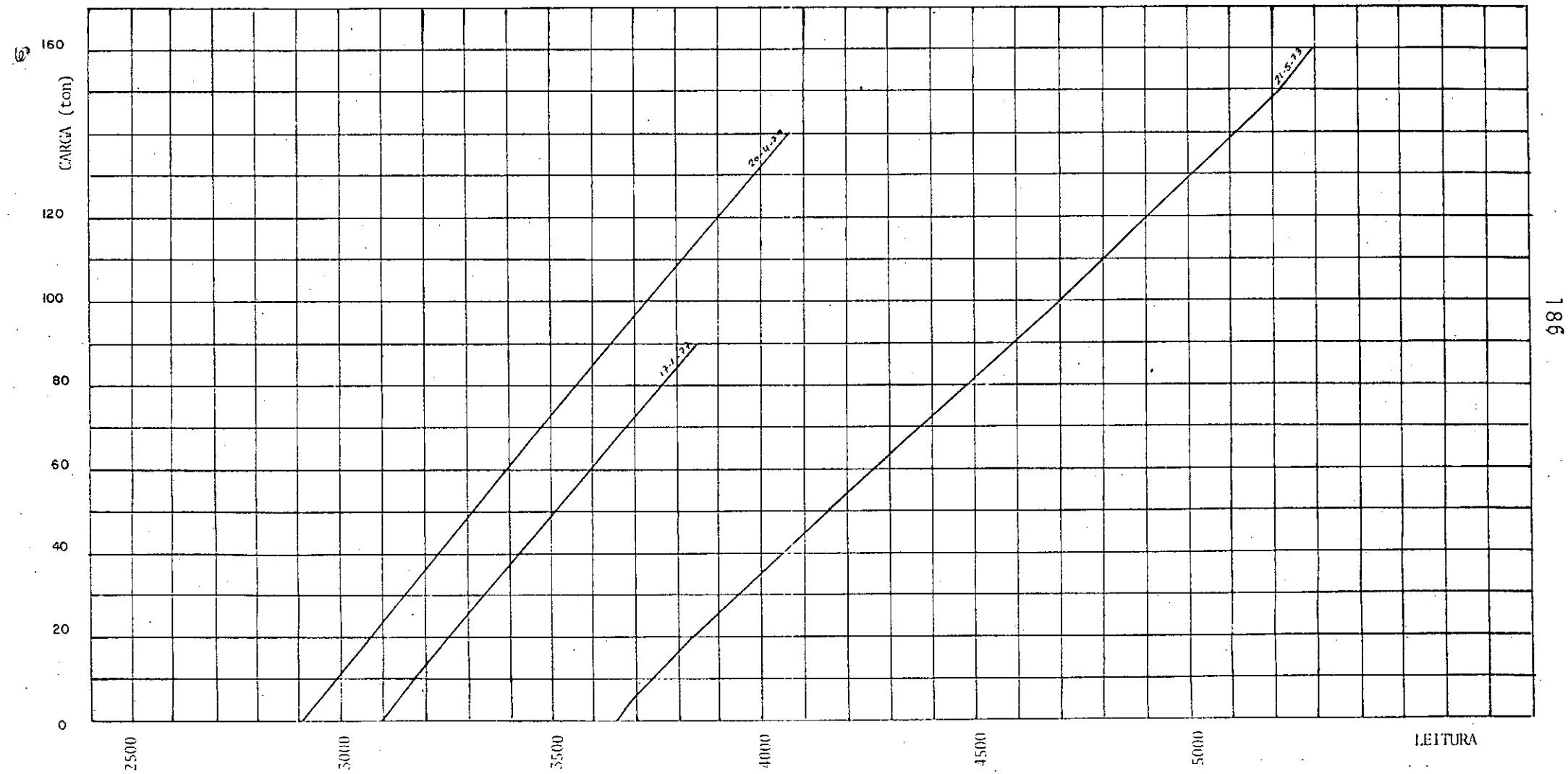
CELULA DE CARGA Nº 160-1



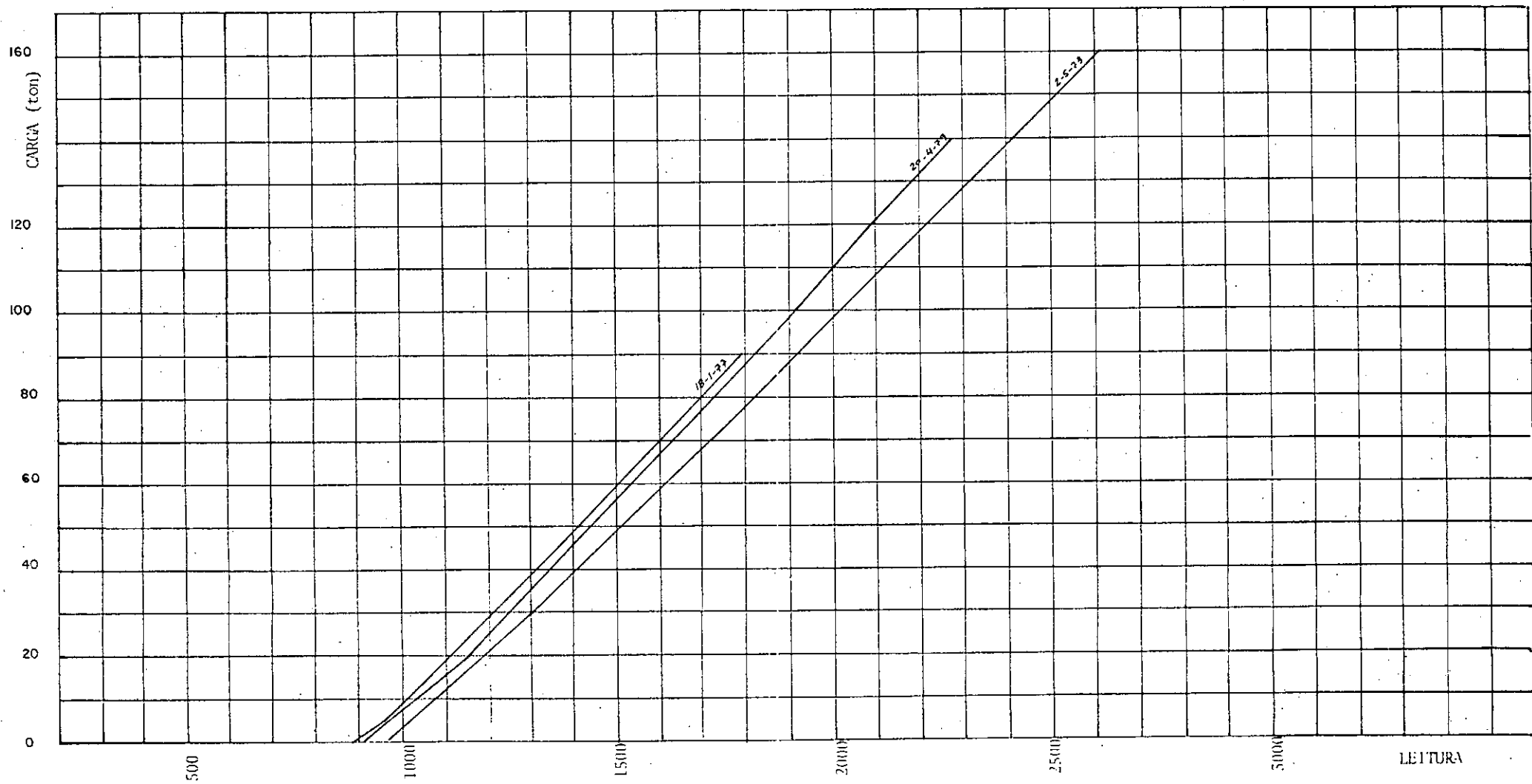
CELULA DE CARGA Nº 160-2



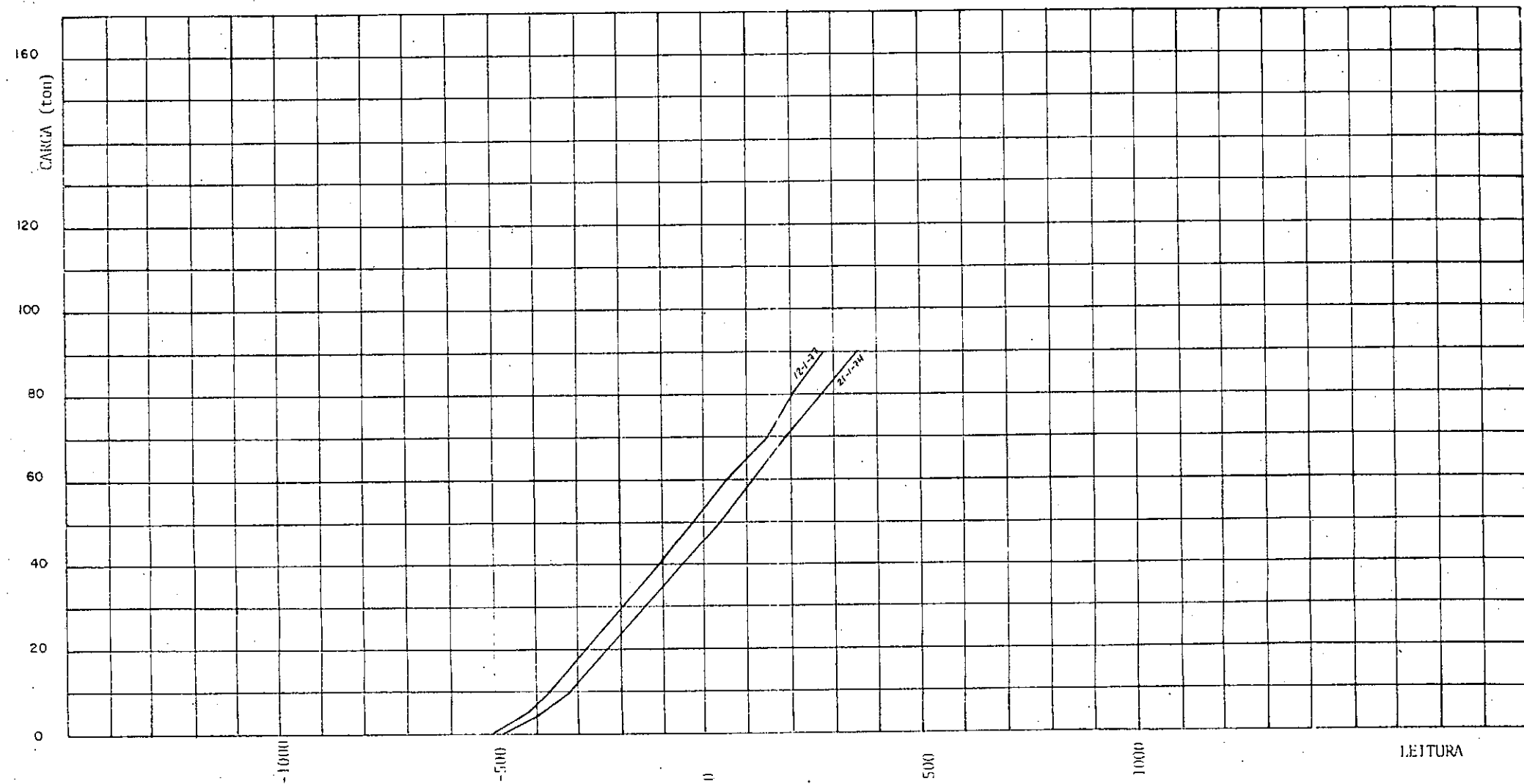
CELULA DE CARGA Nº 160-3



CELULA DE CARGA Nº 160-4



CELULA DE CARGA Nº 200-1



CELULA DE CARGA Nº 200-3

180

CARGA (ton)

