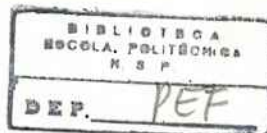




Escola Politécnica - EPBC



31200053626



BT/PEF-8505

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE
O CISALHAMENTO EM LAJES DE
CONCRETO ARMADO

Péricles Brasiliense Fusco
Professor Titular

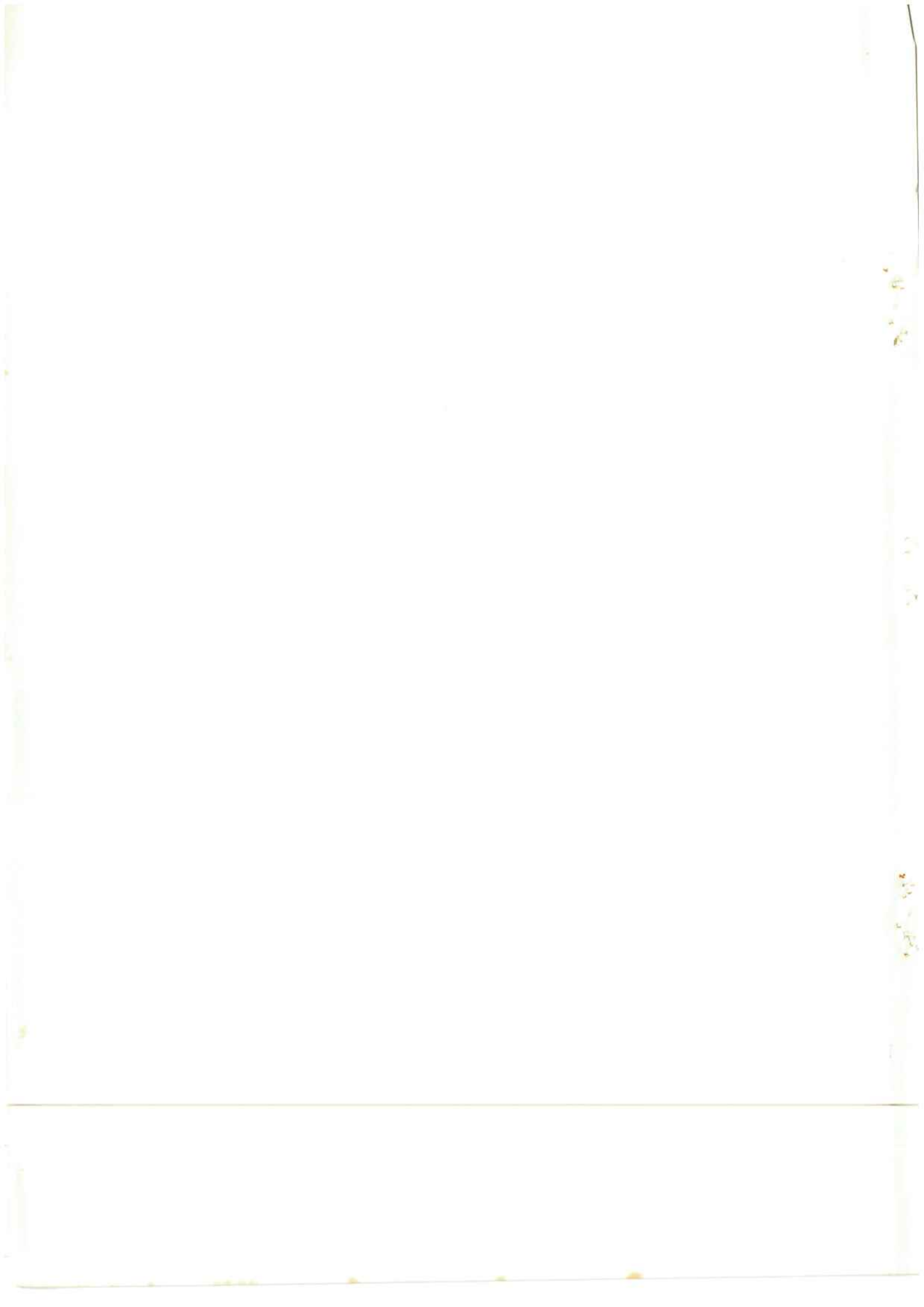
(recebido em 16/7/85)

EDITOR CHEFE

C.E.N. Mazzilli

COMISSÃO EDITORIAL

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| - Engenharia de Solos | W. Hachich |
| - Estruturas de Concreto | P. B. Fusco |
| - Estruturas Metálicas e de Madeira | P. B. Fusco |
| - Interação Solo-Estrutura | C. E. M. Maffei |
| - Mecânica Aplicada | D. Zagottis |
| - Métodos Numéricos | I. Q. Barros |
| - Pontes e Grandes Estruturas | J. C. Figueiredo Ferraz |
| - Teoria das Estruturas | V. M. Souza Lima |



ESCLARECIMENTO PRELIMINAR

Esta publicação foi redigida como parte do relatório final de pesquisa apresentado à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que deu suporte financeiro ao trabalho realizado.

O texto original, que consistia no Capítulo 4 e no Anexo V do referido relatório, foi adaptado em alguns poucos detalhes para que se constituísse em publicação autônoma.

O chamado Anexo II do relatório é constituído pela publicação Estruturas de Concreto - Solicitações Tangenciais - 1a. Parte, editada por este Autor através do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP, e o Anexo IV foi agora transformado no Boletim Técnico BT/PEF-8504.

0. BASES DA PESQUISA EXPERIMENTAL

0.1 IDÉIAS EM DISCUSSÃO

A norma brasileira NB-1/78, atual NBR 6118, reduziu drasticamente os limites permitidos para o cisalhamento das lajes sem o emprego de armaduras transversais, em relação ao que era permitido pela NB-1/60.

O emprego corrente da NB-1/78 mostrou que seus critérios precisam ser revistos. A resistência a cisalhamento das lajes depende essencialmente do engrenamento dos agregados e não apenas da resistência à tração do concreto.

Além disto, em casos especiais, particularmente quando existem cargas concentradas elevadas, seria conveniente dispor-se de armaduras transversais que aumentassem eficientemente a resistência a cisalhamento, mesmo no caso de lajes bastante delgadas. O problema torna-se crítico quando existe risco de ruptura por punção.

Neste último caso, a eficiência da armadura pode ser essencial para a sobrevivência da estrutura. O que se procura é um tipo de armadura transversal que efetivamente possa garantir a resistência da laje sem a colaboração da resistência à tração do concreto, numa situação equivalente ao que ocorre com as vigas de concreto armado.

0.2 PROGRAMA DE PESQUISA. IDÉIAS BÁSICAS

Programou-se o ensaio de cinco lajes apoiadas livremente nas quatro bordas e sujeitas a uma carga concentrada em sua região central.

Uma das lajes foi armada apenas à flexão e as demais também ao cisalhamento. A quantidade de armadura transversal foi aumentada gradativamente de uma laje para outra.

Para a realização dos ensaios foi necessário construir uma

estrutura especial de reação.

Durante os ensaios foi determinada a evolução do panorama de fissuração da face tracionada das lajes e foram medidas as tensões em algumas barras da armadura de flexão e em vários estribos da armadura transversal.

A determinação do panorama de fissuração fornece um esclarecimento complementar sobre a distribuição dos esforços internos, em relação aos elementos fornecidos pelas tensões medidas nos elementos da armadura.

Em particular, o panorama de fissuração evidencia a importância do engrenamento dos agregados na transmissão dos esforços de cisalhamento.

As tensões medidas nas armaduras permitem a constatação da eficiência dos estribos, mesmo após o escoamento da armadura de flexão.

Para que os estribos tenham sua eficiência garantida eles foram providos de ancoragens mecânicas, num arranjo especial já imaginado nos primórdios do concreto armado.

0.3 PROGRAMA DE PESQUISAS. RELATO

O relato dos ensaios realizados nesta terceira fase de pesquisa está apresentado na segunda parte deste trabalho.

0.4 CONCLUSÕES REFERENTES À ARMADURA TRANSVERSAL

Os resultados obtidos mostram que as ancoragens mecânicas empregadas nos estribos das lajes garantem para eles o mesmo tipo de comportamento que o apresentado pelos estribos das vigas.

Desta maneira, torna-se possível aumentar a resistência das lajes, particularmente quando submetidas a cargas concentradas elevadas,

pelo emprego de armadura transversal adequada. Nas lajes com armadura transversal a carga última cresceu com a quantidade de estribos, chegando-se a obter praticamente a carga teórica prevista pela Teoria das Charneiras Plásticas.

Em investigação futura procurar-se-á estudar todas as consequências do comportamento deste tipo de estribo nos problemas de punção de lajes.

0.5 CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA

Os resultados obtidos com os ensaios de lajes permitem tirar as seguintes conclusões gerais a respeito do cisalhamento ao concreto estrutural:

- a) O engrenamento dos agregados e o efeito de pino da armadura de flexão são os elementos essenciais na resistência no cisalhamento das lajes.
- b) O esquema resistente do tipo de treliça somente existe na imediata vizinhança de carga concentrada.
- c) O panorama de fissuração indica que a distribuição de esforços internos é condicionada pela presença de armadura transversal. Este aspecto do problema pode ser muito importante em edifícios industriais em que haja lajes com aberturas submetidas a cargas elevadas.

O arranjo da armadura de flexão poderá, neste caso, ser condicionado pela disposição da armadura transversal.

2a. PARTE

PESQUISA EXPERIMENTAL

.1.

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Idéias básicas

De modo geral, a resistência a cisalhamento das lajes de concreto armado não era problema de grande interesse prático, até a vigência da Norma Brasileira NB-1/60. A pouca atenção que este fenômeno despertava era consequência do fato de que, apenas em casos muito especiais, o cisalhamento era determinante para o dimensionamento das lajes.

Esta situação sofreu radical modificação com os critérios introduzidos pela NB-1/78, atual NBR 6118. O cisalhamento das lajes passou a ser fonte de profundas dificuldades de projeto.

As dificuldades surgidas decorreram da drástica redução dos limites impostos para a dispensa da armadura de cisalhamento nas lajes.

Com o emprego corrente da nova NB-1 (NBR 6118), percebeu-se que os critérios por ela adotados, decorrentes do Código Modelo CEB-FIP, não poderiam subsistir nas normas brasileiras. Os resultados práticos do emprego dos novos critérios estavam em contradição com fatos experimentais de conhecimento já consolidado.

Para elucidar a questão, foi realizada a investigação teórica relatada no Anexo II (páginas 139 a 199).

As investigações aí relatadas mostraram que a resistência a cisalhamento das lajes, ao invés de depender essencialmente da resistência à tração do concreto, é também função do engrenamento dos agregados e do efeito de pino da armadura de flexão.

As conclusões finais do estudo apresentado no Anexo II foram divulgadas em âmbito nacional, tendo já sido aprovadas pela Comissão de Estudos da ABNT que reformula as normas referentes aos projetos de estruturas de concreto armado e protendido.

Dois fenômenos porém mereciam uma investigação experimental esclarecedora, que melhorasse o seu entendimento.

O primeiro deles consistia em se saber até que ponto a eficiência do engrenamento dos agregados poderia depender do alongamento das armaduras de flexão. É óbvio que deve existir um alongamento além do qual a abertura das fissuras impede que o engrenamento dos agregados colabore na transmissão dos esforços diagonais devidos ao cisalhamento. O problema é saber se essa limitação é determinante para a resistência da peça.

A segunda indagação era referente à efetiva possibilidade de emprego de armaduras transversais para se aumentar a resistência ao cisalhamento das lajes. Este aspecto do problema é muito importante, particularmente quando ele se particulariza no caso da punção. O emprego de armadura de cisalhamento em lajes sempre foi olhado com suspeita, em virtude da exigüidade do espaço disponível para o arranjo dessas armaduras.

1.2 - Objetivos gerais

Os objetivos principais desta fase da investigação são os seguintes:

- a) Verificar se a transmissão de forças cortantes pode ser mantida pelo engrenamento dos agregados, associado ao efeito de pino de armadura de flexão, mesmo quando ocorre o escoamento das armaduras de flexão. Com esta verificação, procura-se ter certeza de que a ocorrência do estado limite último de alongamento plástico excessivo, por escoamento das armaduras de flexão, não acarreta a perda da contribuição do engrenamento dos agregados, na resistência das lajes ao cisalhamento.
- b) Verificar a exequibilidade do emprego de armaduras transversais em lajes.

Da análise dos resultados de outras investigações por nós realizadas a respeito da ancoragem das armaduras das peças de concreto

armado, restou-nos a convicção de que o mau desempenho das armaduras de cisalhamento em lajes decorria de deficiências de ancoragem e da falta de retilíneidade dos ramos resistentes dos estribos.

Procurando contornar esta dificuldade, buscou-se um arranjo de armadura transversal que tivesse os ramos resistentes perfeitamente retilíneos e que garantisse a perfeita ancoragem de suas extremidades. Chegou-se assim à forma de estribo mostrada na Figura 2 e nas Fotografias 4 e 5. É importante assinalar que praticamente o mesmo tipo de armadura já havia sido preconizada por Thaddeus Hyatt em meados do século passado, conforme citação de Emperger (Handbuch für Eisenbetonbau, F. Emperger, 3a. Ed., 19 Vol., Berlin, 1921; página 14, figuras 3 e 4).