160

120

100

80

60

40

20

0

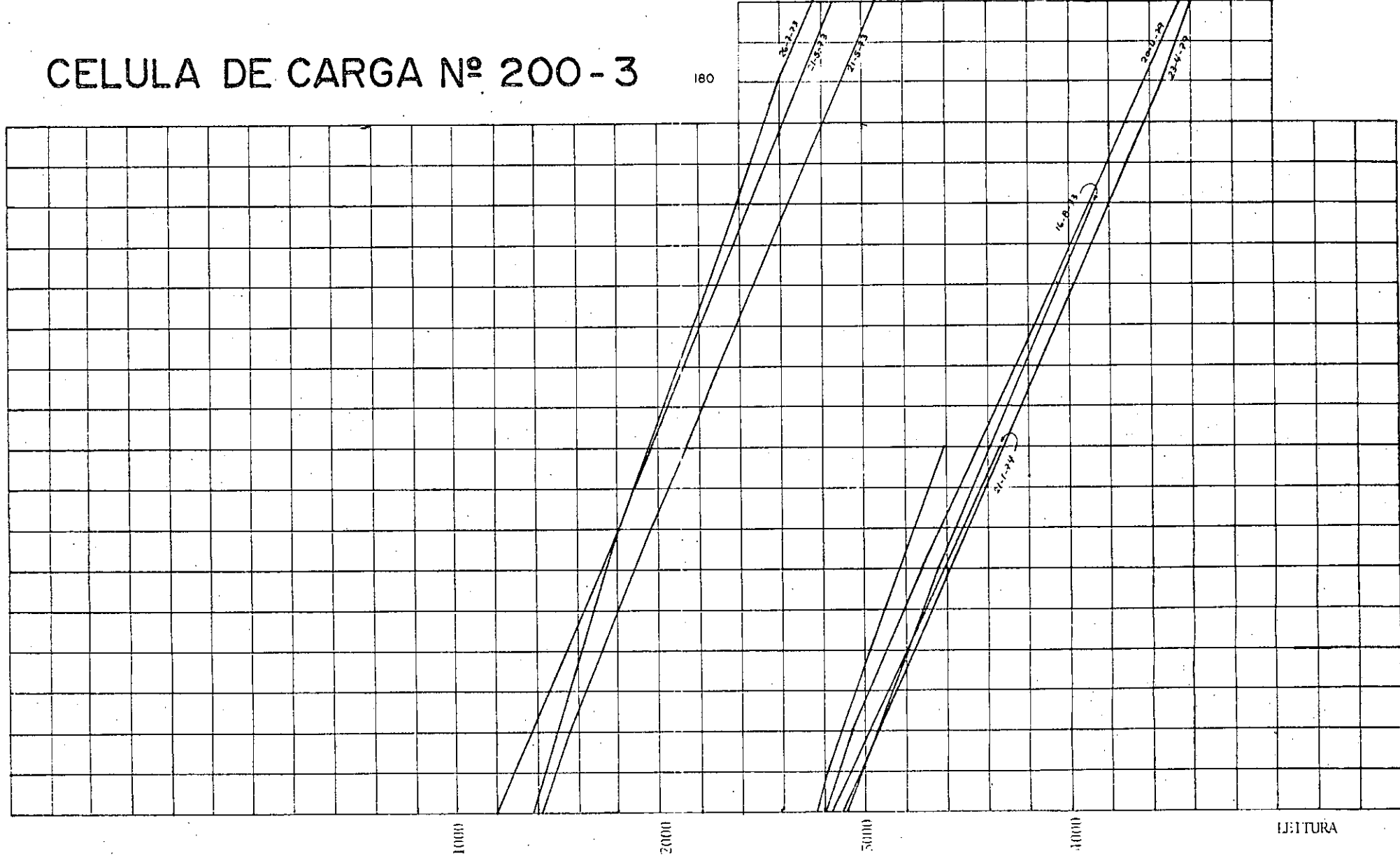
1000

2000

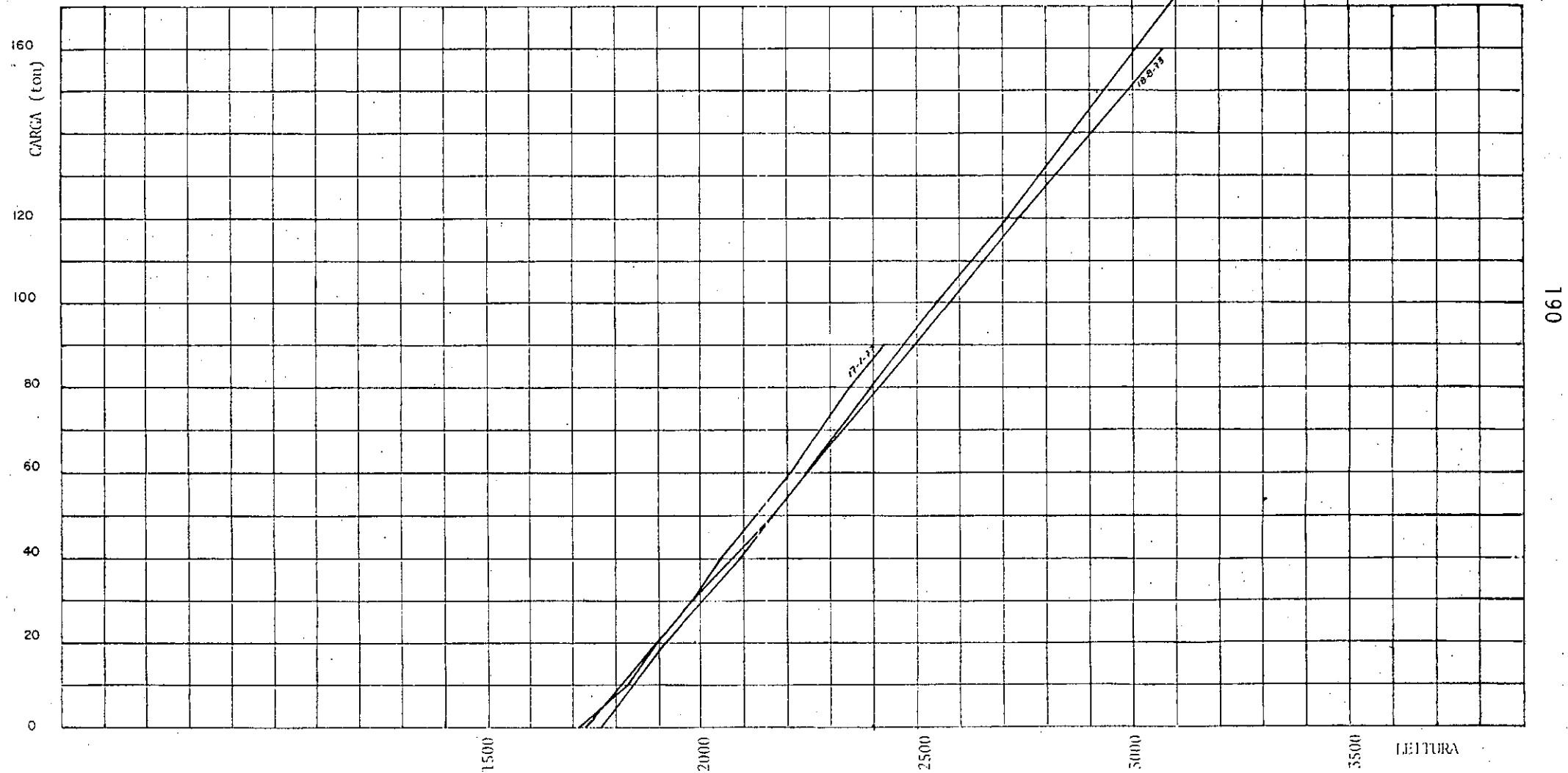
5000

4000

LEITURA



CELULA DE CARGA N° 200-4



APÊNDICE 4GRÁFICOS DE CALIBRAÇÃO DOS PIEZÔMETROS

Para os quatro piezômetros de contra pressão montados para os testes, foram empregadas as peças que sobraram dos utilizados no Metrô em Botafogo. Esperava-se por isto que os mesmos não apresentassem boas características de resposta, pois muitas peças apresentavam problemas de justaposição e montagem. Tal perspectiva entretanto, não se verificou como se vê a partir dos resultados das calibrações.

Os piezômetros calibrados até uma pressão de 4 kg/cm^2 , próximo ao limite do sistema de pressurização por potes de mercúrio do aparelho triaxial. Este valor corresponde aproximadamente a 40m de coluna de água, bem maior do que a esperada na instalação de campo, da ordem de 8m de coluna de água. O aparelho de leitura é o desenvolvido pelo Laboratoire des Ponts et Chaussées, que fornece as leituras dos manômetros em mBar e Bar ($1\text{Bar}=1,0167\text{kg/cm}^2$).

A calibração foi executada de acordo com os procedimentos descritos no sub-ítem 3.3.3. Para se obter uma precisão melhor da pressão aplicada do que a proporcionada pelo manômetro do sistema triaxial, foi empregado um transdutor de pressão com Vishay. As tabelas A4.1 a A4.4 apresentam os resultados das calibrações enquanto que os gráficos correspondentes estão apresentados na figura A4.1.

O piezômetro de número 2 apresentou alguma instabilidade para a leitura inicial, por isto foram feitos mais dois ciclos de carga. No piezômetro de número 3, ao fim do segundo ciclo de descarga, por descuido foi esquecida a válvula de presão aberta o que proporcionou uma pressão interna muito maior do que a confinante. O piezômetro foi retirado e desmontado tendo sido constatado uma deformação excessiva da membrana de aço inoxidável. O piezômetro foi então montado com a mesma membrana já que não haviam mais membranas disponíveis, porém em posição invertida e procedeu-se uma nova calibração, apresentada nos ciclos 3 e 4. Notou-se que houve uma variação das leituras antes e depois da deformação, a qual, ironicamente acusou uma melhor resposta e linearidade para o piezômetro após a deformação da membrana.

As leituras iniciais dos piezômetros forneceram valores diferentes de zero por causa de um problema de montagem somente detectado após a instalação dos aparelhos. Devido à falta de espaço e posicionamento dos equipamentos de leitura, o transdutor de pressão neutra, que ficou acoplado a uma base de célula triaxial foi posicionado em cota superior aos piezômetros dentro da cuba de calibração, assim para sua leitura zero, havia no piezômetro a pressão correspondente ao desnível, que foi da ordem de 90cm para os piezômetros 2 e 3 e 60 cm para os piezômetros 1 e 4. Este erro se reflete em todas as leituras implicando em se ter lido valores sempre maiores para a pres

são esperada, o que, entretanto, se torna percentualmente menor para as pressões maiores.

Através das tabelas e empregando o método estatístico de regressão e duas variáveis por mínimos quadrados, obtivemos as características constantes da tabela A4.5 para a resposta dos piezômetros. As curvas de calibração obtidas foram bastante próximas da linearidade, como mostra o valor do coeficiente de correlação (r^2).

Vemos então que os piezômetros de contra pressão construídos pela COPPE apresentam características muito boas de resposta na calibração, à despeito de terem sido montados a partir de sobras de material e, possivelmente com peças rejeitadas anteriormente.

LEITURA VISHAY	PRESSÃO APLIC. (kg/cm ²)	1º CICLO		2º CICLO		3º CICLO		4º CICLO	
		CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.
0	0,0	50	50	50	60				
188	0,5	460	460	460	460				
378	1,0	930	920	930	920				
569	1,5	1400	1410	1400	1400				
761	2,0	1880	1880	1890	1890				
954	2,5	2325	2325	2325	2350				
1142	3,0	2800	2800	2800	2800				
1334	3,5	3225	3275	3200	3300				
1527	4,0	3700	3700	3775	3775				

Tabela A4.1 - Piezômetro nº1, calibrado em 20/7/1979.

LEITURA VISHAY	PRESSÃO APLIC. (kg/cm ²)	1º CICLO		2º CICLO		3º CICLO		4º CICLO	
		CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.
0	0,0	80	100	100	100	90		80	
188	0,5	540	560	560	550	560		550	
378	1,0	1020	1020	1020	1020	1030		1020	
569	1,5	1420	1500	1500	1500	1520		1500	
761	2,0	1890	2010	2000	2000	2020		1980	
954	2,5	2410	2425	2400	2410	2425		2410	
1142	3,0	2900	2900	2900	2900	2900		2900	
1334	3,5	3400	3400	3400	3390	3400		3390	
1527	4,0	3900	3900	3900	3900	3900		3875	

Tabela A4.2 - Piezômetro nº2, calibrado em 19/7/1979.

LEITURA VISHAY	PRESSÃO APLIC. (kg/cm ²)	1º CICLO		2º CICLO		3º CICLO		4º CICLO	
		CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.
0	0,0	80	90	90	90	100	100	100	90
188	0,5	590	600	450	600	580	580	580	580
378	1,0	1060	1070	920	1020	1040	1060	1040	1040
761	2,0	2020	2050	1660	1980	1960	2010	1960	1980
954	2,5	2450	2500	2200	2300	2300	2350	2300	2300
1142	3,0	2950	2950	2560	2650	2650	2800	2700	2825
1334	3,5	2450	3450	3000	3050	3100	3150	3200	3225
1527	4,0	3950	3950	3400	3400	3575	3575	3575	2575

Tabela A4.3 - Piezômetro nº 3, calibrado em 19/7/1979.

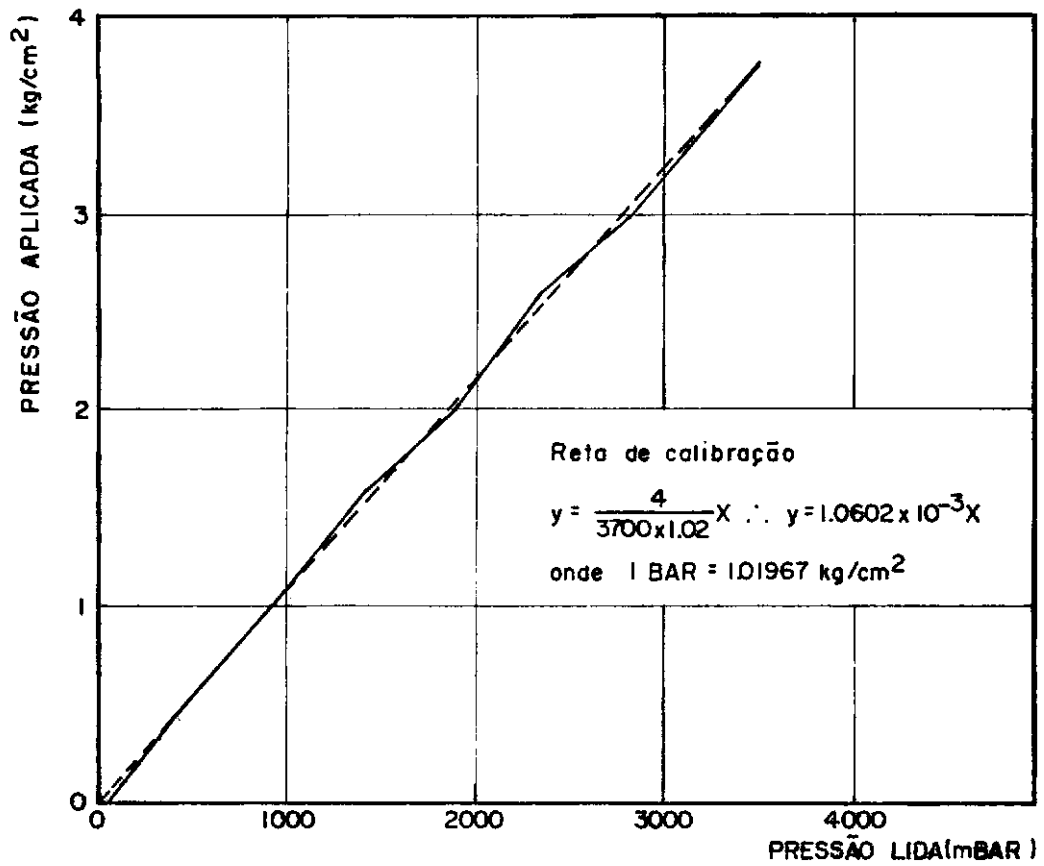
LEITURA VISHAY	PRESSÃO APLIC. (kg/cm ²)	1º CICLO		2º CICLO		3º CICLO		4º CICLO	
		CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.	CARGA	DESC.
0	0,0	70	60	60	60				
188	0,5	520	510	510	510				
378	1,0	980	980	980	980				
569	1,5	1460	1460	1460	1460				
761	2,0	1950	1950	1950	1950				
954	3,0	2350	2375	2375	2375				
1142	3,0	2875	2875	2875	2875				
1334	3,5	3350	3350	3350	3350				
1527	4,0	3850	3850	3850	3850				

Tabela A4.4 - Piezômetro nº 4, calibrado em 20/7/1979.

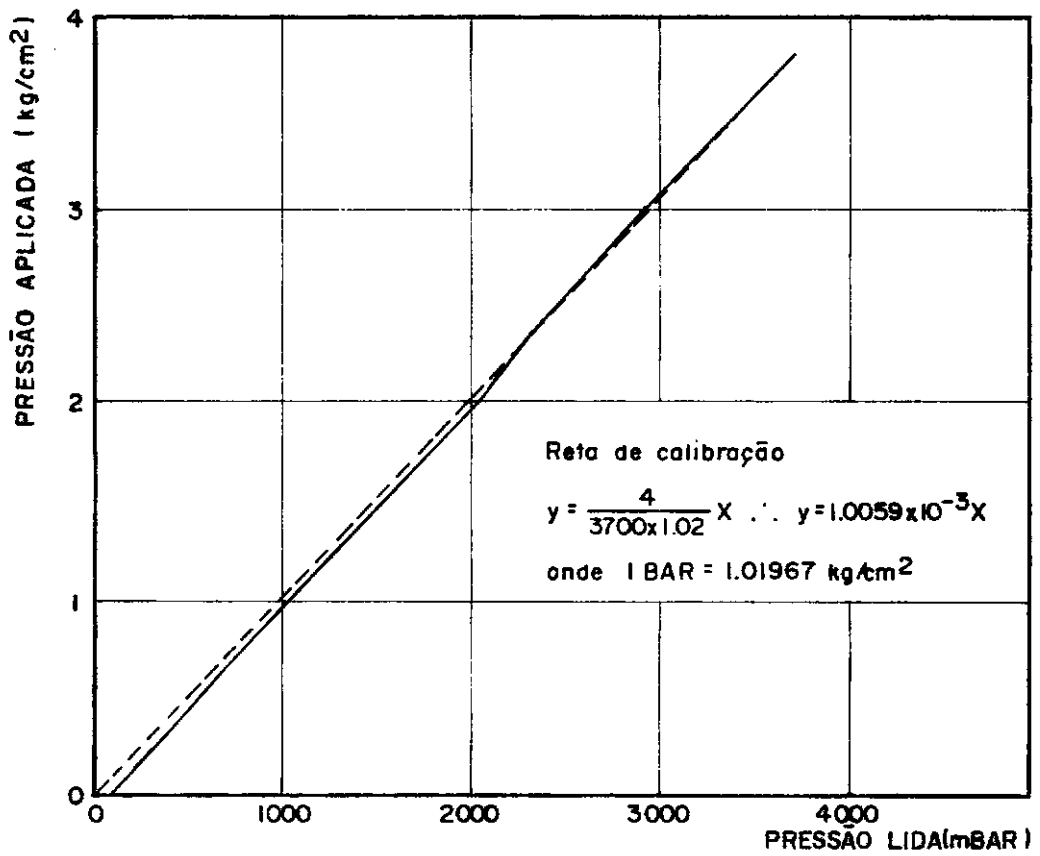
PIEZÔMETRO	RETA DE REGRESSÃO	r ²
1	$y = -0,01775 + 0,00108x$	0,99934
2	$y = -0,07942 + 0,00105x$	0,99967
3	$y = -0,10079 + 0,00119x$	0,99708
3*	$y = -0,18260 + 0,00116x$	0,99848
4	$y = -0,04416 + 0,00106x$	0,99983

* Após a deformação da membrana de aço inoxidável

Tabela A4.5



a) PIEZÔMETRO 1



b) PIEZÔMETRO 2

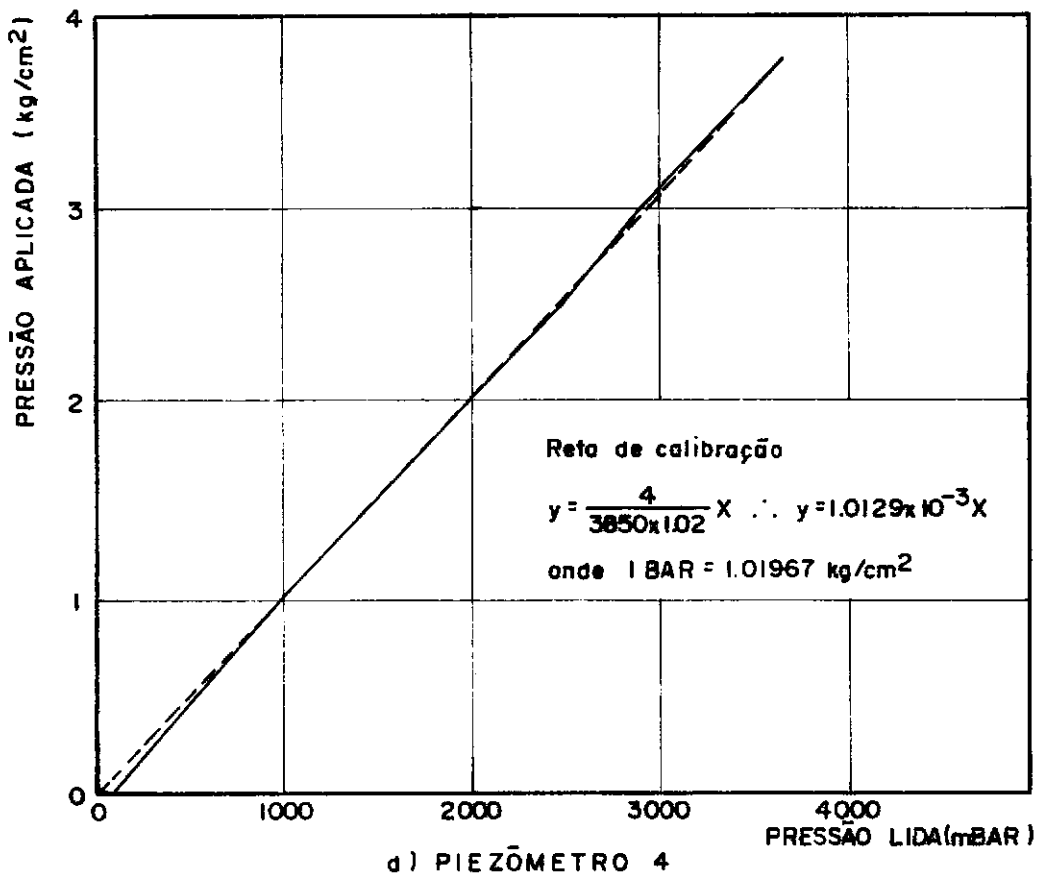
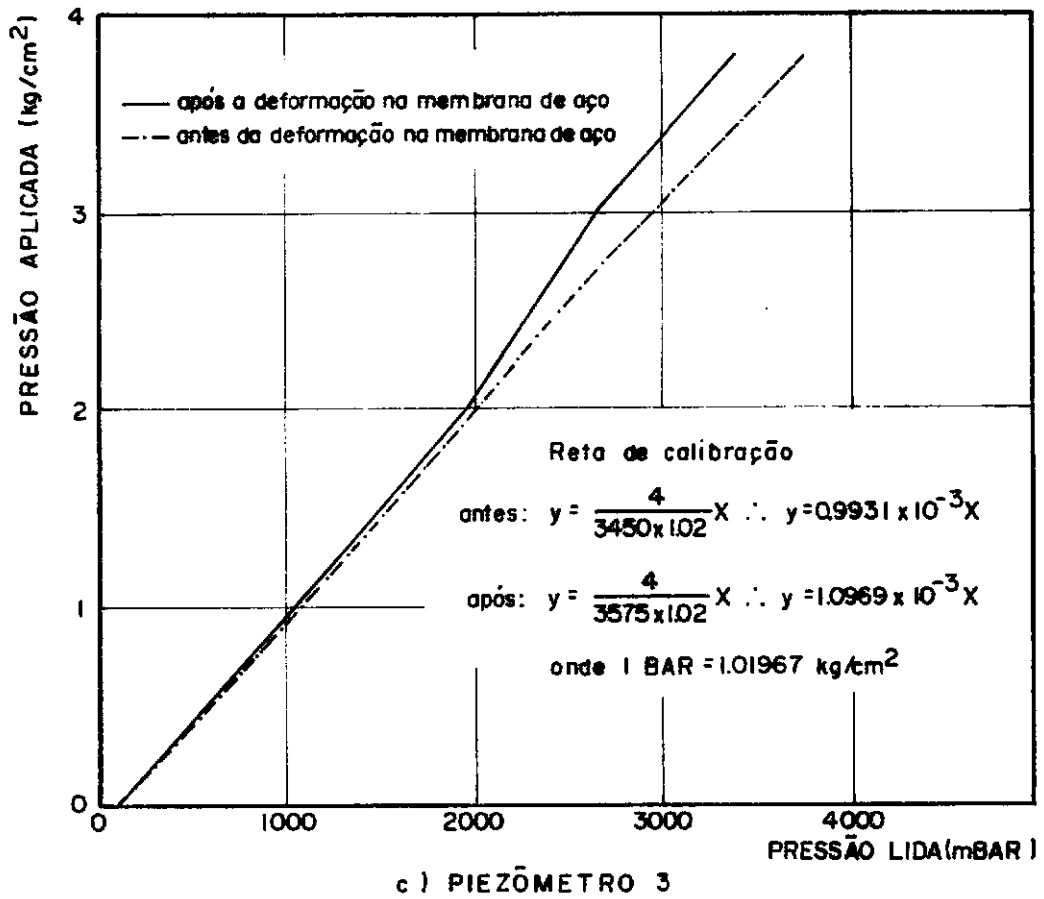


FIG.A4.1 — Gráficos das calibrações dos piezômetro de contra pressões.