1.3 - Objetivo específico

O objetivo específico desta fase da investigação é ensaiar lajes quadradas apoiadas nas quatro bordas, submetidas a cargas concentradas providas de uma armadura especial para cisalhamento, tendo em vista analisar o modo de transmissão das forças cortantes em função da fissuração das lajes e a evolução das tensões nos estribos que compõem a armadura transversal.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 - Descrição dos corpos de prova

Foram ensaiadas cinco lajes, sendo uma delas (L 1) desprovida de armadura transversal e as demais (L 2, L 3, L 4, L 5) com armadura transversal em quantidade crescente.

As dimensões dos corpos de prova e a armadura de flexão estão mostrados na Figura 1. A armadura de flexão é igual nas cinco lajes ensaiadas.

Os cantos chanfrados das lajes foram decorrência da

necessidade de facilitar a fabricação do pórtico de reação e de simplificar as operações de instalação dos corpos de prova nesse pórtico de reação. Os cantos chanfrados não alteram significativamente os resultados obtidos, os quais se referem essencialmente a fenômenos que ocorrem na região central da laje.

O tipo de armadura transversal empregado nas lajes L 2, L 3, L 4 e L 5 está mostrado na Figura 2 e nas Fotografias 4 e 5. As quantidades de armadura transversal empregadas estão indicadas nas Figuras 5, 6, 7 e 8.

2.2 - Propriedades dos materiais

As lajes foram concretadas empregando-se agregados de uso corrente na construção civil na área da cidade de São Paulo. O agregado graúdo é constituído por pedra britada, sendo o mesmo material empregado na segunda fase da pesquisa e cuja análise granulométrica está apresentada no Anexo IV (Tabela 1). O agregado miúdo é constituído por areia grossa lavada, sendo também o mesmo material empregado na segunda fase e cuja análise granulométrica está apresentada no Anexo IV (Tabela 2).

Juntamente com as lajes foram moldados corpos de prova de controle da resistência do concreto empregado.

Estes corpos de prova foram rompidos nos mesmos dias dos ensaios das lajes que lhes correspondiam. As resistências à compressão simples destes corpos de prova estão indicadas na Tabela 1. Como já foi esclarecido no Anexo IV, também nesta fase da investigação o valor f_{cc} representativo da resistência do concreto foi tomado como o maior dos dois valores correspondentes a cada laje ensaiada.

As armaduras das lajes foram fabricadas com aço CA-50, tendo sido empregada a bitola $\emptyset 10$ ($\emptyset 3/8$) para a armadura de flexão e a bitola $\emptyset 6,3$ ($\emptyset 1/4$) para os ramos resistentes dos estribos.

Nas tabelas 2, 3 e 4 estão mostrados os resultados dos ensaios à tração de três corpos de prova das barras $\emptyset 6,3$ empregadas nos

estribos. No Gráfico nº 1 estão apresentados os diagramas tensão-deformação correspondentes a este material.

Nas Tabelas 5 e 6 estão apresentados os resultados dos ensaios à tração de dois corpos de prova das barras \emptyset 10 empregadas na armadura de flexão. No Gráfico nº 2 estão mostrados os diagramas tensão-deformação correspondentes a este material.

2.3 - Fabricação das lajes de ensaio

As lajes de ensaio foram confeccionadas com formas de madeira impermeabilizada. Para a concretagem as formas foram apoiadas no piso do Laboratório.

Conforme relatado adiante, a laje L 5 apresentou uma curvatura inicial não desprezível.

Não foram feitos registros fotográficos destas operações pois ainda não havia equipamentos adequados.

2.4 - Arranjo de ensaio

O arranjo de ensaio está mostrado nas Figuras 1 e 3, e nas Fotografias 1, 2, 3 e 4. Foi empregada a mesma instrumentação utilizada na 1ª fase da pesquisa, que está descrita no Anexo III.

Para a montagem de ensaio foi construído um pórtico metálico especial adaptado à laje de reação.

O pórtico de reação é tridimensional, sendo composto por quatro pórticos planos verticais, cada um deles formado por dois pilares tubulares e uma viga superior de reação. A fixação do pórtico à laje de reação é feita por meio de barras Dywidag de 32 mm de diâmetro, com placas especiais de fixação, conforme se mostra nas Fotografias 1 e 2.

Para a colocação da laje de prova em sua posição de ensaio, o pórtico tridimensional é aberto em um dos lados e o corpo de prova é colocado com auxílio da ponte rolante disponível no Laboratório.

Para a visualização da fissuração das lajes, decidiu-se aplicar o carregamento de baixo para cima, como se observa na Figura 1 e nas Fotografias 1, 2, 3 e 4.

Para montagem, antes da aplicação da carga, por meio da prensa hidráulica situada por baixo do corpo de prova, as lajes foram sustentadas pelo pórtico, por meio de quatro grampos especiais, colocados nas vigas superiores, como se mostra nas Fotografias 1, 2 e 3.

A prensa hidráulica foi construída a partir do cabeçote de uma antiga prensa industrial existente no Laboratório. Na extremidade superior do pistão da prensa está adaptada uma articulação esférica, como se vê na Fotografia nº 3. Para facilitar o manuseio da prensa hidráulica, foi construído um carro transportador especial, que é retirado durante o ensaio, ficando a prensa apoiada sobre a laje de reação por meio de calços metálicos.

Entre a articulação esférica situada no topo do pistão da prensa e a laje de ensaio foi colocada uma célula de carga com capacidade de 1.000 kN. A célula de carga tem 130 mm de diâmetro e sobre ela, foi colocada uma chapa de aço que definia a área de carga aplicada.

Na laje L 1 esta chapa era quadrada com 200 mm de lado e 16 mm de espessura. Nas demais lajes empregou-se uma chapa quadrada de 100 mm de lado, também com 16 mm de espessura.

Não se tomou qualquer providência para regularizar o contato das lajes com as vigas periféricas de apoio. Esta decisão decorreu das dificuldades envolvidas em qualquer tipo de regularização que se pretendesse fazer e também, principalmente, porque nas estruturas as vigas não fornecessem vínculos indeslocáveis para as lajes que sustentam.

Preferiu-se, deste modo, permitir que as lajes se acomodassem aos apoios por meio de suas próprias deformações.

Esta decisão, sobre a qual de início não se sabia com rigor da sua correção, mostrou-se depois importante, quando foi ensaiada a laje L 5, que possuía uma significativa curvatura inicial. Os fenômenos aí envolvidos estão relatados adiante.

2.5 - Determinações experimentais

Em cada laje ensaiada foi determinado o panorama de fissuração correspondente a diferentes estágios do carregamento e foram medidas as deformações específicas de 4 barras das armaduras de flexão e de 8 estribos da armadura transversal.

A localização dos extensômetros da armadura de flexão está indicada na Figura 2.

A localização dos extensômetros da armadura transversal está mostrada nas Figuras 5, 6, 7, 8.

Os resultados experimentais referentes às tensões nas armaduras da laje L 1 estão apresentados nas Tabelas 7, 8, 9; os resultados referentes à laje L 2, nas Tabelas 10, 11, 12; os resultados referentes à laje L 3, nas Tabelas 13, 14, 15; os resultados referentes à L 4, nas Tabelas 16, 17, 18; e finalmente, os resultados referentes à laje L 5, nas Tabelas 19, 20, 21.

A evolução conjunta das tensões nos estribos das lajes está mostrada nas Figuras 31, 32, 33, 34. Deve-se notar que os estribos G e H, marcados de um mesmo lado, estão em lados opostos em relação à carga, como indicado nas Figuras 5, 6, 7, 8.

A evolução do panorama de fissuração está mostrada nas Figuras 9, 10, 11, 12 para a laje L 1; nas Figuras 13, 14, 15, 16 para a

laje L 2; nas Figuras 17, 18, 19, 20 para a laje L 3; nas Figuras 21, 22, 23, 24, 25 para a laje L 4; e, finalmente, nas Figuras 26, 27, 28, 29, 30 para a laje L 5.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Tensões na armadura de flexão

As tensões medidas nas barras centrais da armadura de flexão estão apresentadas nas Tabelas 9, 12, 15, 18, 21. Estes valores também estão mostrados de modo conjunto na Figura 35.

A análise destes valores fornece os seguintes resultados:

- a) Não houve igualdade dos quinhões de carga transmitidas aos apoios nas duas direções principais da laje.

Considerando a direção XX como sendo definida pelos apoios 3 e 4 que correspondem à armadura interna, e a direção YY como sendo definida pelos apoios 1 e 2, que correspondem à armadura externa, observa-se nas lajes L 1, L 4, L 5, desde o início, a predominância da transmissão de esforços na direção YY.

Estas diferenças de quinhões de carga foram devidas à não uniformidade do assentamento das lajes nos apoios. Em particular, é importante observar que a laje L 5 foi, por acaso, concretada com uma forte curvatura inicial no plano vertical definido pelo eixo YY.

A laje L 5 comportou-se como apoiada apenas em dois lados, apoios 1 e 2, durante praticamente todo o ensaio. Apenas para cargas superiores a 150 kN houve assentamento também nos apoios 3 e 4.

Na Figura 36 está apresentada a síntese dos resultados referentes às solicitações da armadura de flexão.

As curvas da Figura 36 mostram a capacidade de acomodação das lajes

sobre os apoios. Elas indicam os valores médios das tensões na armadura de flexão, obtidos a partir da média dos quatro extensômetros colocados em cada laje.

Observe-se que estas curvas médias permitem identificar os diferentes comportamentos ocorridos: o comportamento de estágio I, anterior ao início da fissuração, que em todas as lajes correspondeu à carga de 50 kN, como se mostra nas Figuras 9, 13, 17, 21, 25; o comportamento de transição, entre o início da fissuração e a sua sistematização total, que em todas as lajes ocorreu sob a carga de 100 kN, como se observa nas Figuras 11, 15, 19, 23, 28; o comportamento de peça fissurada, onde praticamente não se abrem novas fissuras significativas, mas apenas ocorre a abertura das fissuras já formadas; no caso da laje L 5, foi possível levá-la a um regime de grandes deslocamentos, como se observa na Fotografia 4, com o aparecimento de efeitos de segunda ordem não desprezíveis, como se vê na Figura 36.

Em todos os casos foi possível chegar-se ao escoamento da armadura de flexão, atingir o estado limite último de alongamento plástico excessivo dessa armadura e chegar-se a um estado de ruína de fissuração exagerada, como mostrado nas Fotografias 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, sem que o engrenamento dos agregados tivesse perdido a sua capacidade de transmissão de cargas transversais através das fissuras da laje.

Somente com laje L 5, numa situação de deslocamentos transversais muito grandes, da ordem da espessura da laje, isto é, da ordem de 1/10 do comprimento dos lados, houve início do desengrenamento dos agregados, com tendência a uma ruptura por punção.

- b) Em nenhuma das lajes chegou-se a alcançar a carga de ruína prevista pela Teoria das Charneiras Plásticas para lajes sob carga central concentrada.

A carga de ruína, calculada conforme esta teoria (Telêmaco van Langendonck - Teoria elementar das charneiras plásticas, 1º volume, ABCP, São Paulo, 1970) empregando o valor médio das resistências obtidas para o concreto, vale 229,5 kN.

O delineamento das charneiras plásticas ocorreu de acordo com o previsto para as lajes de concreto armado, como indicado pelas figuras anexas.

As efetivas cargas últimas das lajes L 2, L 3, L 4, L 5, providas de armadura transversal, cresceram à medida que se aumentou a quantidade de estribos. Todas estas lajes foram carregadas numa área central de 10 cm x 10 cm.

A carga última efetiva da laje L 1 foi superior às das lajes L 2 e L 3. Todavia, a laje L 1 foi carregada numa área central de 20 cm x 20 cm.

Estes resultados parecem indicar que a efetiva carga última depende da capacidade de distribuição da carga que se aplica no centro da laje.

A título de comparação, na Figura 36, em traço pontilhado, estão marcadas as retas correspondentes às tensões na armadura de flexão, devidas a momentos calculados em regime elástico (S. Timoshenko - Theory of plates and shells, MacGraw-Hill Co., New York, 1940), sob carga aplicada em área parcial na região central da laje.

Os resultados obtidos mostram que as tensões obtidas poderiam ter sido razoavelmente previstas, neste 5 casos ensaiados, calculando-se os momentos em regime elástico e considerando a carga aplicada na área central $a_1 \times a_1$ correspondente ao parâmetro $\lambda = 0,30$.

Como se mostra na Figura 36, o parâmetro $\lambda = 0,30$ corresponde à difusão da carga concentrada até o nível da armadura de flexão, com inclinação de $\arctg 3/5$ das bielas diagonais em relação ao plano médio das lajes.

A distribuição a 45° até o plano médio da laje, conforme estipula a NBR 6118 parece que deve ser melhor estudada. Esta regra, se aplicada às lajes ensaiadas, levaria às tensões correspondentes a $\lambda = 0,15$, que são obviamente exageradas.