APÊNDICE 5INSTALAÇÃO DE TESTE

O objetivo da instalação de teste foi o de avaliar as características dos piezômetros construídos pela COPPE, comparando suas respostas com piezômetros de outros princípios de funcionamento mais simples, que no caso foram de sistema fechado e de tubo avertido. Foram os seguintes os piezômetros instalados:

a) piezômetro de contra pressão fabricado na COPPE para o Metrô - é o tipo já analisado no decorrer deste trabalho e que é motivo deste estudo. É constituído de acordo com a figura A5.1, de um corpo de latão ou de bronze torneado, cujo interior se comunica com o exterior através de uma pedra porosa que pode ter diferentes graus de pressão de borbulhamento, e de outro lado está isolada do exterior por uma membrana de aço inoxidável.

Seu funcionamento obedece ao princípio de que a água, penetrando através da pedra porosa até o orifício central, lhe transmitirá a pressão exterior, que por sua vez comprimirá a membrana contra a parede vedando os furos de admissão e retorno. Aplicando uma pressão de ar através do orifício de admissão, no momento em que houver equilíbrio das pressões interna e externa haverá uma deflexão da membrana provocando o escapamento do ar através do orifício de retorno. A medida criteriosa deste momento através de uma bilha de volume constante de vazão, fornecerá a pressão atuante no ambiente externo de onde está instalado o piezômetro.

b) piezômetros hidráulicos fabricados pela Ronald Top-são dos tipos desenvolvidos nas pesquisas do IPR (Ortigão,1975), trabalhando com admissão de água contrabalançada por contra pressão no fim da linha de tubos, fornecida por sistema de pressurização ou colunas de mercúrio, geralmente em uma casa de controle.

Os piezômetros hidráulicos são fabricados com uma base e topo de ebonite ou PVC torneados e a pedra porosa é vela de filtro de água, também torneada. Um parafuso interno garante a fixação do conjunto, que é vedado nos contatos base e topo com o elemento filtrante com borracha de silicone e os tubos de conexão com o exterior são presos por conexões com anilhas.

O funcionamento baseia-se na transmissão da pressão a través da água contida nos tubos que vão desde o piezômetro até a casa de medições. Qualquer desnível apresentado pelo mercúrio ou variação no sistema de manômetro de contra pressão representa uma variação da pressão ocorrida no ponto de instalação do piezômetro.

Os dois tubos que saem do piezômetro devem sempre apresentar a mesma indicação de pressão. Em caso contrário há a presença de ar no interior dos tubos alterando os valores das leituras. É necessário então que se proceda uma troca da água contida nos tubos, de maneira a retirar o ar, fazendo com que ela percole sob pressão. Isto promove a desaeração do sistema permitindo que ele volte a trabalhar convenientemente.

Os piezômetros hidráulicos empregados foram de duas formas:

- (1) o denominado reto para utilização em aterros, para ser instalado em cavas e depois reaterrado (fura A5.2) e
- (2) o tronco cônico para instalação em furos de sondagem diminuindo a incidência de desmoronamentos das paredes do mesmo.

Os tubos de conexão dos piezômetros são especiais, cuja seção é um tubo interior de nylon com recobrimento de polietileno. O nylon é impermeável à água enquanto que o polietileno é impermeável ao ar e isto garante que não haverá perda de água nas tubulações sob pressão nem haverá entrada de ar, o que atrapalha as leituras e aumenta o tempo de resposta.

O sistema de leituras é composto de tubos de nylon transparentes cheios com mercúrio. Quando há pressão no piezômetro, esta é transmitida pela água até o mercúrio e a entrada de água no piezômetro causa uma variação de sua posição relativa até que o desnível do mercúrio forme uma pressão que contrabalance a pressão oriunda do ponto de instalação de piezômetro. Assim, como $\gamma_{\text{merc}} = 13,56 \gamma_{\text{água}}$, temos a pressão no piezômetro dada por $P = \text{desnível} \times 13,56$ mais ou menos a posição relativa entre o piezômetro e a casa de leituras.

A calibração dos piezômetros hidráulicos não foi executada porque os furos de sondagem para a instalação já estavam sendo executados quando tentou-se a calibração. Ocorria que é necessário a entrada da água no piezômetro para ser contrabalancada pelo mercúrio, e como a pedra porosa é de filtro, a vazão é

muito pequena e o processo muito demorado. Em avaliações que se deixou pernoitar, verificou-se que ocorria a estabilização das leituras, como o esperado, observando-se então que um ensaio destes levaria um dia por leitura, sendo portanto muito demorado.

O maior problema encontrado nestes piezômetros foi o da instalação, pois sendo muito leves e de dimensões avantajadas em relação aos furos de sondagem, em duas ocasiões ocorreu desmontamento de material das paredes e os furos tiveram que ser novamente lavados.

c) Piezômetro tipo tubo aberto fabricado pela Ronald Top - é um aparelho piezométrico para medição de nível de água, que avalia a pressão ou o nível através da admissão e da perda de água de acordo com flutuação do aquífero no local de assentamento do aparelho, conforme a figura A5.4. A medida da posição da água é feita através da descida, no interior do tubo de PVC, de um aparelho que acusa a presença de água por indicação sonora ou elétrica.

Para manter um controle mais rigoroso dos equipamentos, inclusive da temperatura, escolheu-se em princípio, como local para a instalação, o sub-solo da Escola de Engenharia da UFRJ, próximo à placa de reação do Laboratório de Estruturas, que é um local isolado e cujas características do solo da região são bem conhecidas pois já haviam sido feitas sondagens à percussão durante a construção.

Entretanto tal local se mostrou inviável para a execução dos furos de sondagem para a instalação dos piezômetros, pois

a altura não permitia a montagem do tripê de sondagem. Teve-se então que escolher uma área fora da escola, nos fundos dos Laboratórios Pesados e próximos aos Laboratórios de Materiais de Construção e de Estruturas, conseguindo-se uma posição satisfatória para a instalação das unidades de leitura, com acesso fácil e segurança no Laboratório de Estruturas.

A planta de locação dos instrumentos, conforme foi idealizada, está mostrada na figura A5.5a, e na figura A5.5b podemos ver conforme foi executada a instalação, devido a problemas de mobilização do equipamento de sondagem e de instabilidade dos furos.

O perfil típico das sondagens realizadas para a construção da placa de reação, dentro do laboratório e próximo do local anteriormente escolhido, bem como a sua planta de locação, estão apresentados na figura A5.6 a e b, respectivamente. Para o estudo da instalação assumiu-se que o perfil médio do terreno seria similar a este, mesmo porque a distância média entre as sondagens e o ponto final da instalação é só da ordem de 30m. Esta similaridade realmente se verificou, em termos das características geotécnicas do material, somente diferenciando quando à profundidade do limite da sondagem, o que é perfeitamente normal. A partir das sondagens efetuadas para as instalações dos piezômetros, 11 ao todo, obtivemos o quadro A5.1 com os tipos de solos atravessados, o qual representa também o perfil médio do sub-solo.

CAMADAS ATRAVESSADAS	SONDAGENS EFETUADAS PARA INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS										
	1	2	3	3	4	5	6	7	8	8	9
Aterro de entulho argi- loso	0,55	0,60	0,45	0,45	0,80	0,50	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50
Silte arenoso de cor amarela	5,15	5,10	5,10	5,10	5,00	5,15	5,00	5,10	5,00	5,00	5,20
Argila orgânica com pouca valva	6,10	6,15	6,05	6,25	6,10	6,00	6,05	6,10	6,10	6,10	6,15
Areia média argilosa cor cinza	6,75	-	6,70	6,70	-	6,70	6,80	6,65	-	-	6,70
Alteração de rocha	9,90	9,25	9,90	9,90	9,20	9,90	9,85	9,90	9,95	9,95	9,95
Limite da sondagem im- penetrável ao trepano	11,55	11,50	11,40	11,40	11,75	11,80	11,60	11,70	11,80	11,80	11,40

Quadro A5.1

Pela observação dos perfis geotécnicos das sondagens efetuadas observa-se que há uma camada de material argiloso de aproximadamente 0,5m, depois uma camada de silte arenoso de cor predominante amarela de 4,5m e espessura. Depois temos uma camada de argila orgânica estremeada com algumas valvas de 1,0 m e após isto uma camada de areia argilosa de cor cinza de quase 4,0m. Após isto entramos no solo de alteração de rocha matriz, predominantemente arenoso e o limite da sondagem, assumido como o impenetrável à ferramenta de avanço (trépano), foi encontrado ao atravessar de 1,4 a 1,8m desta camada de solo residual.

Para a instalação dos piezômetros foram executados furos de sondagem com trépano e avanço por circulação de água, sem ensaios de penetração, com diâmetro de 2 1/2" e sem o emprego de lama bentonítica de circulação, para evitar a impermeabilização das paredes do furo. A não utilização de lama bentonítica, como se poderia prever, levou à instabilização dos furos, ocorrendo fechamento em três ocasiões.

O revestimento foi introduzido o mínimo possível, na maioria dos casos somente o "T" de lavagem, e sendo o solo alteração de rocha, com material de características grossas na região de instalação evitou-se o procedimento de escariar o furo, o que também propicia desmoronamentos.

A mecânica de execução, devido à pequena profundidade da instalação, que proporcionava uma elevada rapidez de furação, foi de iniciar cada furo à tarde de um dia, pará-lo no meio da profundidade esperada, e completá-lo no período da manhã seguin-

te. Após boa lavagem, era possível instalar o piezômetro durante o período de deslocamento de tripé de sondagem e almoço da turma de trabalho. Isto permitia que se deixasse o furo sujeito a desmoronamentos o menor tempo possível e ainda evitava-se muito trânsito de curiosos.

Para tentativa de posicionamento dos piezômetros em uma mesma cota foi adotado o nível de primeiro piezômetro instalado, que foi de -11,5 em relação ao piso do laboratório. A profundidade do furo era controlada por um peso amarrado na ponta de uma trena. Era então jogada areia e adensada pelo peso da ponta da trena até a cota prevista. Depois de posicionado o piezômetro era completada com areia a extensão do furo de aproximadamente 2,5m, agora controlado pelo volume de areia jogada, conforme mostrado na figura A5.7.

A profundidade inicialmente prevista de 11,50m em relação ao piso do laboratório, o que daria aproximadamente 10,00 m de profundidade no terreno, acabou não sendo possível de ser realizada com precisão devido a que os impenetráveis subsquentes ao primeiro deram em nível, mais alto. Os níveis de instalação reais estão apresentados na tabela A5.1, para todos os nove piezômetros, quatro de contra pressão, quatro hidráulicos, e um tipo tubo aberto, que apesar de ter um maior tempo de resposta tem uma grande confiabilidade.