3.2 - Tensões na armadura transversal

As tensões medidas nos estribos instrumentados estão apresentadas nas Tabelas 9, 12, 15, 18, 21. Estes valores estão mostrados de forma conjunta nas Figuras 31, 32, 33, 34.

A análise destes valores fornece os seguintes resultados:

- a) Enquanto não existe um panorama sistematizado de fissuração, os estribos são pouco solicitados. Em muitos casos, os estribos estão até comprimidos, como ocorre normalmente com os estribos das vigas de alma espessa, no início do carregamento.

Tão logo a fissuração se sistematizou, sob a carga de 100 kN, alguns estribos sofreram tensões bastante elevadas, chegando-se até próximo da resistência de escoamento.

À medida que a carga ultrapassa o limite de sistematização da fissuração, os estribos são cada vez mais solicitados, como também ocorre nas vigas.

Estes resultados mostram a plena eficiência do tipo de armadura transversal empregada. Não existe portanto, impedimento a que se possa armar eficientemente as lajes com estribos. A eficiência de funcionamento dos estribos permaneceu intacta mesmo após o escoamento da armadura de flexão.

A manutenção dos esforços nos estribos após o escoamento de armadura de flexão é também uma confirmação da manutenção da transmissão de esforços através das fissuras da laje. Este resultado é importante na consideração do fenômeno da punção.

O fenômeno da punção corresponde à ruptura por desenquadramento das bielas diagonais de distribuição da carga concentrada, antes que ocorra um estado último devido ao escoamento da armadura de flexão.

No estudo da punção e particularmente no estudo das armaduras adequadas

para tal tipo de fenômeno, deve-se ter certeza de que o eventual escoamento da armadura de flexão não vai destruir a resistência existente antes desse escoamento, pois caso contrário existiria o risco de uma ruptura progressiva.

No início desta investigação, pretendeu-se estendê-la ao fenômeno da punção. Todavia, com o andamento dos trabalhos verificou-se que o objetivo seria amplo demais para esta primeira pesquisa, a qual, neste aspecto, restringiu-se ao estudo do tipo de armadura transversal capaz de efetivamente aumentar a resistência das lajes à punção. Este tema terá prosseguimento nas investigações do Laboratório de Estruturas.

- b) A análise das tensões nos diferentes estribos mostra que eles tendem a ser significativamente solicitados apenas no entorno da zona de aplicação da carga concentrada. Parece, portanto, que fora desta região os mecanismos resistentes descritos no item 4.1.2-c do Anexo II são plenamente eficientes.

De acordo com a análise das tensões da armadura de flexão, as lajes L 2 e L 3, conforme resultados mostrados na Figura 35, têm quinhões de carga não muito diferentes nas direções XX e YY. Como se observa nas Figuras 31 e 32, os estribos C, F, H são pouco solicitados, significando que apenas no entorno da carga a armadura transversal é eficientemente solicitada.

No caso das lajes L 4 e L5, os resultados da Figura 35 mostram que houve nítida predominância de transmissão de carga para os apoios 1 e 2, na direção YY. No caso da laje L 5, ela se assentou nos apoios L 3 e L 4 apenas para cargas superiores a 150 kN.

Nestas duas lajes, Figuras 33 e 34, os estribos C e F correspondentes à distribuição da carga na direção YY, também são pouco solicitados. Todavia, como os apoios 2 e 3 não estão sendo mobilizados, então os estribos dispostos na direção XX, como os estribos G e H, estão fortemente solicitados, pois eles permitem a distribuição da carga na direção XX.

3.3 - Panorama de fissuração

Como já relatado, em todas as lajes a fissuração começa com a carga de 50 kN e fica sistematizada com a carga de 100 kN.

Laje L 1

A fissuração da laje L 1 é essencialmente do tipo radial, seguindo a configuração geral imaginada pela teoria das charneiras plásticas.

As Figuras 9, 10, 11 e 12, mostram a evolução desta fissuração.

A evolução do panorama de fissuração mostra que não houve predominância de qualquer das duas direções principais para a transmissão da carga aplicada.

Laje L 2

A fissuração da laje L 2 está mostrada nas Figuras 13, 14, 15, 16.

O início da fissuração, mostrado na Figura 13, parece indicar a predominância da transmissão de carga na direção YY, embora não houvesse qualquer indicação macroscópica de que a laje estivesse melhor afastada aos apoios 1 e 2 que aos apoios 3 e 4. O problema do ajuste dos apoios somente ficou esclarecido com a análise das tensões na armadura de flexão como já foi relatado.

A fissuração final, mostrada na Figura 16, onde também está mostrada a posição dos estribos, sugere que haja influência dos estribos sobre o panorama de fissuração. Esta indicação vai ficando mais clara, à medida que o número de estribos vai aumentando.

Laje L 3

A fissuração da laje L 3 está mostrada nas Figuras 17, 18, 19, 20.

A evolução da fissuração mostra claramente a influência dos estribos. Na

Figura 20, a fissuração delinea duas faixas centrais que se comportem como vigas onde se apoiariam as quatro lajes em que ficou subdividida a peça.

Laje L 4

A fissuração da laje L 4 está mostrada nas Figuras 21, 22, 23, 24.

A evolução da fissuração indica a predominância da distribuição da carga na direção YY, para os apoios 1 e 2.

Somente a partir de 150 kN parece haver franca colaboração resistente na direção XX. Isto é confirmado pela análise das tensões mostradas na Figura 35.

Laje L 5

A fissuração da laje L 5 está mostrada nas Figuras 26, 27, 28, 29, 30.

A evolução da fissuração mostra claramente o comportamento de laje apoiada em apenas dois lados. Este comportamento se altera apenas para cargas superiores a 150 kN.

4. CONCLUSÕES

4.1 - Comportamento da armadura transversal

Os resultados obtidos mostraram que a armadura transversal estudada é plenamente eficiente, não existindo dúvidas sobre sua capacidade de entrar em carga. As ancoragens mecânicas empregadas nas extremidades dos estribos permitem o emprego seguro de armadura transversal em lajes delgadas. O escoamento da armadura de flexão não altera esta possibilidade.

4.2 - Engrenamento dos agregados

O engrenamento dos agregados permite a transmissão de esforços transversais mesmo quando existe uma intensa fissuração da laje,

com fissuras muito próximas umas das outras.

As tensões medidas nos estribos mostram que este engrenamento é mantido mesmo quando as fissuras na face tracionada da laje têm aberturas de vários milímetros. A resistência ao cisalhamento das lajes não é portanto função direta da resistência à tração do concreto empregado, sendo assim confirmada a validade da reformulação proposta no item 4.2.4 do Anexo II para a Norma Brasileira NBR 6118.

4.3 - Influência da armadura transversal

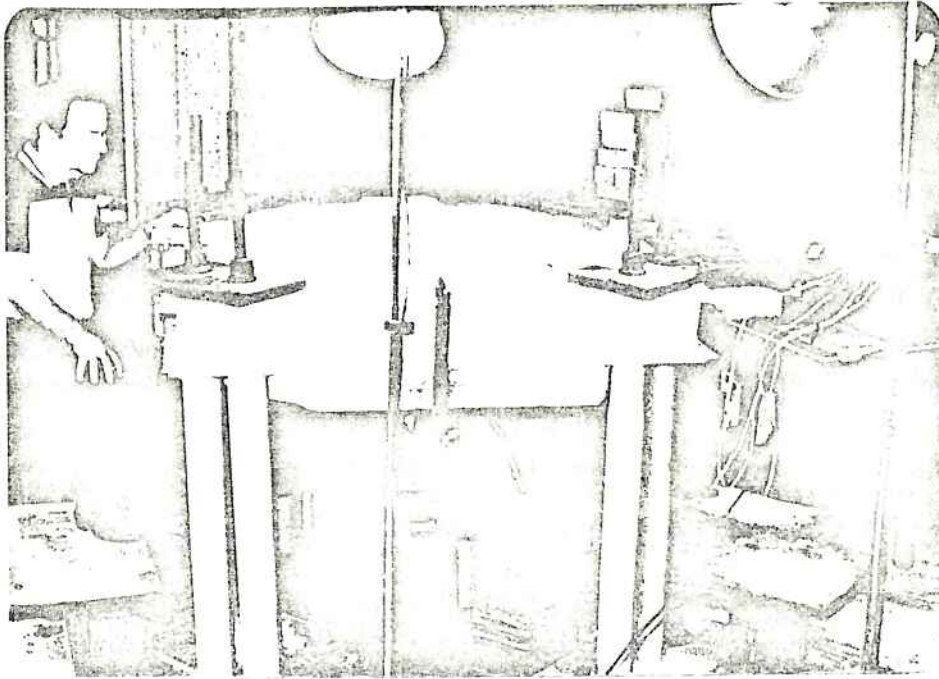
Os resultados obtidos sugerem que a armadura transversal tenha influência significativa sobre a resistência da laje.

À medida que a armadura transversal foi aumentada, também cresceu a carga última da laje. Na laje L5, que teve a maior quantidade de armadura transversal, a carga última diferiu de menos de 5% da carga teórica de ruína prevista pela Teoria das Charneiras Plásticas.

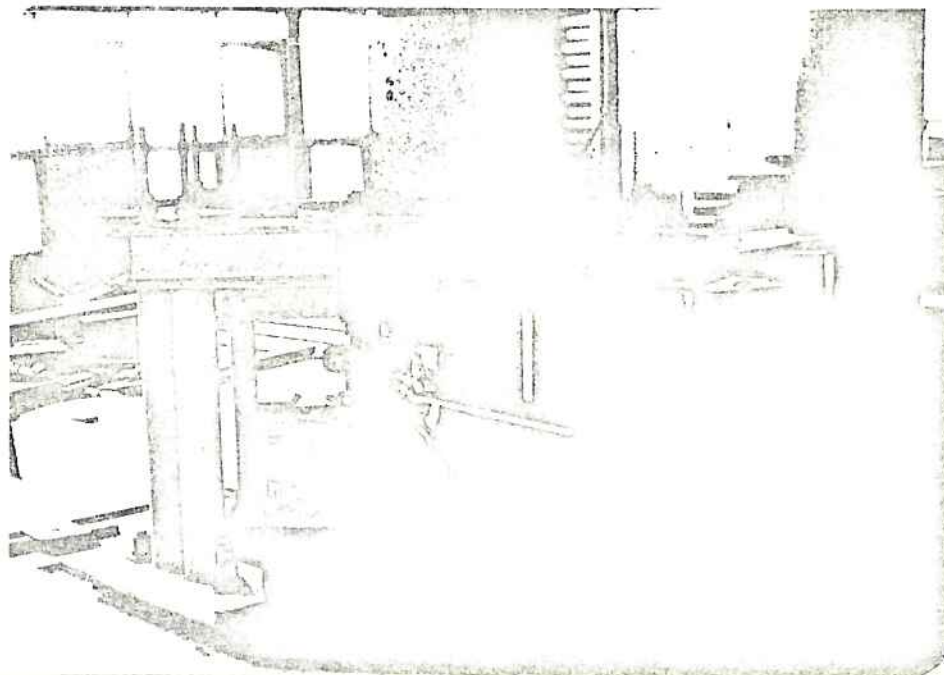
A interação entre a armadura transversal e a resistência à flexão parece provir da distribuição de esforços propiciada pelos estribos, o que sugere a necessidade do emprego da armadura transversal na presença de cargas concentradas elevadas. É necessário reexaminar a adequação das atuais regras de distribuição das cargas concentradas existentes nas Normas Brasileiras.

4.4 - Punção

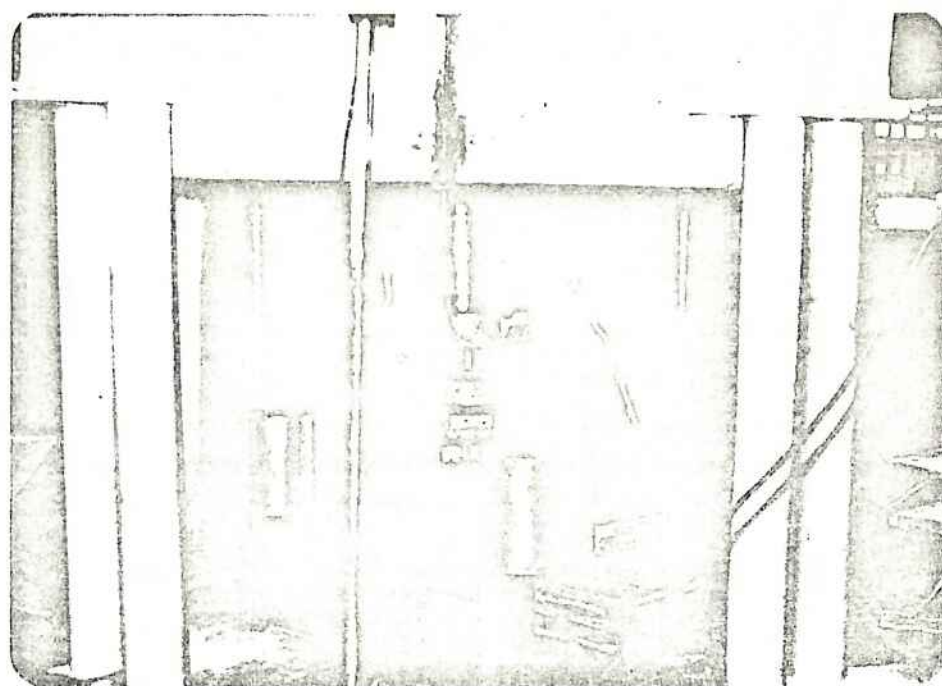
Os resultados sugerem que a armadura estudada possa efetivamente ser empregada para o aumento da resistência das lajes à punção. Este problema deverá ser objeto de nova pesquisa a ser realizada no Laboratório de Estruturas da Escola Politécnica.