PIEZÔMETRO	PROFUNDIDADES			
	SOND.	F. AREIA	INST.	C. AREIA
Tubo aberto	11,55	0,10	11,45	2,8
Contra Pressão 1	11,75	0,15	11,60	2,5
Contra Pressão 2	11,50	0,15	11,35	2,5
Contra Pressão 3	11,70	0,20	11,50	2,5
Contra Pressão 4	11,40	0,20	11,20	2,5
Hidráulico 1	11,40	0,10	11,30	2,5
Hidráulico 2	11,80	0,20	11,60	2,5
Hidráulico 3	11,60	0,10	11,50	2,5
Hidráulico 4	11,80	0,20	11,60	2,5

Tabela A5.1

A instalação dos piezômetros de contra pressão foi bastante facilitada pelo peso do conjunto não tendo havido qualquer problema de descida dos mesmos. Já os piezômetros hidráulicos, que foram os dos tipos cilíndrico e tronco cônico apresentaram problemas de instalação devido às suas grandes dimensões e baixo peso (peso específico aproximadamente igual ao da água). Isto ocasionou desmoronamento do material das paredes do furo em três ocasiões com um caso de fechamento completo, pois acabava tendo que ser empurrado pelos tubos de conexão que se enrolavam e iam raspando pelas paredes.

Estes piezômetros devem ser instalados em furos de sondagem de 3" de diâmetro, no mínimo, ou devem ser adicionados pesos a estes instrumentos na hora da instalação ou então que as

partes de PVC sejam substituídas por latão ou bronze para dar maior peso ao conjunto. Outra solução prática é passar a tubulação por dentro da coluna de sondagem e com esta empurrar o piezômetro até o ponto de instalação, quando então é jogada areia e retirada concomitantemente a coluna dos tubos.

Após a instalação e preenchimento da parte inferior do furo com areia, foram jogadas bolas de material argiloso do aterro superficial. Não houve maior preocupação em realizar um selo eficiente pois o material circundante do sub-solo não apresentava as características necessárias para criar um lençol confinante, logo os piezômetros iriam responder uma variação de lençol de água, ou mais especificamente uma variação da maré.

Os tubos dos piezômetros foram enrolados e tampados em buracos até a complementação de todo o serviço de instalação e liberação da equipe de sondagem, quando então foram esticados, envoltos em uma mangueira de borracha e enterrados 0,5m para evitar o acesso do sol e dos curiosos. Para entrar no laboratório tiveram que ficar aéreos, foram então encamisados por um tubo de ferro galvanizado.

Para os piezômetros de contra pressão foram utilizados tubos de nylon enquanto que para os hidráulicos foram usados tubos duplos de nylon recobertos com polietileno para evitar a penetração da água com a camada de nylon e do ar com a camada de polietileno.

A ligação com o quadro de leituras foi realizada através da utilização de conexão simples e tubos medidores com mercú

rio, já que seriam medidas pressões negativas e também por não se dispor de painel com torneiras. O processo de desaeração, muito necessário por causa das pressões negativas, foi realizado através da desconexão com o sistema de leituras e conexão com o aparelho de desaeração cedido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

Para realizar a comparação entre as respostas dos diversos piezômetros, foi programada a leitura sistemática dos aparelhos instalados durante o período suficiente para permitir concluir com segurança, os objetivos propostos.

Como os piezômetros hidráulicos necessitam de desaeração periódica para retirar os acúmulos de gás da tubulação, neste caso mais crítico por eles estarem medindo pressões negativas em virtude da estação de leituras se situar em nível piezométrico superior, foi programada desaeração semanal, aos sábados pela manhã, com leitura de verificação à tarde e equalização aos domingos. Entretanto esta programação foi mantida somente por um período de três semanas, quando o aparelho de desaeração foi solicitado de volta ao IPR para revisão e utilização em seus projetos.

Apesar disto continuaram sendo efetuadas leituras nos piezômetros hidráulicos, tomando-se o cuidado de evitar choques nas tubulações, de modo a impedir que as bolhas de ar viessem a se interligar e cortassem a continuidade da massa líquida, esquema que ainda perdurou por mais duas semanas quando os piezômetros hidráulicos já estavam com as tubulações completas de ar, junto à bancada de leituras, e também o aparelho de leitura dos piezômetros começou a apresentar problemas de engate

quebra das molas dos terminais.

As tabelas das leituras efetuadas se encontram nos quadros A5.2 e A5.3, onde temos os dados dos diversos aparelhos correlacionados entre si, as datas e horas em que foram tomadas as leituras.

As leituras dos piezômetros de contra pressão são tomadas diretamente no ponto de aplicação da pressão neutra, mas as dos piezômetros hidráulicos são tomadas na unidade de leitura, sendo necessária, portanto, a relação geométrica entre a posição de instalação dos aparelhos e a coluna de mercúrio da unidade de leitura. Esta relação está mostrada na figura A5.8, para os vários piezômetros.

A tabela A5.2 apresenta as cotas piezométricas inferidas a partir das leituras efetuadas nos piezômetros de contra pressão, hidráulicos e tubos aberto, onde podemos compará-las com a cota esperada do lençol freático da região. Este nível está aproximadamente de acordo com a realidade já que sabemos que o sub-solo dos laboratórios está perto do lençol freático, tendo inclusive já ocorrido problemas de inundação no local por sua elevação.

Data	Hora	Piezômetro Casa-grande	Piezômetro de Contra Pressão				Piezômetro Hidráulico							
			Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 1		Nº 2		Nº 3		Nº 4	
							Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
10/05	-	-	-	-	-	-	D	E	S	A	E	R	A	R
	16:00	1170	960	-	980	1040	60/86	66/105	70/105	64/68	40/100	43/98	47/137	48/117
11/05	9:30	1195	950	-	980	1040	63/86	67/105	68/105	52/68	43/100	44/98	95/137	87/117
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/05	9:00	1220	940	-	980	1040	63/86	74/105	68/105	25/68	45/100	48/98	64/137	48/117
	17:00	1220	950	-	970	1050	63/86	78/105	66/105	25/68	45/100	48/98	65/137	48/117
13/05	8:00	1220	950	-	950	1050	64/86	87/105	65/105	8/68	48/100	55/98	45/137	33/117
	17:00	1220	950	-	950	1050	64/86	85/105	65/105	6/68	48/100	56/98	45/137	35/117
14/05	8:50	1210	940	-	950	1050	62/86	74/105	63/105	-4/68	47/100	58/98	50/137	39/117
	16:30	1210	940	-	950	1045	62/86	74/105	63/105	-4/68	47/100	58/98	50/137	40/117
15/05	9:00	1210	940	-	960	1040	60/86	74/105	60/104	0/68	47/100	60/98	50/137	50/116
	16:30	1215	940	-	960	1040	60/86	74/105	60/104	0/67	48/100	61/98	50/137	60/116
16/05	9:00	1215	940	-	1050	1035	60/86	74/105	60/103	20/67	58/100	60/98	100/137	105/116
	17:00	1215	940	-	1050	1035	60/86	74/105	60/103	23/67	56/100	61/98	100/137	109/116
17/05	8:00	1215	940	-	1050	1035	D	E	S	A	E	R	A	R
	16:00	1215	940	-	1050	1035	60/85	68/105	71/103	37/67	45/100	44/98	40/137	62/115
18/05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/05	9:00	1220	940	-	1060	1040	60/85	69/104	72/103	38/67	45/100	44/98	42/137	62/115
	17:00	1215	940	-	1060	1040	60/85	69/104	72/103	38/67	45/100	44/98	42/137	62/115
20/05	10:00	1210	940	-	1050	1040	60/85	69/104	72/103	39/66	45/100	45/98	44/136	62/115
	17:30	1210	940	-	1050	1040	60/85	69/104	72/103	39/66	45/100	44/98	42/136	62/115
21/05	9:00	1215	940	-	1050	1040	60/85	70/104	72/103	50/66	50/100	45/98	60/136	80/115
	17:00	1215	940	-	1050	1040	70/85	71/104	72/103	50/66	50/100	45/98	60/136	80/115
22/05	8:00	1220	940	-	1040	1040	70/85	71/104	72/102	50/66	50/100	45/98	60/136	80/115
	16:00	1220	940	-	1040	1050	70/85	73/104	72/102	60/66	50/100	45/98	65/136	80/115
23/05	10:00	-	950	-	1030	1050	70/85	73/104	75/102	110/66	53/100	47/98	85/136	129/115
	17:10	-	950	-	1030	1050	70/85	73/104	75/102	110/66	53/100	47/98	85/136	130/114
24/05	8:00	-	950	-	1020	1050	D	E	S	A	E	R	A	R
	16:00	-	950	-	1020	1050	74/84	80/103	80/101	110/65	75/100	43/97	61/135	123/113
25/05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26/05	9:00	-	920	-	980	1040	75/84	80/103	80/101	110/65	76/100	44/97	61/135	124/113
	16:00	-	920	-	980	1040	75/84	80/103	80/101	110/65	76/100	44/97	61/135	124/113
27/05	9:00	-	920	-	980	1040	76/84	80/103	80/101	110/65	76/100	44/97	61/135	124/113
	16:00	-	920	-	980	1040	76/84	80/103	80/101	110/65	76/100	44/97	60/135	124/113

Data	Hora	Piezômetro Casa-grande	Piezômetros de Contra Pressão				Piezômetros Hidráulicos							
			Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 1		Nº 2		Nº 3		Nº 4	
							Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
28/05	9:00	-	920	-	980	1040	76/84	80/103	80/101	110/65	76/100	44/97	61/135	124/113
	16:00	-	920	-	980	1040	76/84	80/103	80/101	110/65	79/100	44/97	60/135	125/113
29/05	10:00	-	920	-	990	1040	77/86	81/105	83/103	104/68	122/100	43/98	126/138	132/116
	17:00	-	920	-	990	1040	77/86	81/105	83/103	104/68	122/100	43/98	126/138	132/116
30/05	8:30	-	920	-	990	1040	77/86	81/105	83/103	104/68	122/100	43/98	126/138	132/116
	15:30	-	920	-	980	1040	77/86	81/105	83/103	104/68	122/100	43/98	126/138	132/116
31/05	8:30	-	930	-	990	1040	78/86	81/105	83/103	104/68	122/100	43/98	120/138	125/116
	15:00	-	930	-	990	1040	78/86	81/105	83/103	104/168	122/100	43/98	120/138	125/116
01/06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02/06	8:00	-	950	-	990	1040	80/85	80/104	91/103	110/68	110/100	43/98	115/137	121/115
	15:00	-	950	-	990	1050	80/85	81/104	89/103	110/68	110/100	43/98	113/98	121/116
03/06	8:00	-	960	-	990	1050	80/84	81/104	86/103	93/68	86/99	43/98	109/136	79/115
	16:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	86/103	93/68	86/99	43/98	109/136	79/115
04/06	9:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	86/103	93/68	86/99	43/98	109/136	79/115
	17:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	86/103	93/68	86/99	43/98	109/136	79/115
05/06	8:30	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	87/103	90/67	83/99	43/97	100/136	79/115
	16:30	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	87/103	90/67	83/99	43/97	100/136	79/115
06/06	8:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	87/103	90/67	83/99	43/97	100/136	79/115
	16:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	87/103	90/67	83/99	43/97	100/136	79/115
07/06	8:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	88/103	85/67	80/99	43/97	100/136	79/115
	16:00	-	950	-	990	1050	80/84	81/104	88/103	85/67	80/99	43/97	100/136	79/115
08/06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09/06	7:30	-	950	-	990	1040	85/84	90/104	90/104	50/65	54/100	42/96	68/135	47/115
	16:00	-	950	-	990	1040	85/84	90/104	90/104	50/65	54/100	42/96	68/135	47/115
10/06	8:00	-	950	-	990	1040	85/84	90/104	90/104	50/65	54/100	42/96	68/135	47/115
	16:30	-	950	-	990	1040	85/84	90/104	90/104	50/65	54/100	42/96	68/135	47/115
11/06	10:00	-	950	-	990	1040	85/84	90/104	90/104	50/65	54/100	42/96	68/135	47/115
	15:30	-	950	-	990	1040	85/84	90/104	90/104	50/65	54/100	42/96	68/135	47/115
12/06	9:00	-	940	-	990	1040	83/84	90/104	90/104	50/65	38/100	42/96	49/135	38/115
	16:00	-	940	-	990	1040	83/84	90/104	90/104	50/65	38/100	42/96	49/135	38/115
13/06	9:00	-	940	-	990	1040	83/84	90/104	90/104	50/65	38/100	42/96	49/135	38/115
	15:00	-	940	-	990	1040	83/84	90/104	90/104	50/65	38/100	42/96	49/135	38/115
14/06	9:00	-	940	-	990	1040	83/84	90/104	89/104	50/65	37/100	42/96	49/135	38/115
	16:00	-	940	-	990	1040	83/84	90/104	89/104	50/65	37/100	42/96	49/135	38/115

	P I E Z Ô M E T R O S								
	TUBO ABERTO	CONTRA PRESSÃO				HIDRÁULICOS			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Cota Inicial Prevista	-13,00	-13,00	-13,00	-13,00	-13,00	-13,00	-13,00	-13,00	-13,00
Posição do Terreno Natural	- 1,50	- 1,50	- 1,50	- 1,50	- 1,50	- 1,50	- 1,50	- 1,50	- 1,50
Cota Real da Instalação	-12,85	-13,05	-12,80	-12,95	-12,65	-12,80	-13,00	-12,90	-13,05
Cota Piezométrica inferida do lençol	- 2,71	- 2,58	-	- 2,78	- 2,45	- 2,58	- 2,49	- 2,60	- 2,70
Cota Piezométrica esperada do lençol	- 2,75	- 2,75	- 2,75	- 2,75	- 2,75	- 2,75	- 2,75	- 2,75	- 2,75

Tabela A5.2

Tomando como base o piezômetro de tubo aberto, e isto pode ser feito já que as leituras foram feitas com o nível do lençol freático praticamente estável, vemos que ele está bem próximo do esperado e que os piezômetros hidráulicos e de contra pressão forneceram leituras bem próximas do esperado e pouco inferiores.

Os piezômetros de contra pressão apresentaram uma variação média de -3,9% e os hidráulicos de 4,3% em relação ao piezômetro de tubo aberto o que, entretanto, não é significativo para justificar a superioridade de um sistema em relação ao outro em relação a exatidão das leituras.

Em termos de praticidade de instalação e leituras os piezômetros de contra pressão são bem superiores aos hidráulicos além de, o que não pôde ser examinado nesta instalação, seu tempo de resposta ser muito inferior aos hidráulicos já que não necessitam de admissão de água dentro do piezômetro para deslocar o mercúrio da unidade de leitura.

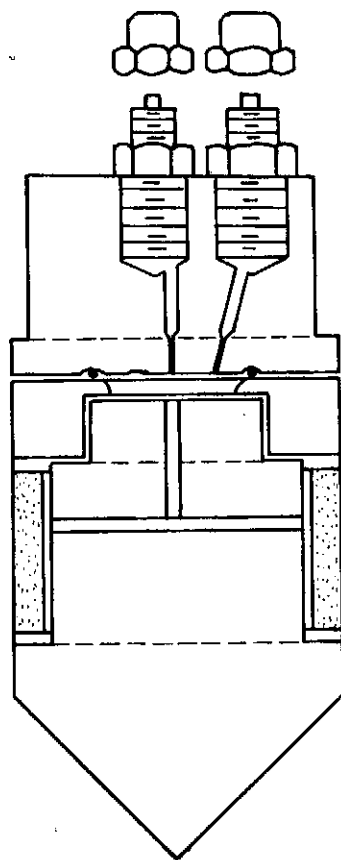


FIG. A 5.1 — Piezômetro de contra pressão fabricado na COPPE.

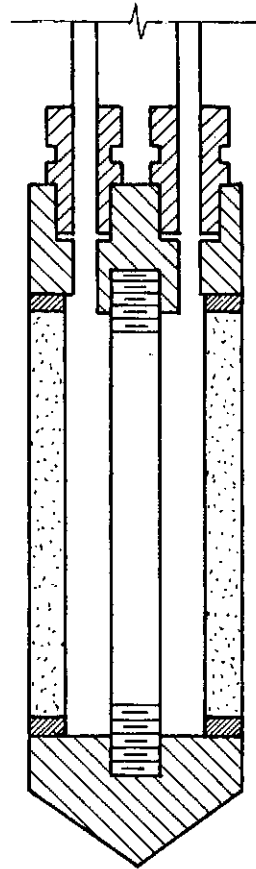


FIG. A 5.2 — Piezômetro hidráulico tipo reto.

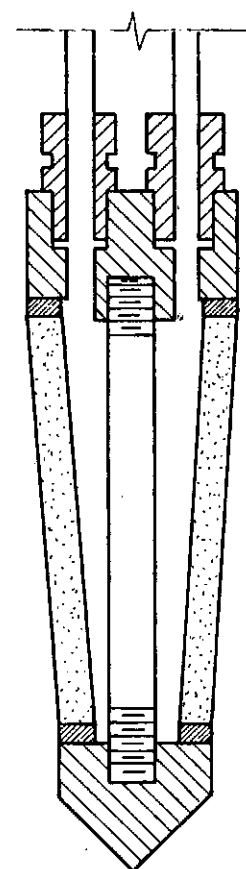


FIG. A 5.3 — Piezômetro hidráulico tipo tronco cônico.

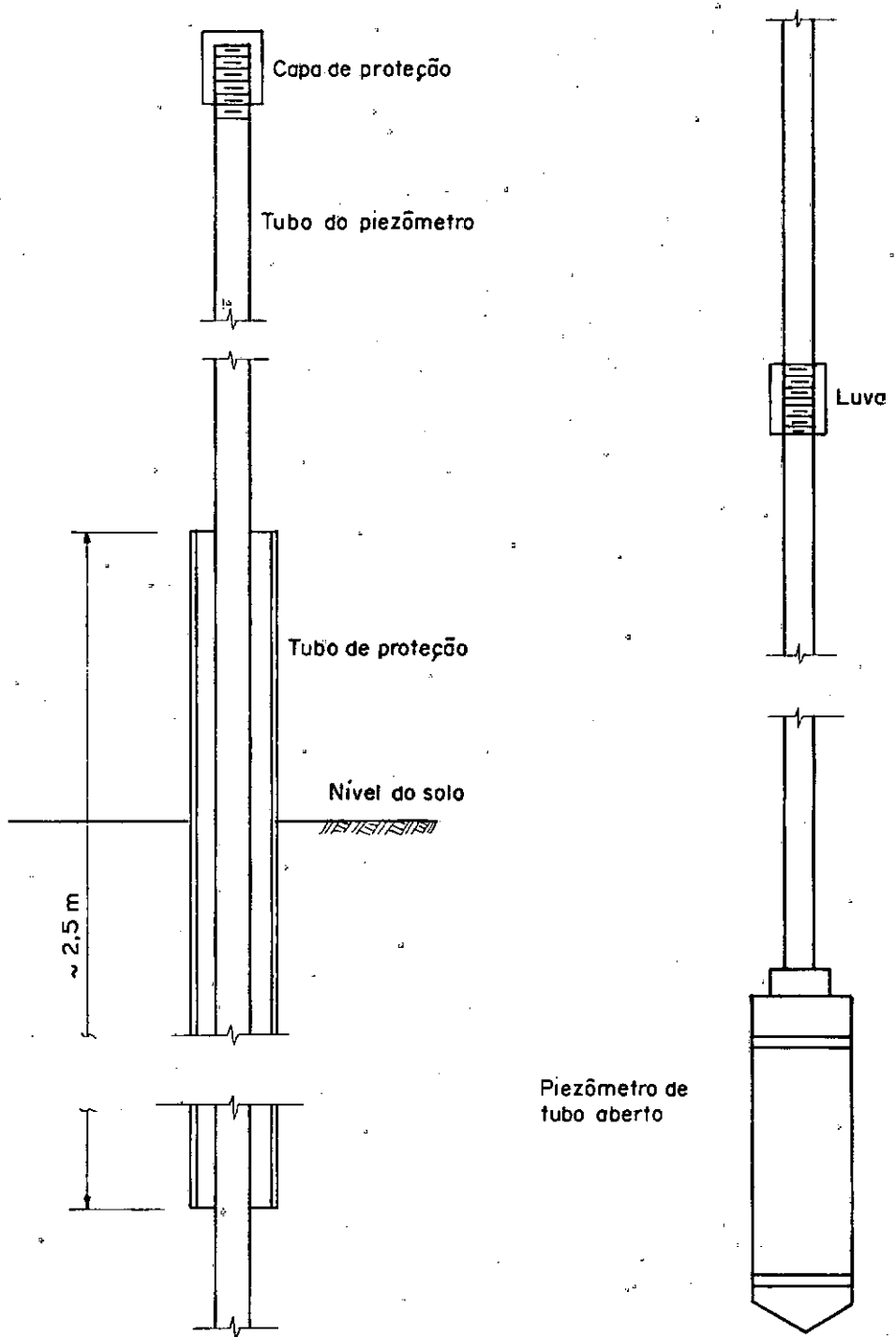
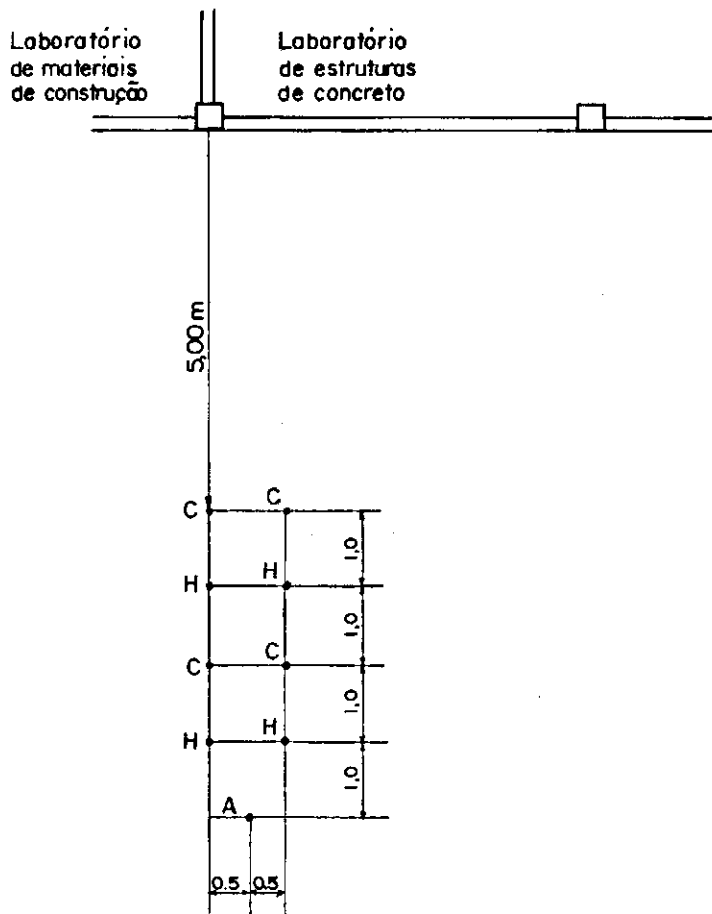
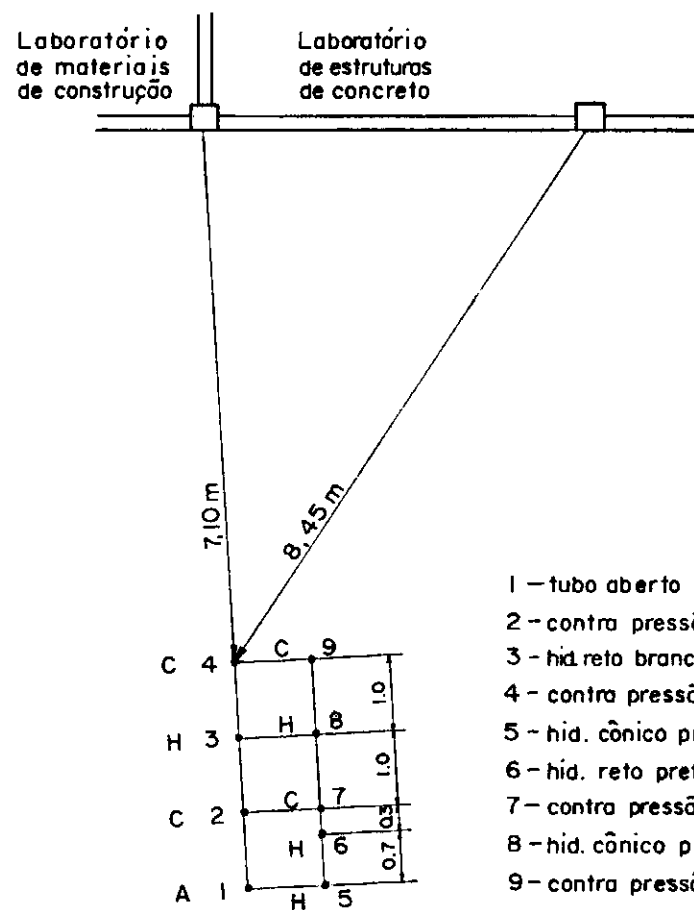


FIG.A5.4 — Piezômetro de tubo aberto e sua instalação.



a) PROPOSTA



b) EXECUTADA

1 a 9 ordem de execução dos furos
 C - piezômetro de contra pressão
 H - hidráulico
 A - tubo aberto

- 1 - tubo aberto
- 2 - contra pressão nº 2
- 3 - hid. reto branco nº 1
- 4 - contra pressão nº 1
- 5 - hid. cônico preto nº 4
- 6 - hid. reto preto nº 3
- 7 - contra pressão nº 3
- 8 - hid. cônico preto nº 2
- 9 - contra pressão nº 4

FIG. A 5.5 — Esquemas de instalação dos Piezômetros. Junto ao Bloco I do Centro de Tecnologia.