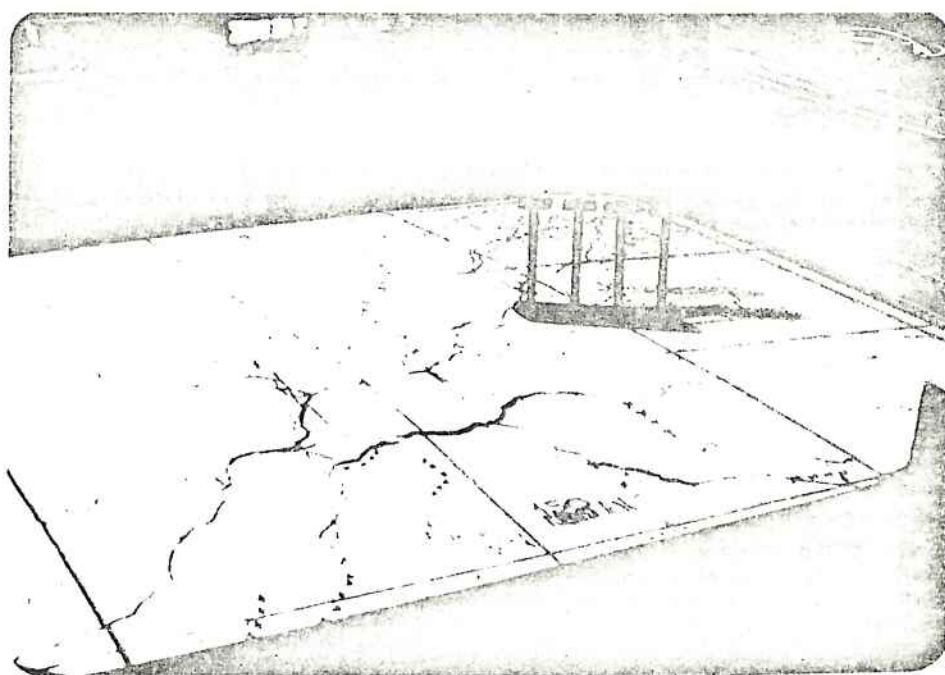
FOTOGRAFIA 1 - ARRANJO DE ENSAIO



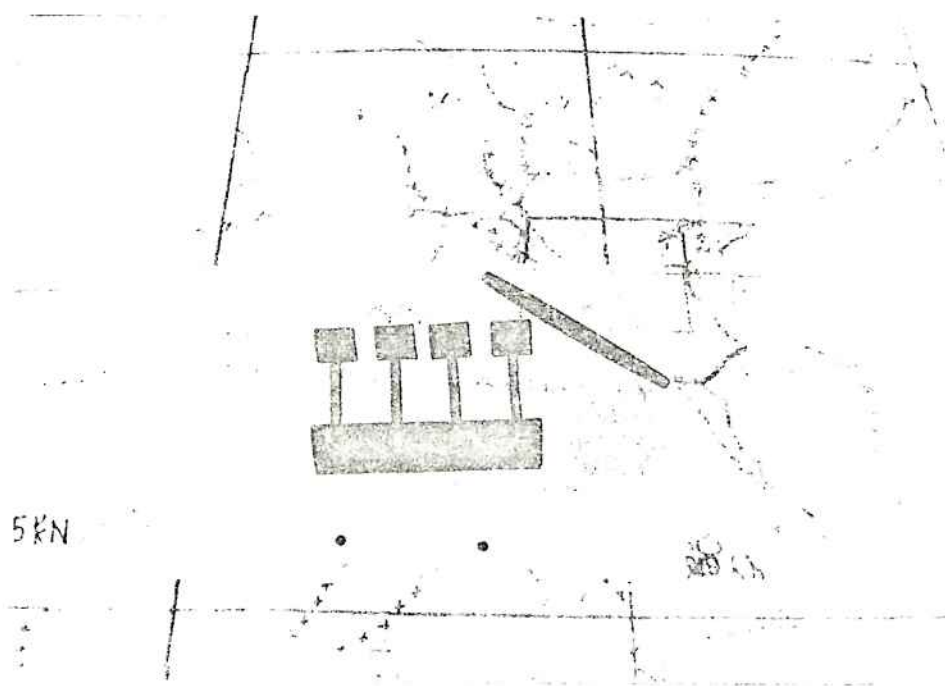
FOTOGRAFIA 2 - PÔRTECO DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO



FOTOGRAFIA 3 - PRENSA HIDRÁULICA E CÉLULA DE CARGA



FOTOGRAFIA 4 - QUADRO DE APOIO E ARMADURA TRANSVERSAL MODULAR



FOTOGRAFIA 5 - MÓDULO DE ARMADURA TRANSVERSAL

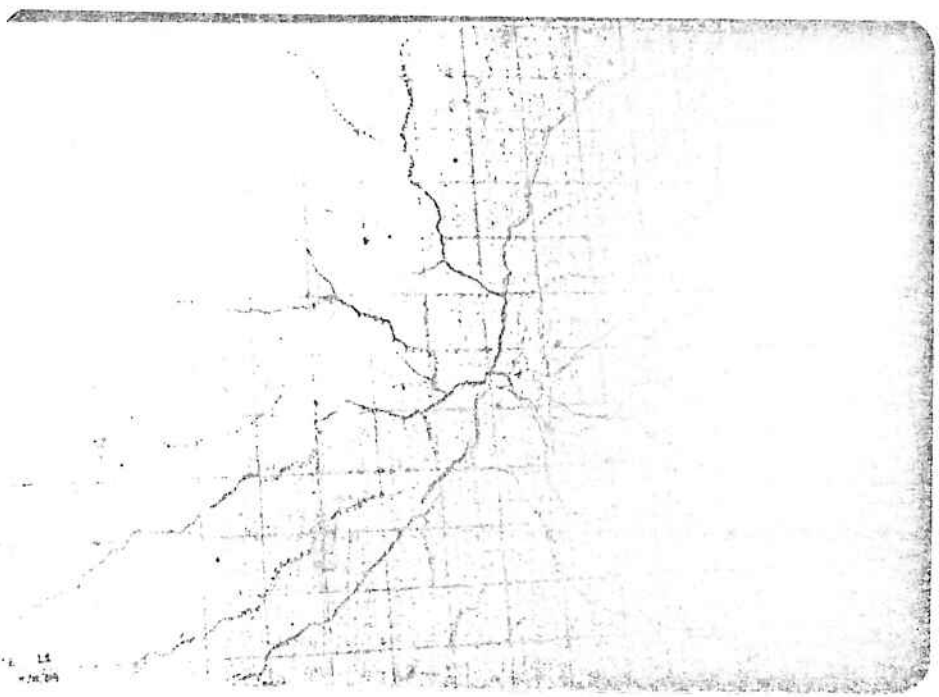


FOTO 6 - FISSURAÇÃO FINAL DA LAJE L 1

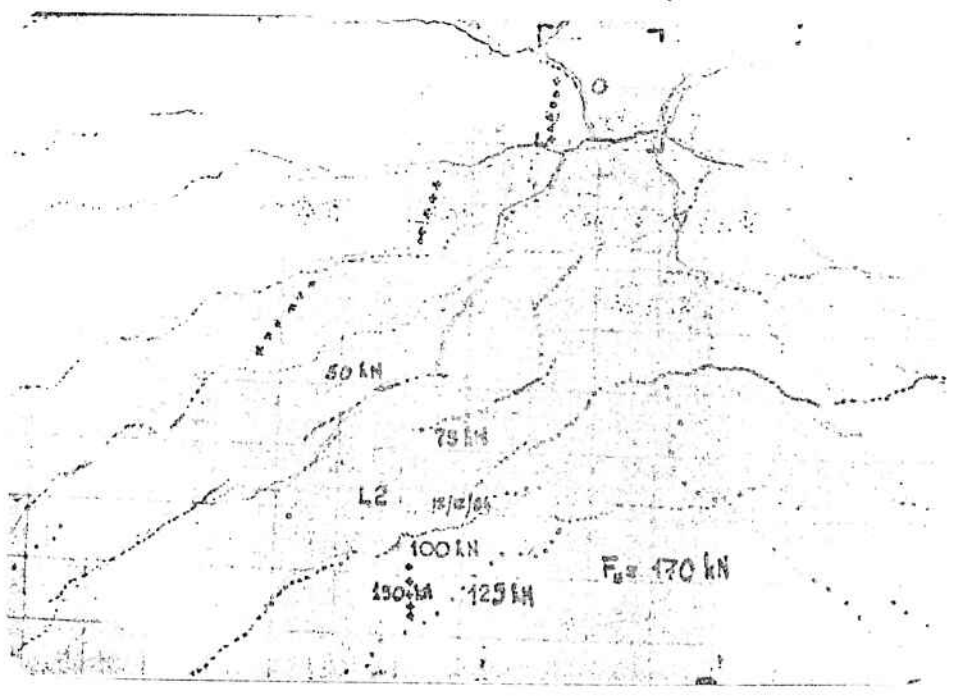


FOTO 7 - FISSURAÇÃO FINAL DA LAJE L 2

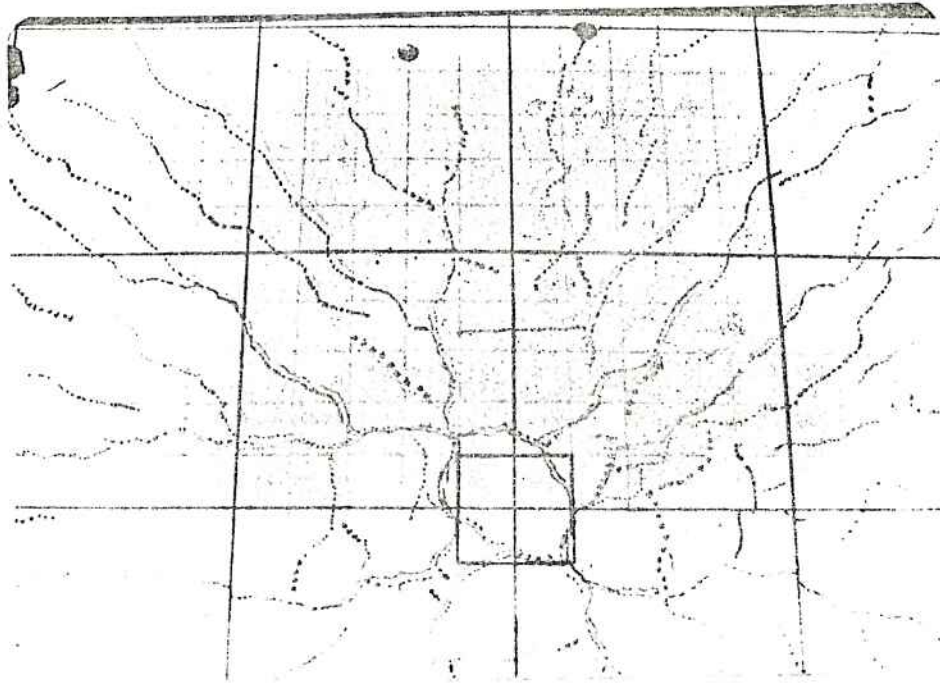


FOTO 8 - FISSURAÇÃO FINAL DA LAJE L 3

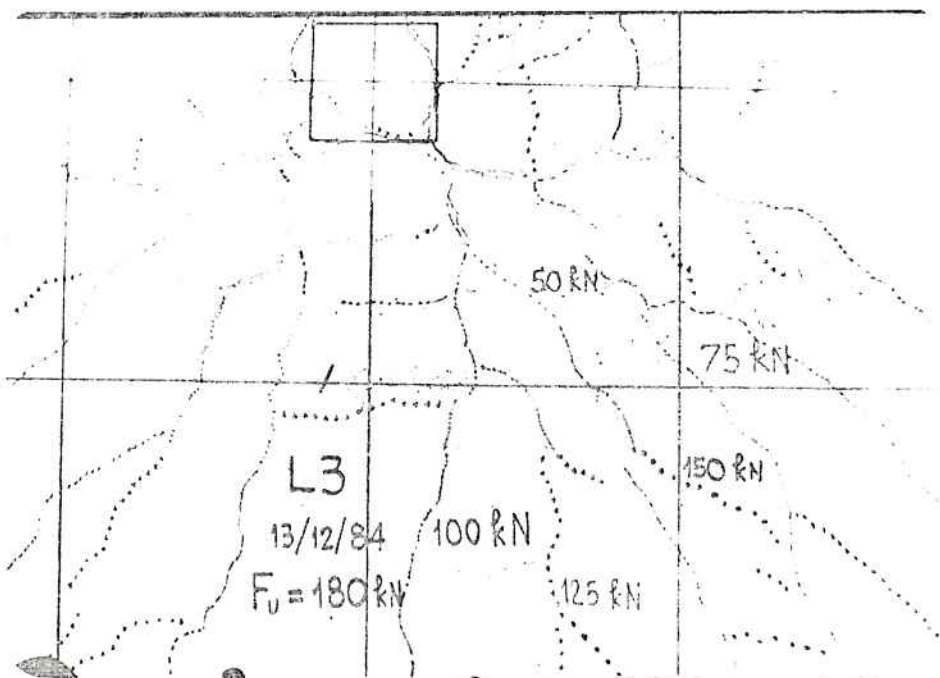