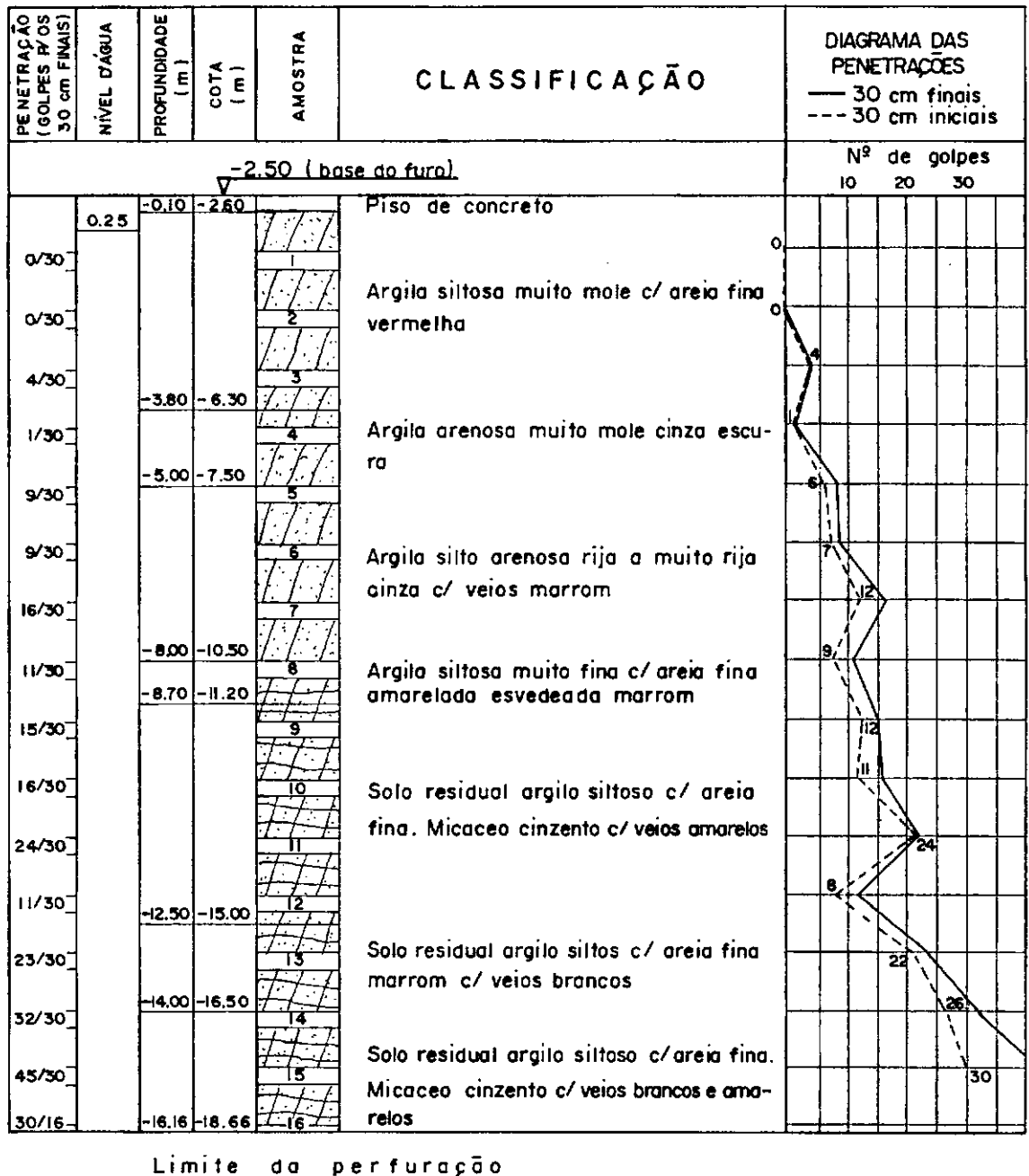


FIG.A 5.6a— Perfil típico das sondagens realizadas no local da placa de reação.

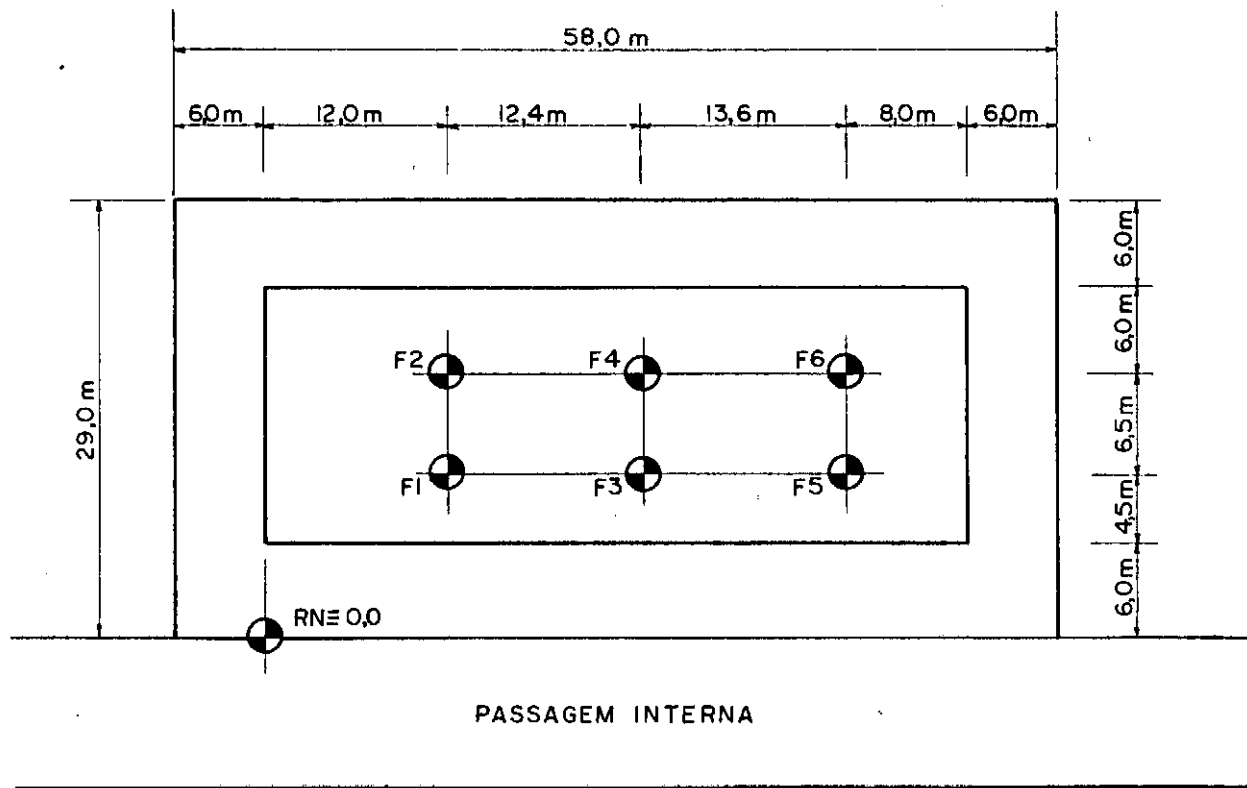


FIG. A 5.6 b — Localização das sondagens realizadas junto a placa de reação, Bloco I , Centro de Tecnologia.

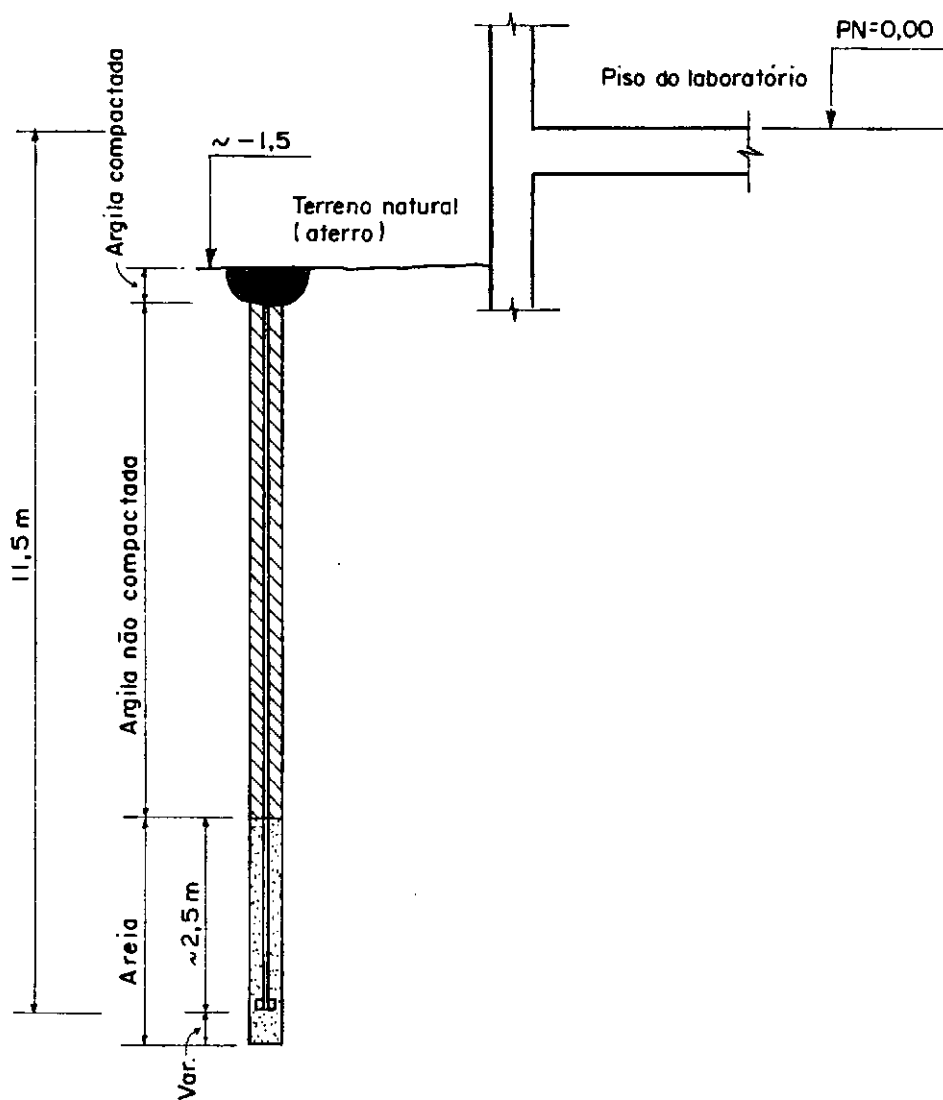


FIG. A5.7 — Esquema de instalação geral dos piezômetros de teste.