FOTO 9 - FISSURAÇÃO FINAL DA LAJE L 3

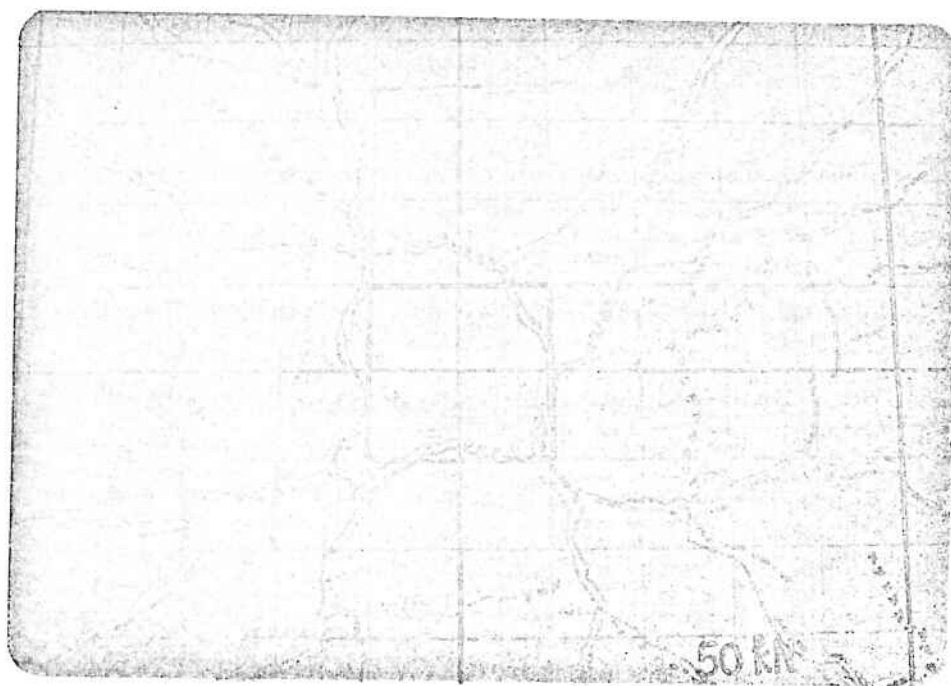


FOTO 10 - FISSURAÇÃO FINAL DA LAJE L 3

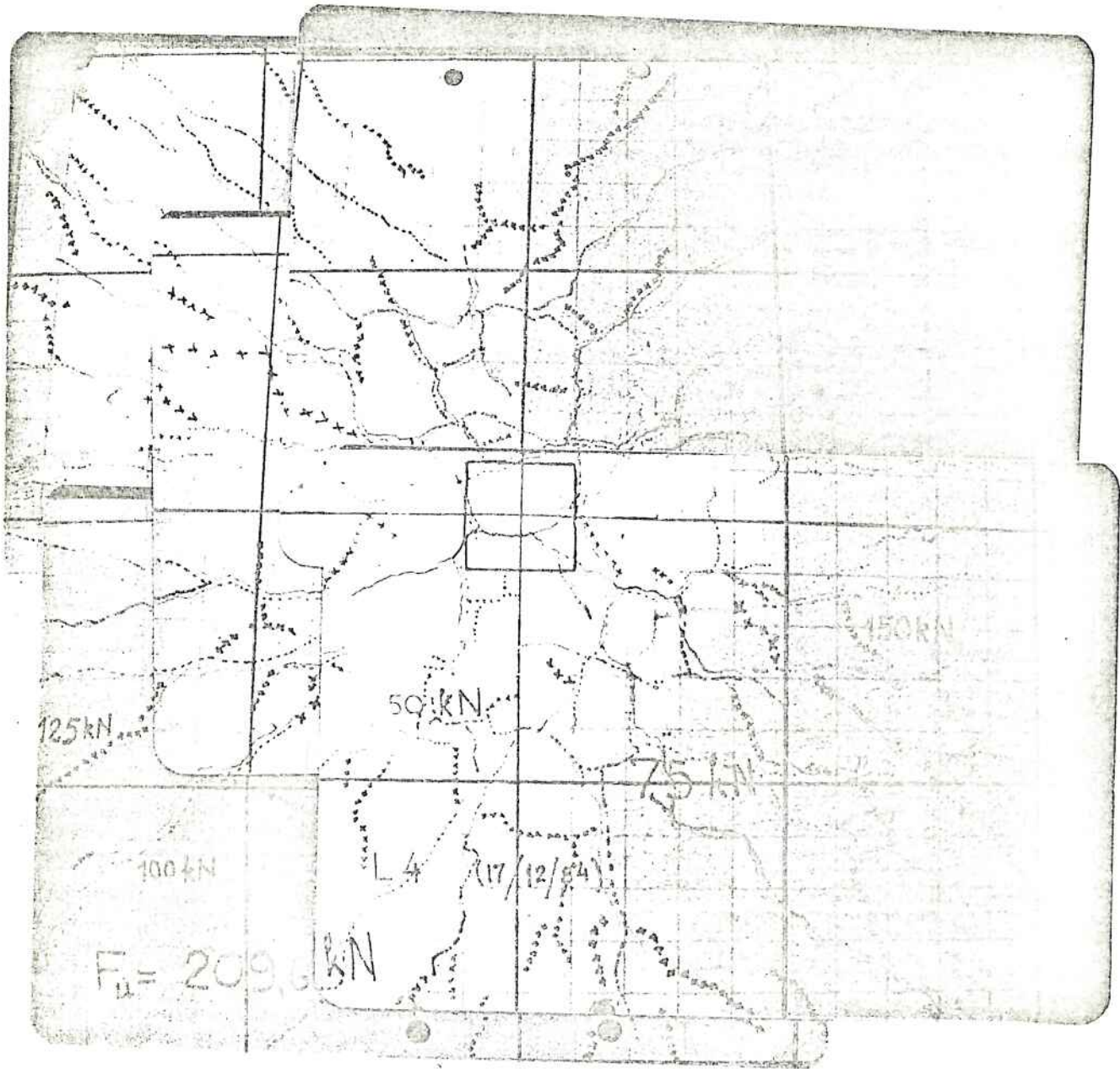


Foto 11

FISSURAÇÃO DA LAJE L 4

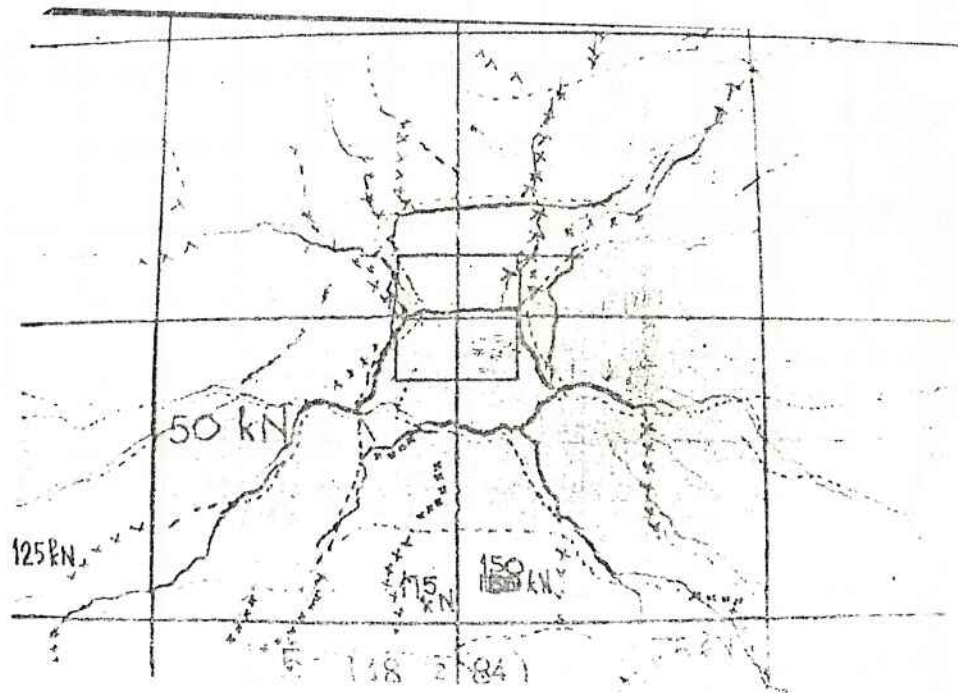


FOTO 12 - FISSURAÇÃO FINAL DA LAJE L 5

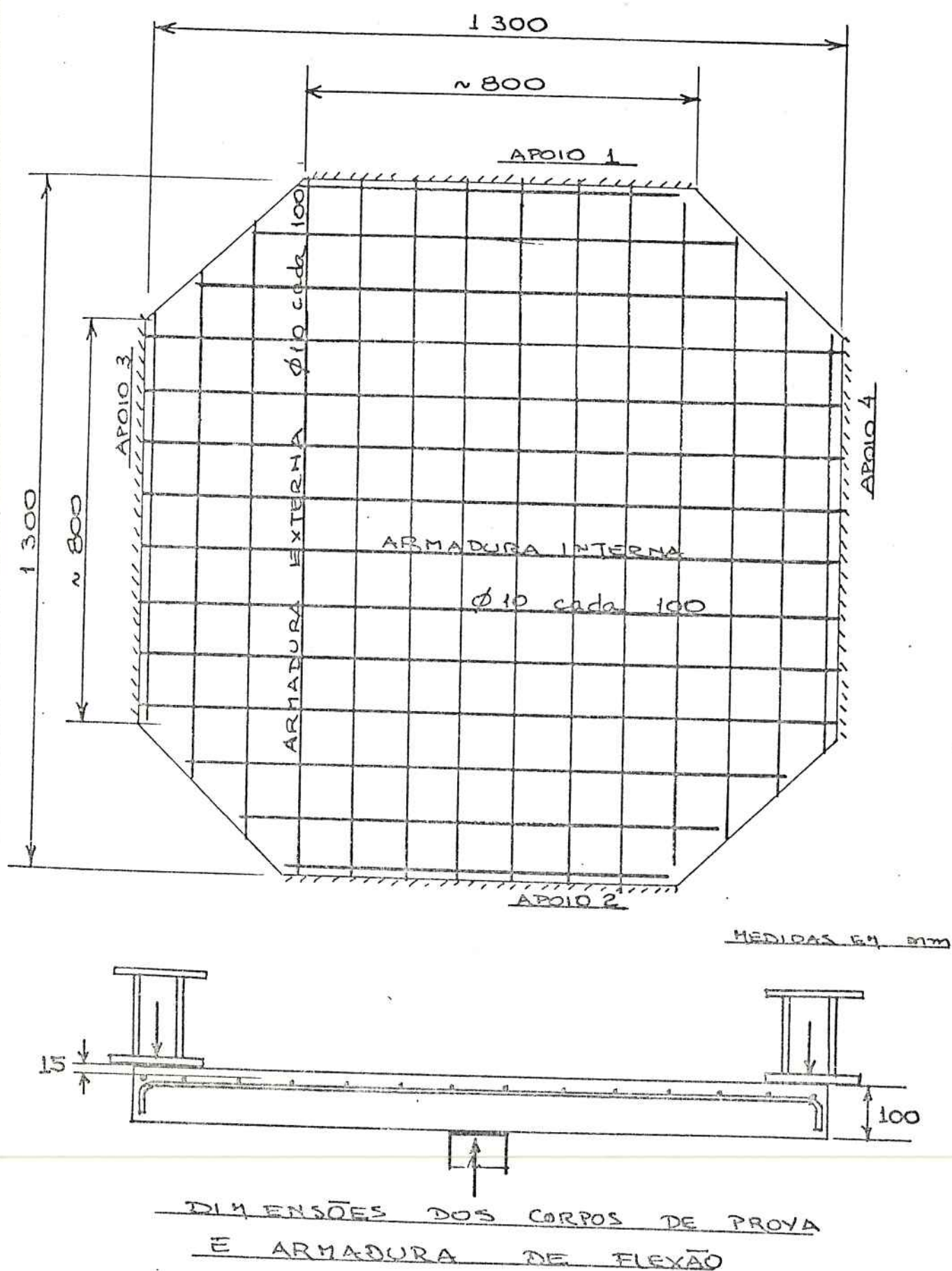


FIGURA 1

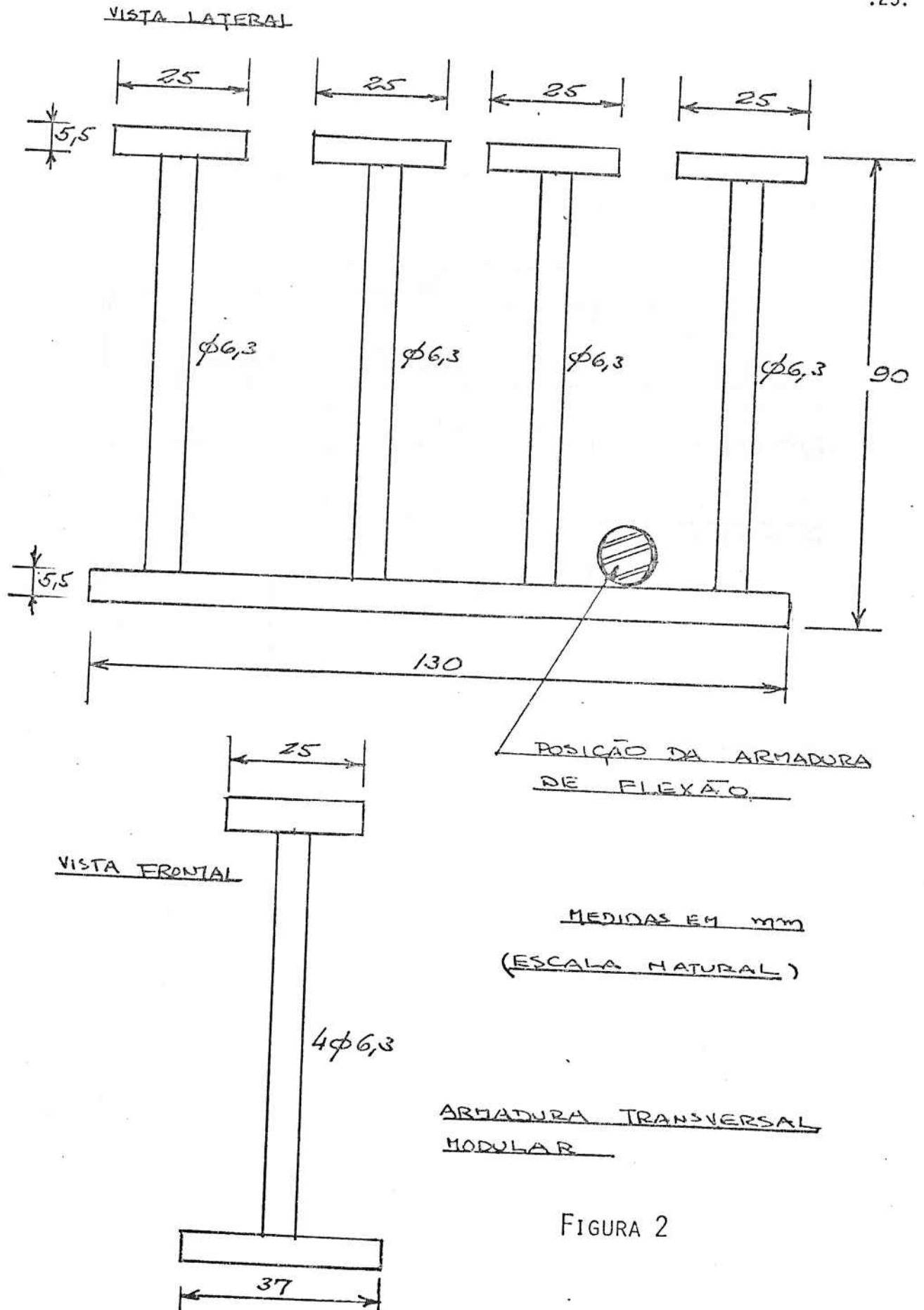


FIGURA 2

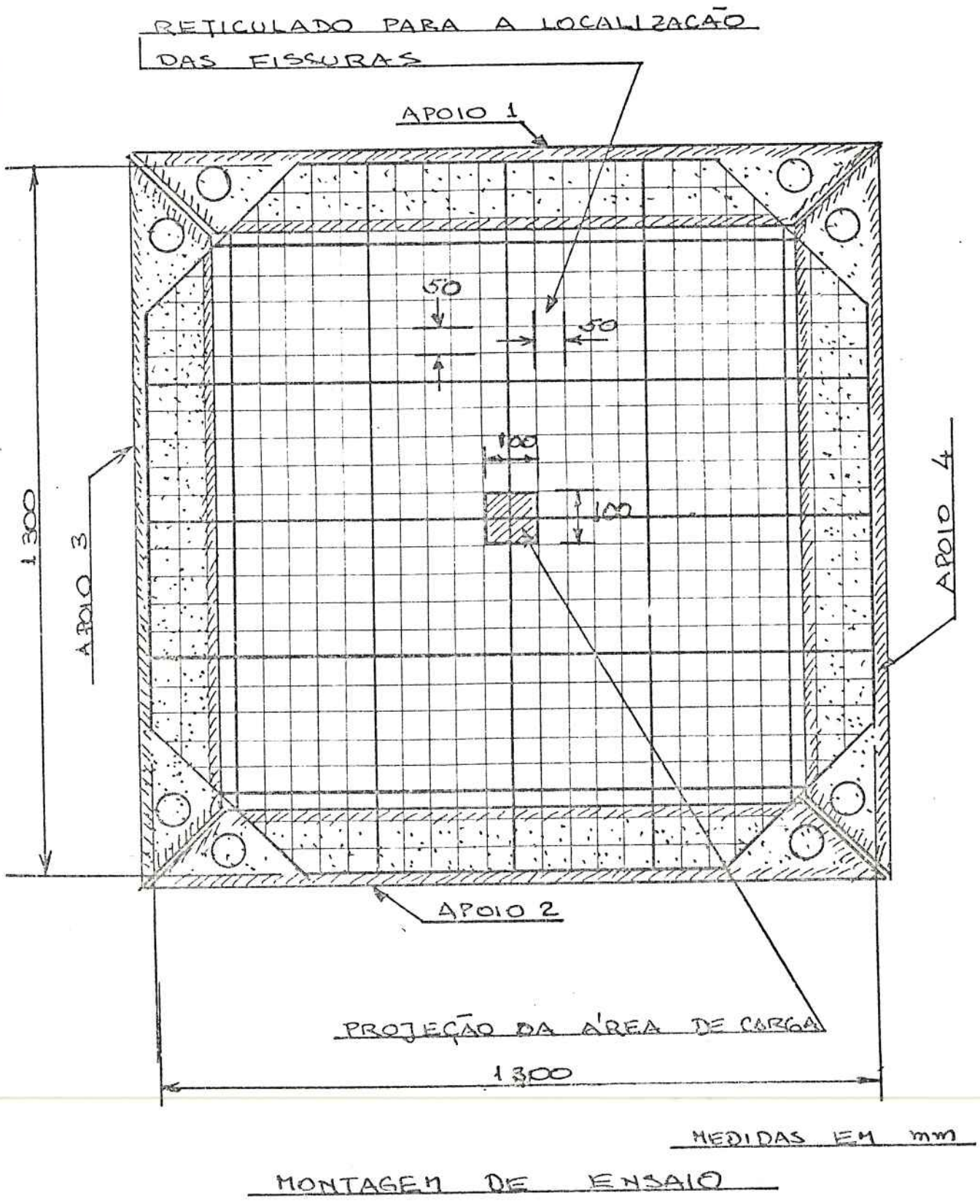
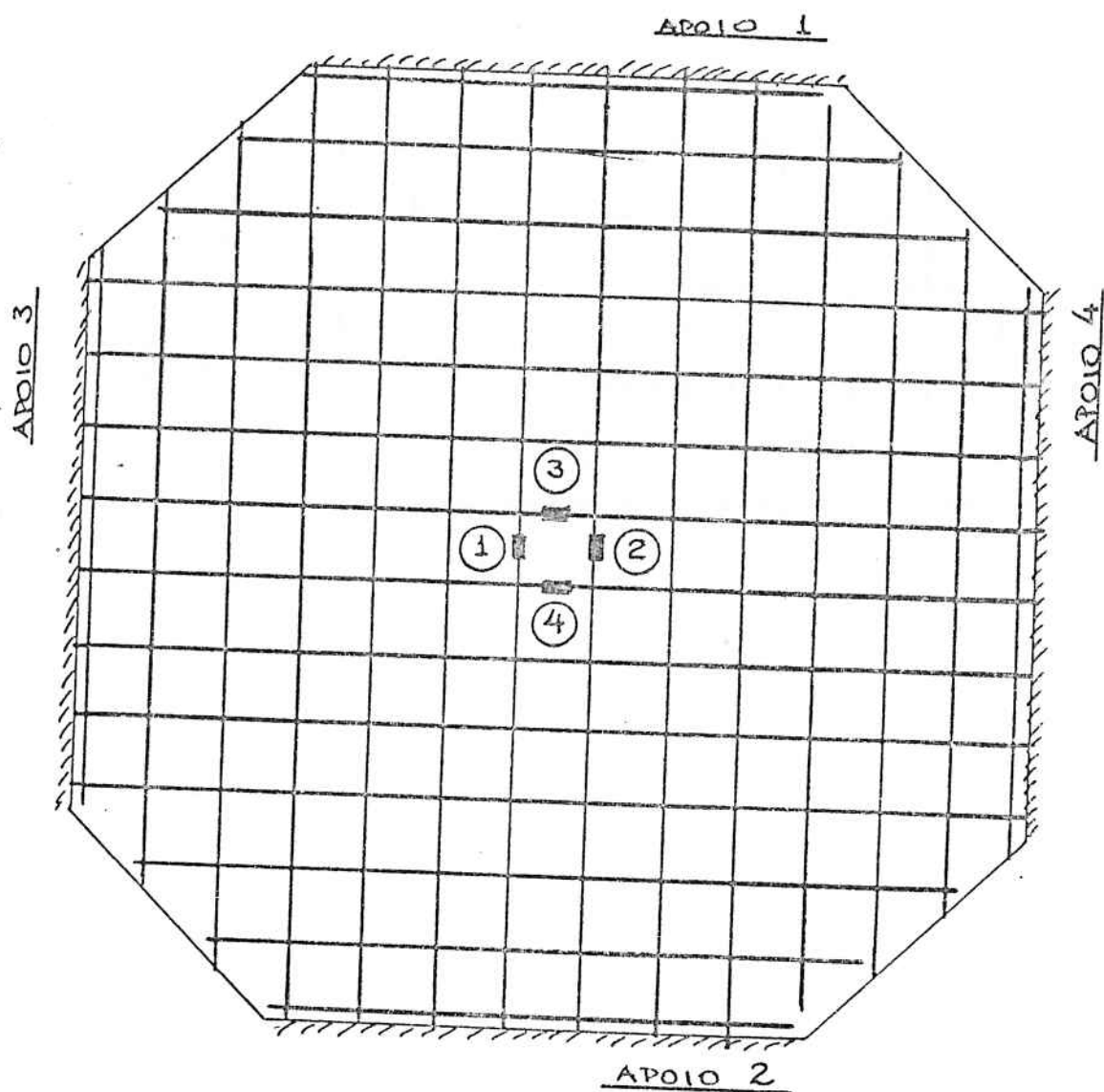