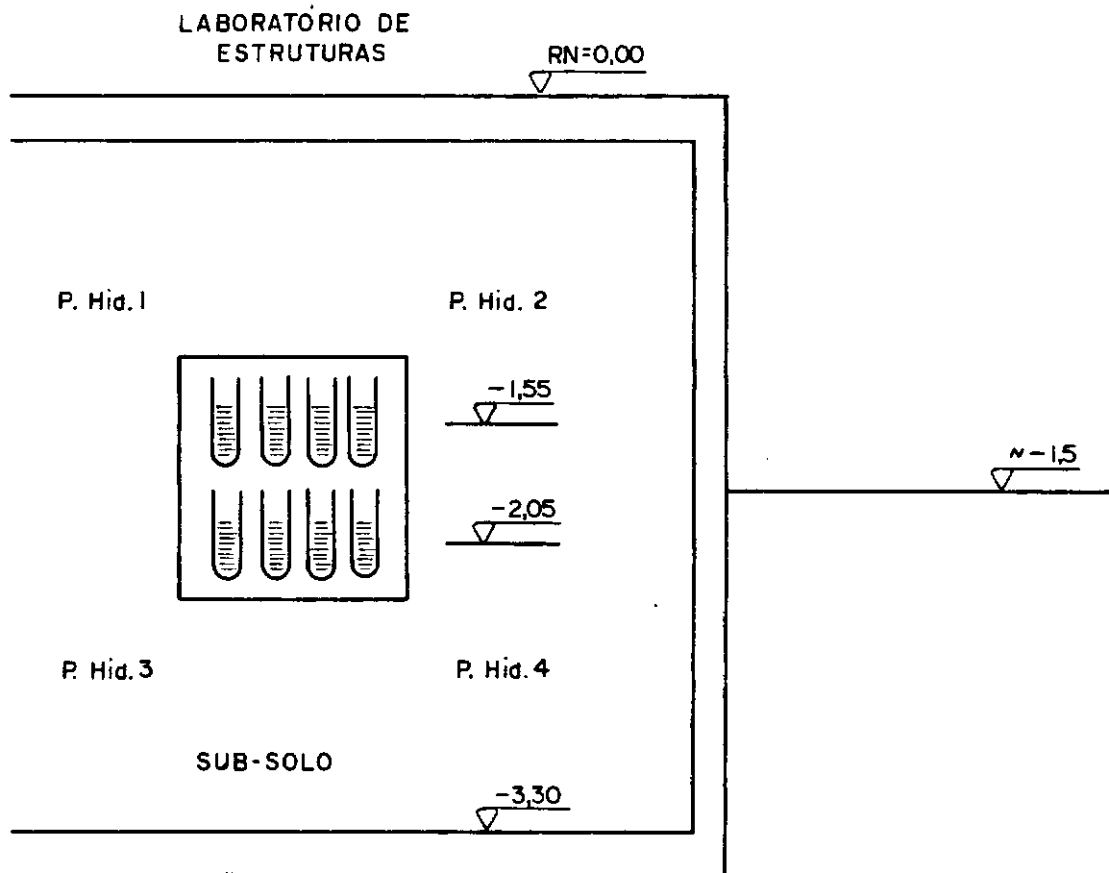


FIG. A5.8 — Posição de instalação da unidade de leitura dos piezômetros hidráulicos .

SIMBOLOGIA

- A área da seção transversal do cilindro de reação da célula de carga;
- Bar medida de pressão equivalente a $1,01967 \text{ kg/cm}^2$;
- b base de medida dos extensômetros mecânicos;
- cm centímetro;
- D diâmetro do cilindro de reação da célula de carga;
- d diâmetro do furo central das células de carga para tirantes;
- E módulo de elasticidade do aço;
- f frequência de vibração da corda vibrante tensionada;
- fo frequência inicial de vibração da corda vibrante;
- g grama;
- K constante de proporcionalidade do extensômetro elétrico;
- m prefixo grego denotativo de 10^{-3} ;
- m metro
- min minuto;
- mm milímetro;
- P esforço aplicado à célula de carga;
- R resistência elétrica nominal dos extensômetros;
- RN referência de nível;
- r raio da seção transversal do cilindro de reação da célula de carga;
- s segundo;

t_l	temperatura de laboratório da célula de carga;
T_c	temperatura de campo da célula de carga;
t	tonelada;
V	volt;
γ	peso específico;
Δ	variação da resistência do extensômetro elétrico;
δ	deformação específica da célula de carga;
σ	tensão admissível do aço à compressão;
λ	coeficiente de proporcionalidade do aço em relação à temperatura;
Ω	resistência elétrica;
ρ	resistividade do material do extensômetro elétrico;
μ	prefixo designativo de 10^{-6}
ϵ	deformação da base da célula de carga
\varnothing	graus em temperatura em escala Celcius;
"	polegadas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - (1979) - "Glos
sário de Termos Técnicos de Geologia de Engenharia"
- ABGE 1ª edição.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - (1965) - "Instruments
and Apparatus for Soil and Rocks Mechanics" - ASTM
STP 392.
- AREAS, O.M. (1963) - "Piezômetros em Três Marias" - II COPAMSEF.
- BOURDEAUX, G.M.R.M. - (1976) - "Glossário de Mecânica dos Solos"
- ABGE 1ª edição.
- BJERRUM, L. et al - (1965) - "Measuring Instruments for Strutted
Excavations" - Proceedings ASCE, Vol 91 SM1.
- BOWLES, B.B. (1977) - "Foundations Analysis and Design" - 2ª edi-
ção McGraw-Hill Ltd.
- BRAND, E.W. e PREMCHITT, J. (1980) - "Shape Factors of Cilindrical
Piezometers" - Geotechnique Vol. 30 nº 4.
- BRAND, E.W. e PREMCHITT, J. (1980) - "Shape Factors of some Non-
-Cilindrical Piezometers" - Geotechnique vol.30 -
Technical Notes.
- BUREAU OF RECLAMATION (1973) - "Design of Small Dams" - United
States Department of Interior.

- CAMARGO, W.M. (1973) - "Instrumentação em Fundações de Barragens" - Relatório do Tema III do X Seminário Nacional de Grandes Barragens.
- CEDERGREEN, H.R. (1967) - "Seepage, Drainage and Flow Nets"-John Wiley and Sons.
- CONSTANZO, J.E. e SUERZUT Jr, H. (1974) - "Simpósio de Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento" -Centrais Elétricas de São Paulo.
- CRUZ, P. e SIGNER, S. () - "Pressões Neutras de Campo e Laboratório em Barragens de Terra" - Separata de Congresso.
- DOMINGUES, L.C. e NAGATO, Y. (1977) - "Notas de Aula de Análise Experimental de Estruturas - COPPE/UFRJ.
- FRISCHAMANN, W.W. e FLEMING, W.G.K. (1962) - "The use and Behavior of Large Diameter Piles in London Clay"-The Structural Engineer, vol. 40.
- FRANZ GLOTZL, BAUMERSSTECHNIK - West Germany - (1974) - Catálogo de Produtos.
- GEOTECNICA - (1977) - Catálogo de Produtos
- GIBSON, R.E. (1963) - "An Analysis of System Flexibility and its Effects in Time-Lag in Pore-Water Pressure Measurements" - Geotechnique.-Vol. 13.1.

- GIBSON, R.E. (1966) - "A Note in the Constant Head Test to Measure Soil Permeability in Situ" - Geotechnique. vol.16.3
- GONÇALVES, S.E. (1978) - "Transdutor de Força Foto-Elétrico" - La Boratório de Dinâmica das Máquinas - COPPE/UFRJ.
- GRIFFIN, W.H. (1967) - "Piezometers Monitor Waterfront Fill " - Civil Engineering (N.Y.)., June.
- HANNA, T.H. (1973) - "Foundation Instrumentation" - Transtech Publications.
- HENDRY, A.W. (1964) - "Elements of Experimental Stress Analysis"- Pergamon press.
- HOLMAN, J.P. (1966) - "Experimental Methods for Engineers"-McGraw-Kogakusha.
- HOUWINK, R. (1958) - "Elasticity, Plasticity and Structure of Water" - Dover Publications.
- USU, S.J.C. (1970) - "Alguns Aspectos Básicos de Instrumentação nas Barragens de Terra e Enrocamento" -IV COBRANSEF Vol.1.
- HVORSLEV, M.J. (1951) - "Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations" - Waterways Experimental Station, Bulletin nº 36.
- INTERFELS - Rock Tests (1972) - Catálogo de Produtos,

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1981) - "Instrumentação para Engenharia Geotecnica" - Catálogo de Produtos.

KYOWA ELETRONIC INSTRUMENTS Co (1979) - General Catalog PI Strain Gauge Instrumentation.

KYOWA ELETRONIC INSTRUMENTS Co (1982) - Civil Engineering Measuring Instruments.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Portugal (1970) - Catálogo de Produtos.

LAMBE, T.W. e WHITMAN, R.V. (1969) - "Soil Mechanics" - Wiley International Edition.

MACHADO Fº, J.G. e ACOSTA, R. (1975) - "Células de Carga Controlam o Comportamento de Estruturas Atirantadas na Rodovia dos Imigrantes" - SICESF, Separata.

MAIHAK, A.G. () - Catálogo de Produtos.

MCCALL, J.L. e McANEAR, C.L. (1971) - "Instrumentation of Earth and Rock-Fill Dams" - Department of the Army, EM1110-2-1908.

MICRO-MEASUREMENTS (1980) - Catálogo 200, Gage Listings Section.

MOREIRA, J.E. () - "Relatórios Internos da COPPETEC.

- MORI, M. (1975) - "Observações do Comportamento de Tirantes Permanentes da Rodovia dos Imigrantes" - Trecho da Serra" - SICESF.
- MOURA, J.P.L. (1979) - "Piezômetros"- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NOWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE () - Catálogo de Produtos.
- ROCHA-FQ, P. (1981) - "Características e Desempenho de Células de Carga Elétrica" - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Relatório Interno do Departamento de Engenharia Civil.
- PEIGNAUD, M. et al (1977) - "Measure and Place em la Pression Intersticielle" - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- PENMAN, A.D.M. (1960) - "Study of Response Times of Various Types of Piezometers" - Conference on Pore Pressure, London.
- ORTIGÃO, J.A.R. (1975) - "Piezômetros Hidráulicos Fabricados pelo IPR" - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Comunicação do SICESF, COPPE/UFRJ.
- SILVA, F.P. (1970) - "Uma Nova Célula de Medida de Pressões Neutras" - IV COBRAMSEF Vol II, Tema I.

- SILVEIRA, J.F.A. (1978) - "Um Método de Interpretação Quatitativa dos Resultados Obtidos na Obseração de Carga de Tirantes em Rocha" - Geotecnia nº 22.
- SILVEIRA, J.F.A. (1979) - "Glossario de Instrumentação" - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1ª edição.
- SOARES, M.M. (1979) - "Instrumentação de Escavações - Experiência da COPPE" - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- SOARES, M.M., (1981) - "Instrumentação de Escavações - Experiência da COPPE" - COPPE/UFRJ; Tese de Doutorado.
- SOIL INSTRUMENTS LIMITED () - Catálogo de Produtos.
- SOLOTESTE ENGENHARIA LTDA (1972) - Relatório das Sondagens Executadas no Local da Placa de Reação, Centro Tecnológico, Ilha do Fundão
- SCOTT, A. (1978) - "Strain Gauges" - Engineering London May.
- SCOTT, J.D. e KILGOUR, J. (1967) - "Experience with some Vibrating Wire Instruments" - Cannadian Geotechnical Journal, V4 nº1.
- SLOPE INDICATIOR Co. () - Catálogo de Produtos.
- TERRA TECHNOLOGY COURP. () - Catálogo de Produtos.

TERRAMETRICS INC. () - Catálogo de Produtos.

TERZAGHI, K. (1942) - "Theoretical Soil Mechanics" - John Wiley and Sons Inc.

TERZAGHI, K. e PECK, R.B. (1967) - "Soil Mechanics in Engineering Practice" - John Wiley and Sons Inc., 2ª edição.

TSCHEBOTARIOFF, G.P. (1951) - "Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures" - McGraw-Hill Book Co.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1968) - "Earth Manual" - USBR, Denver.

VIEIRA NETO, A. et al. (1975) - "Danificação da Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento" - SICESF.

WARLAM, A.A. e THOMAS, E.W. (1965) - "Measurement of Hydrostatic Uplift Pressure and Spillway Weir with and Piezometers" - Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM, STP nº 392.

WERNECK, M.L.G. (1975) - "Alguns Resultados do Aterro-Teste Instrumentado no Local da Barragem de Empingham, Inglaterra" - Publicação Técnica COPPE/UFRJ.

WHITTAKER, T. (1963) - "Load Cells for Measuring the Base Loads in Bored Piles and Cylindrical Foundation" - Boulding Research Station, Cement Pavers, Engineering Series 11.

WINTERKORW, H.F. e FANG, H.Y. (1975) - "Foundation Engineering
Van Nostrand Reynold.