FIGURA 3



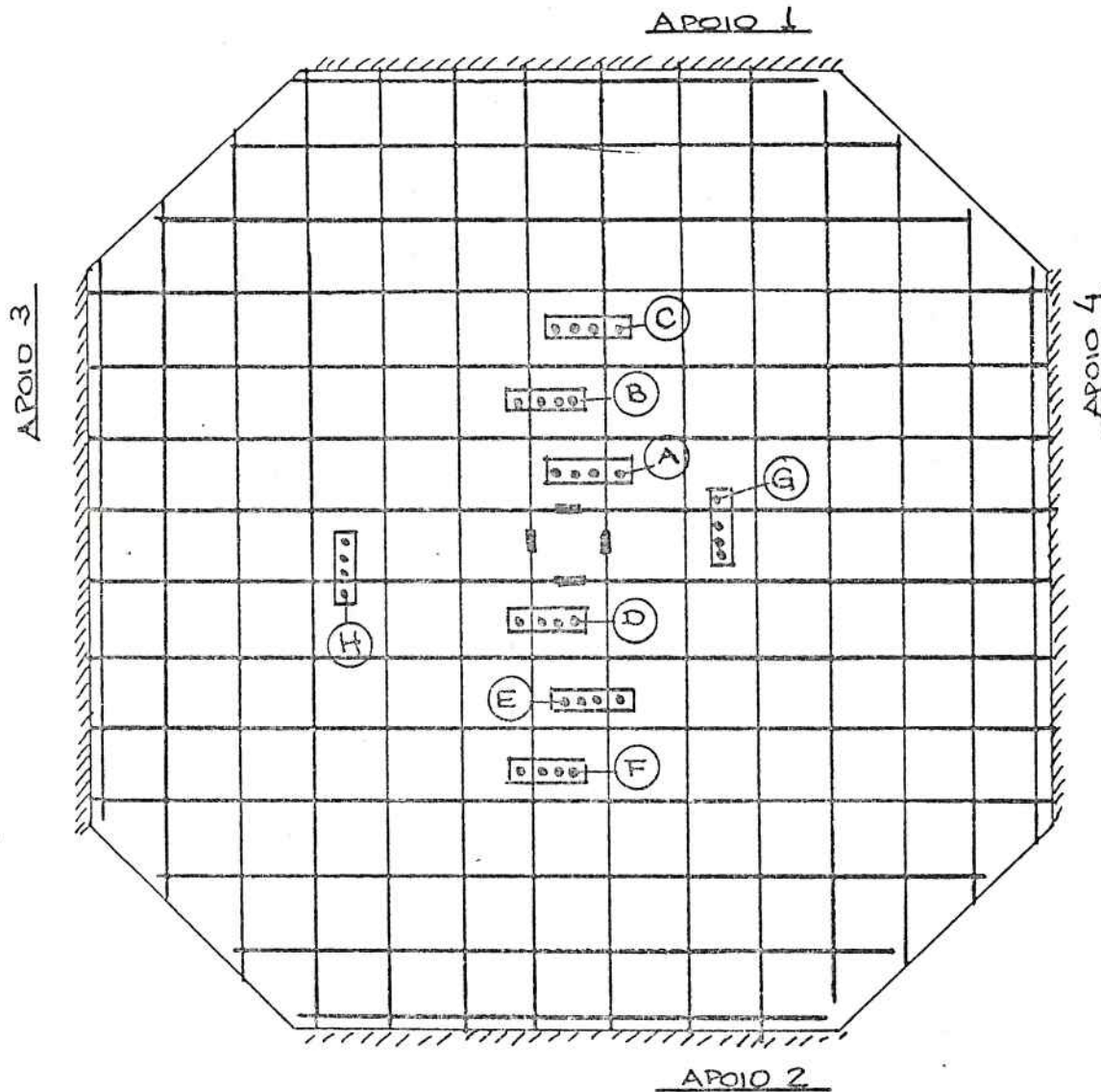
NUMERAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

INSTRUMENTAÇÃO DA ARMADURA DE FLEXÃO

(IGUAL EM TODOS OS CORPOS DE PROVA)

FIGURA 4

LAJE Nº 2



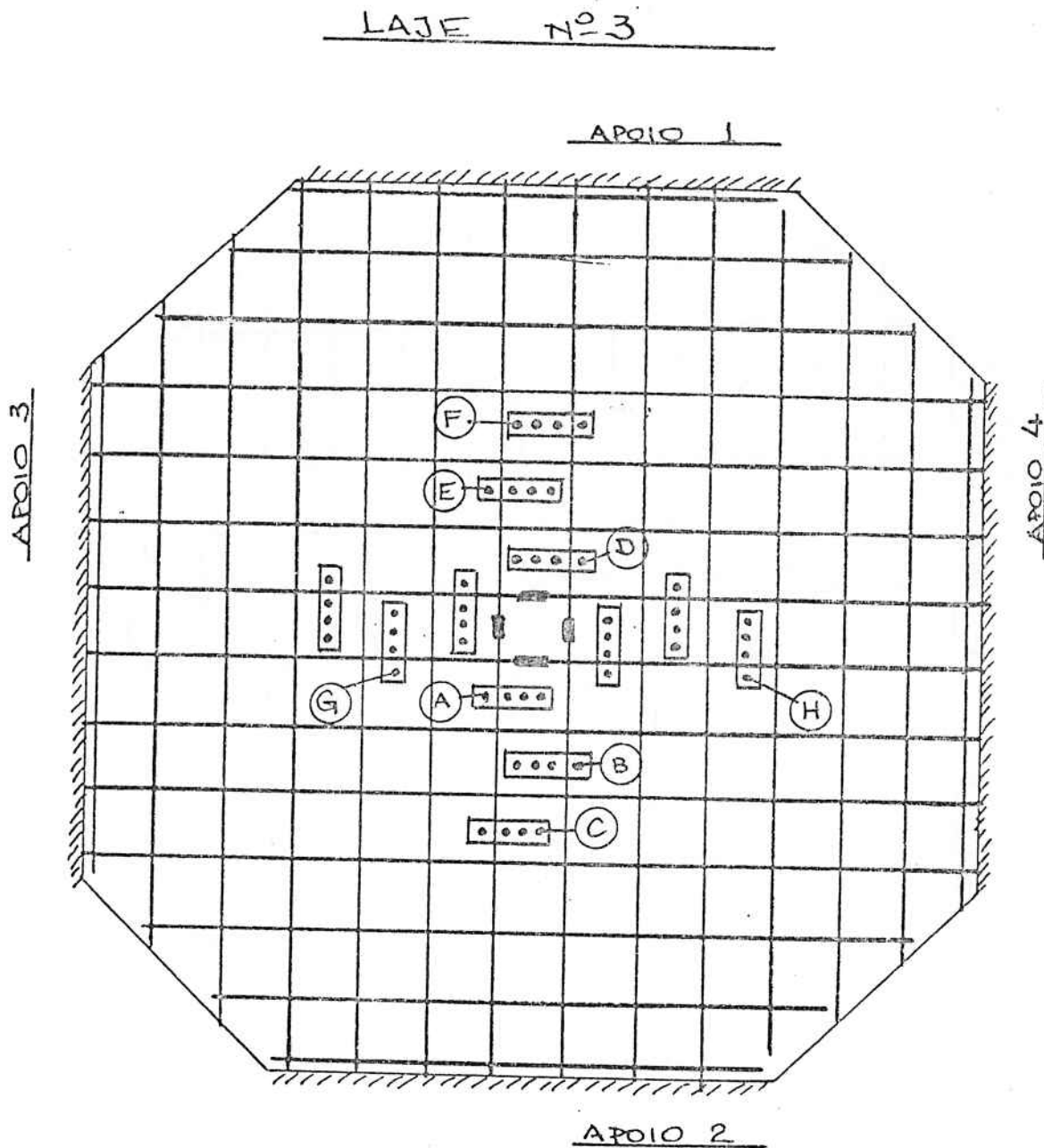
ARMADURA TRANSVERSAL (8 MÓDULOS)

IDENTIFICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

DA INSTRUMENTAÇÃO DOS ESTRIBOS

A-B-C-D-E-F-G-H

FIGURA 5

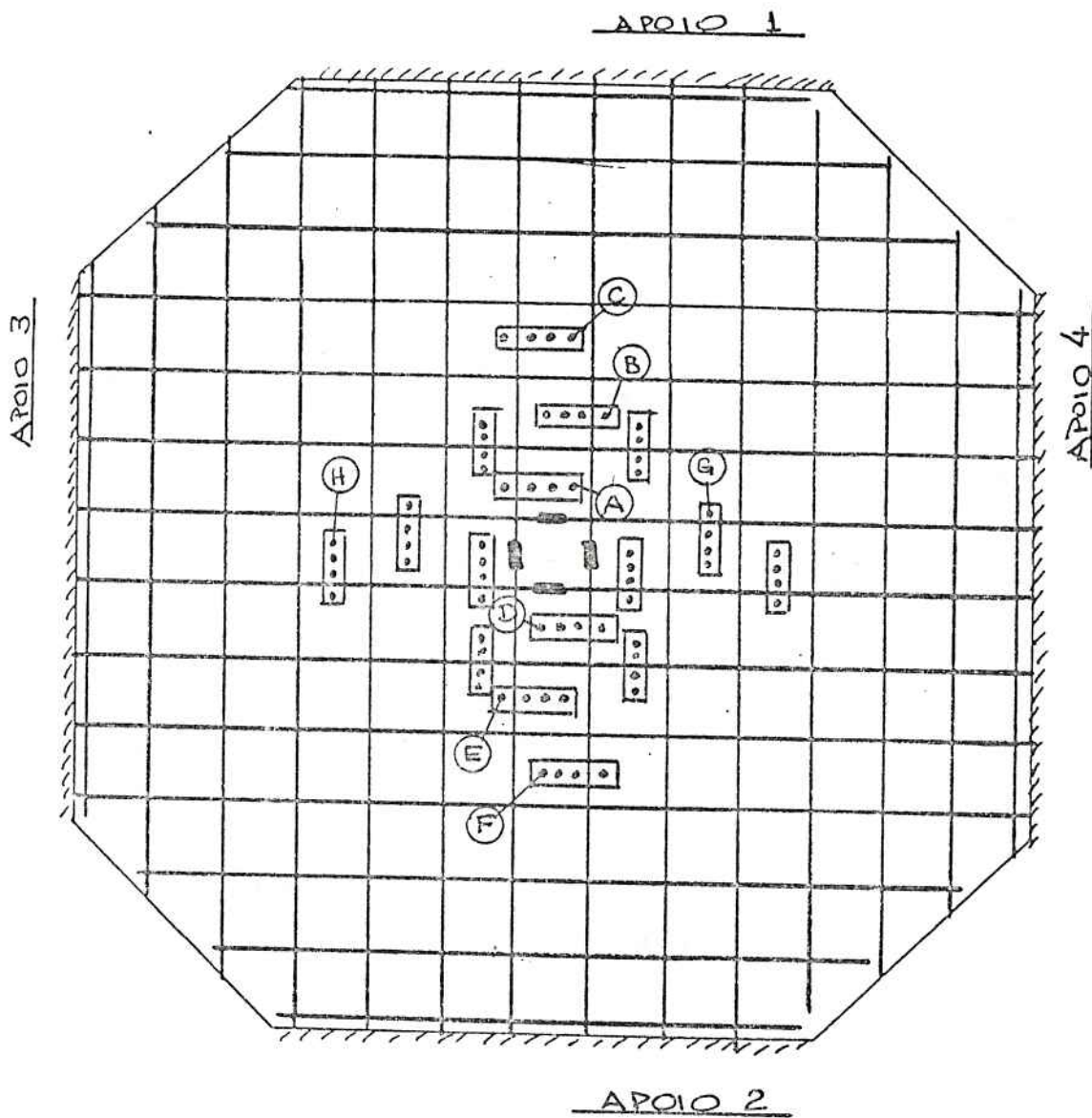


ARMADURA TRANSVERSAL (12 MÓDULOS)

IDENTIFICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS DA
INSTRUMENTAÇÃO DOS ESTRIBOS
A - B - C - D - E - F - G - H

FIGURA 6

LAJE Nº 4

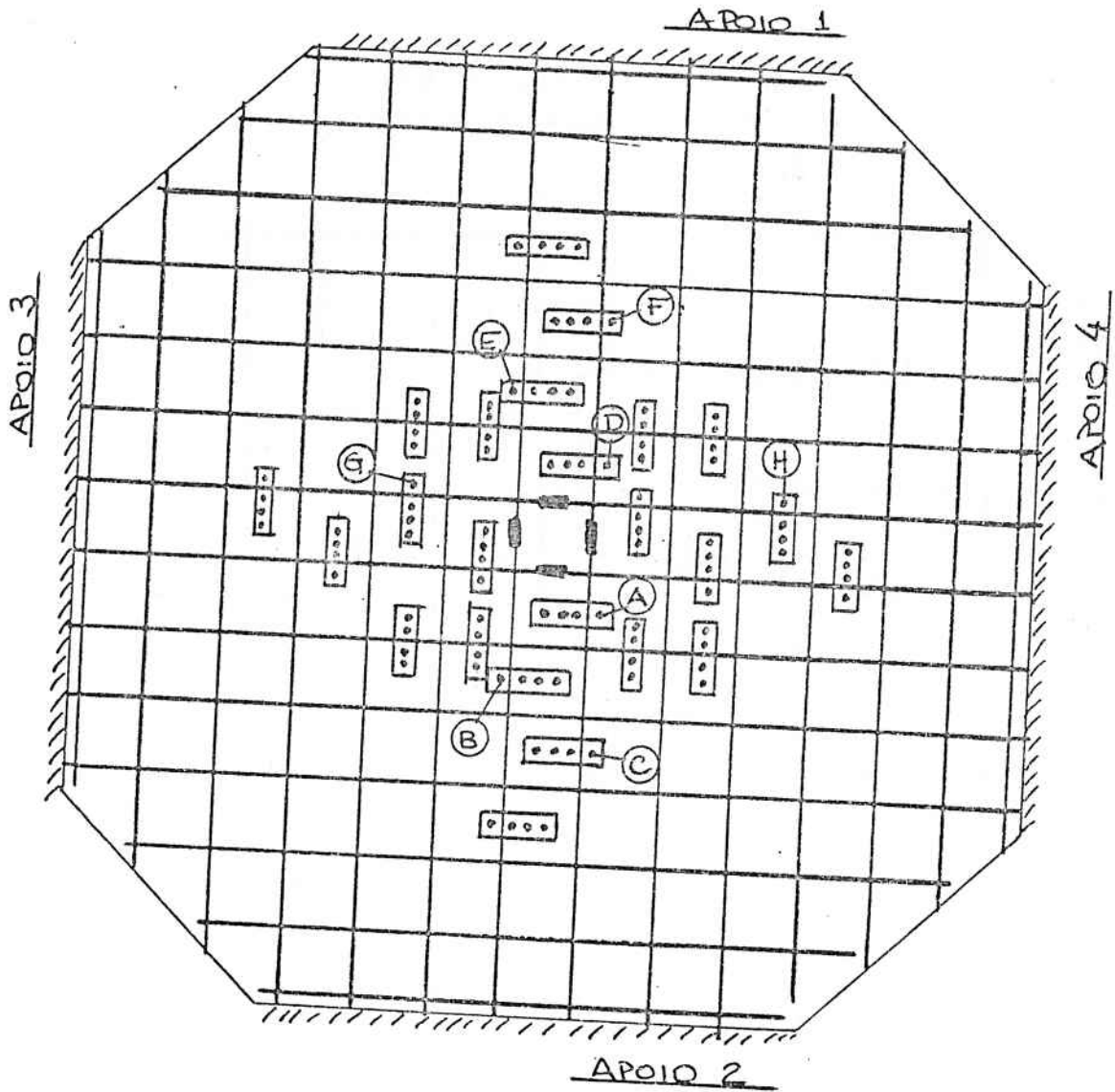


ARMADURA TRANSVERSAL (16 MÓDULOS)

IDENTIFICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS
DA INSTRUMENTAÇÃO DOS ESTRIBOS
A-B-C-D-E-F-G-H

FIGURA 7

LAJE Nº 5



ARMADURA TRANSVERSAL (24 MÓDULOS)

IDENTIFICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS
DA INSTRUMENTAÇÃO DOS ESTRIÇOS
A-B-C-D-E-F-G-H

FIGURA 8

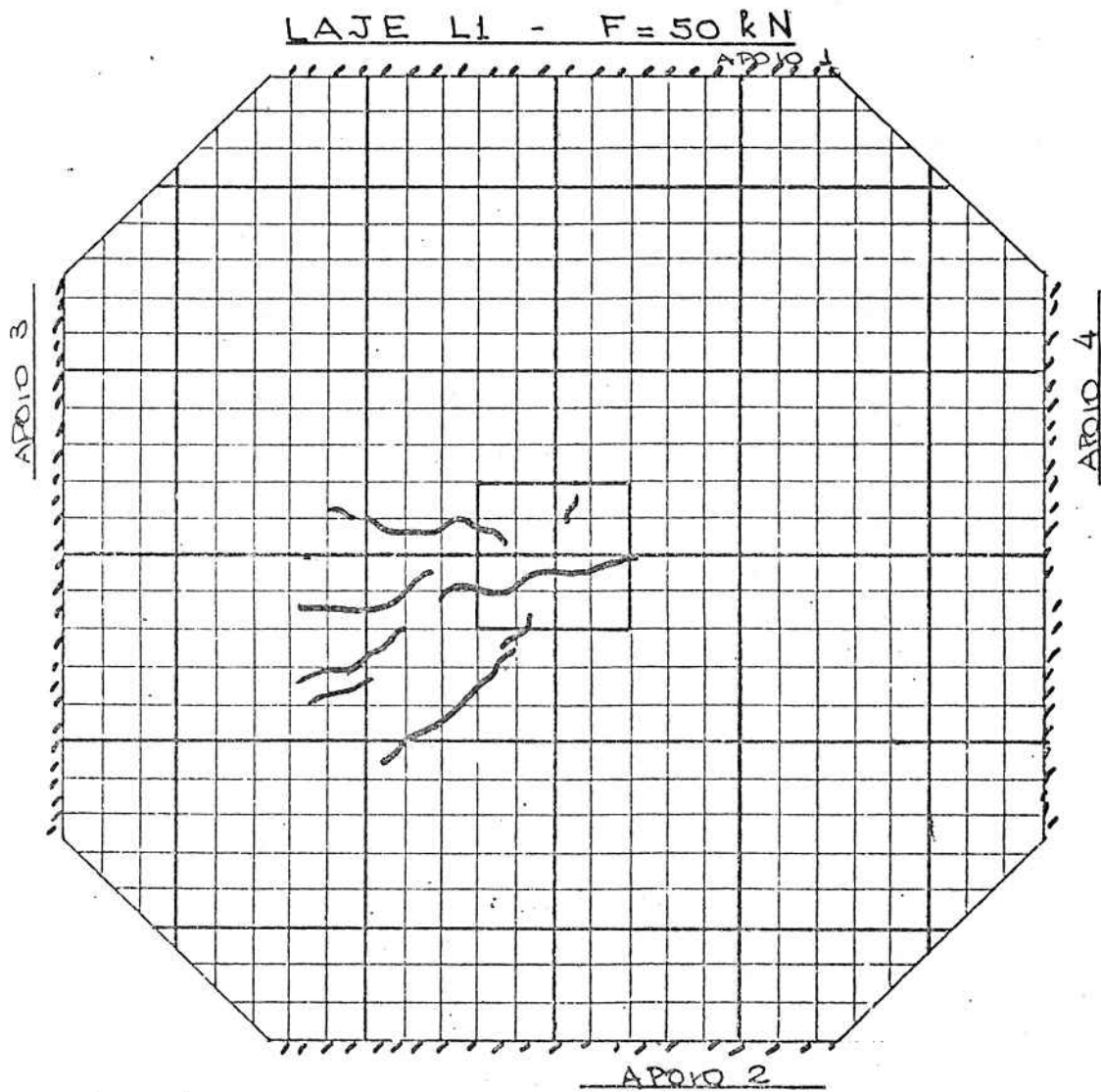


FIGURA 9
FISSURAÇÃO DA LAJE L1

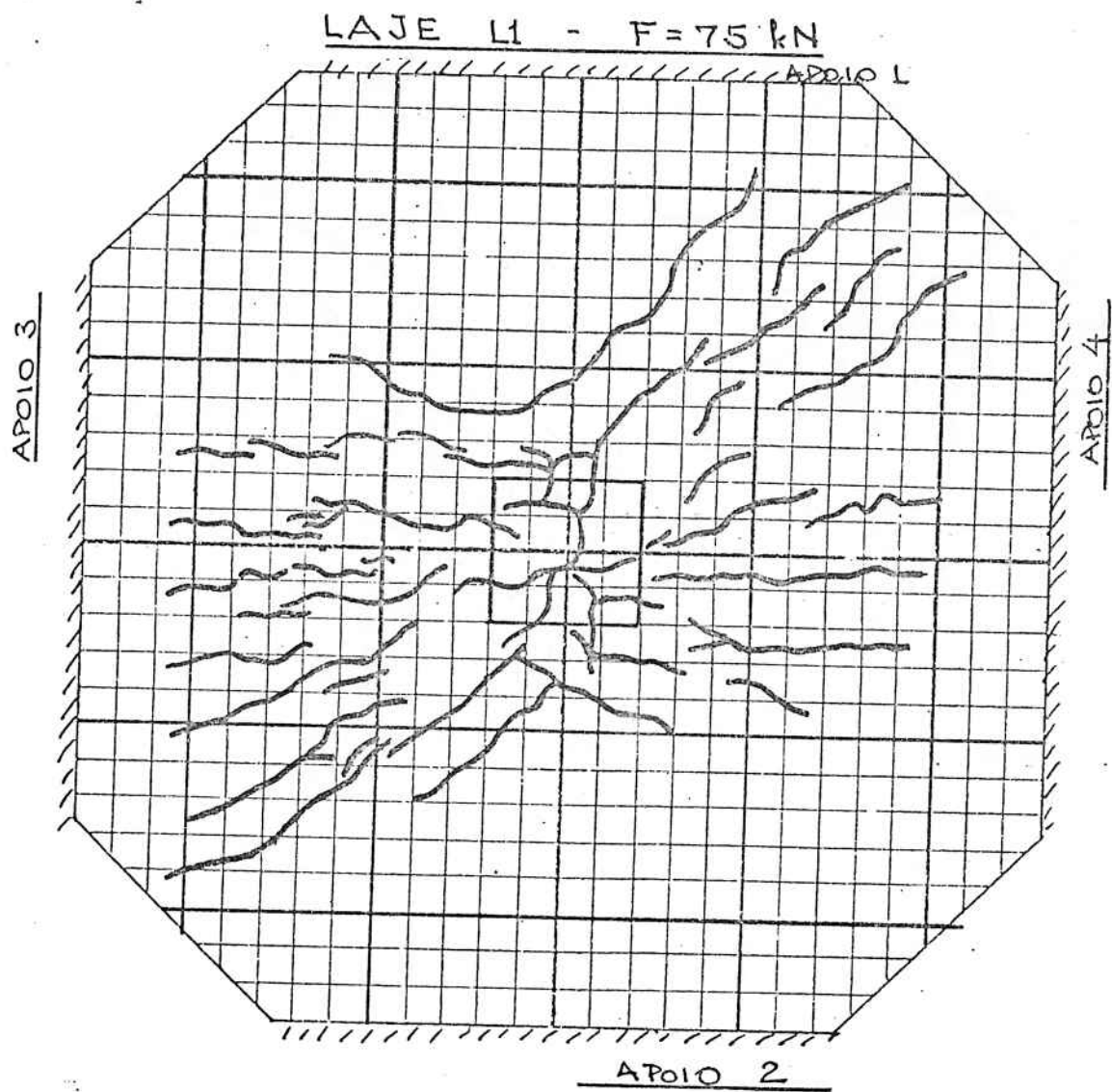


FIGURA 10
FISSURAÇÃO DA LAJE L 1

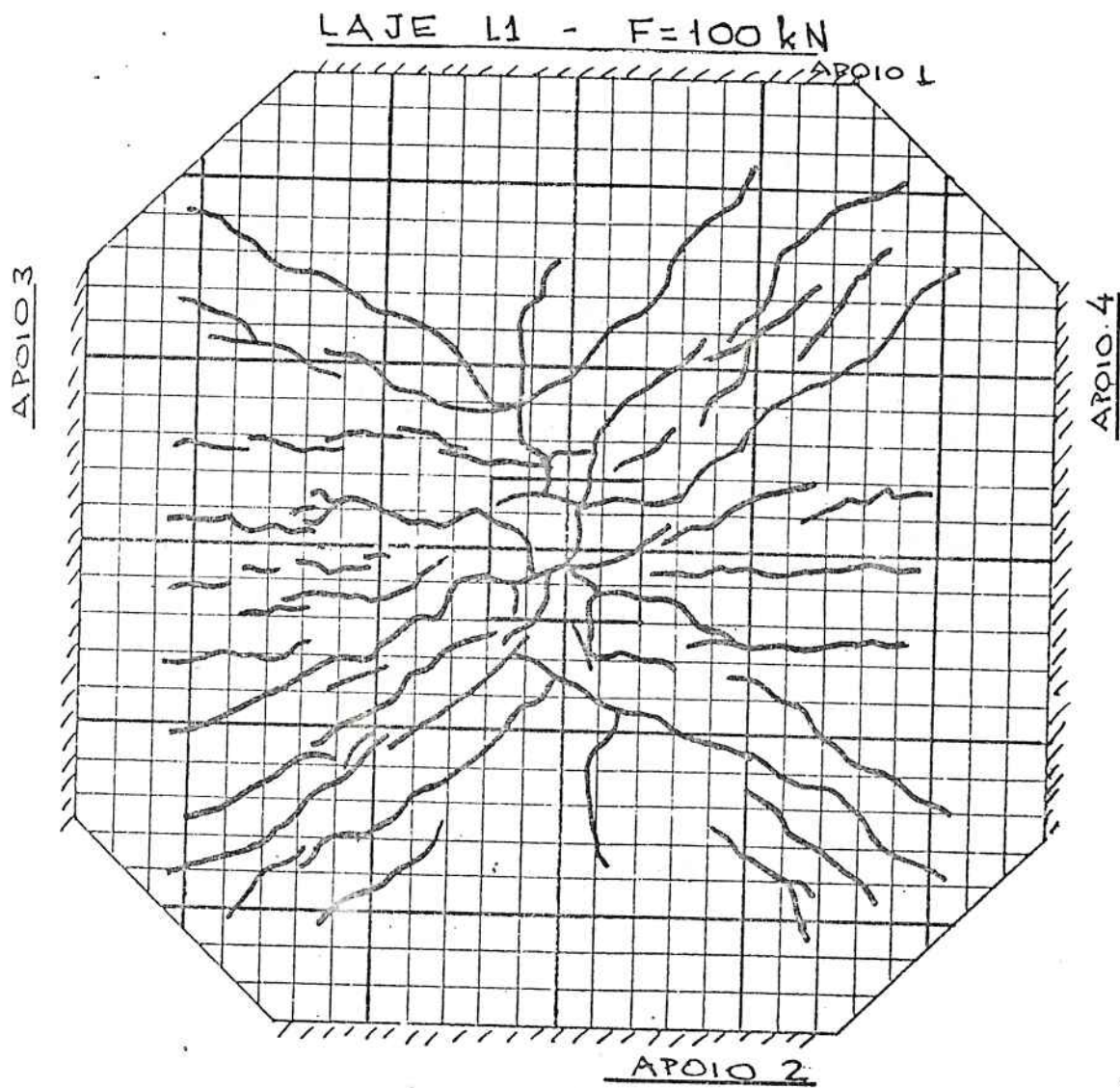


FIGURA 11
FISSURACÃO DA LAJE L 1

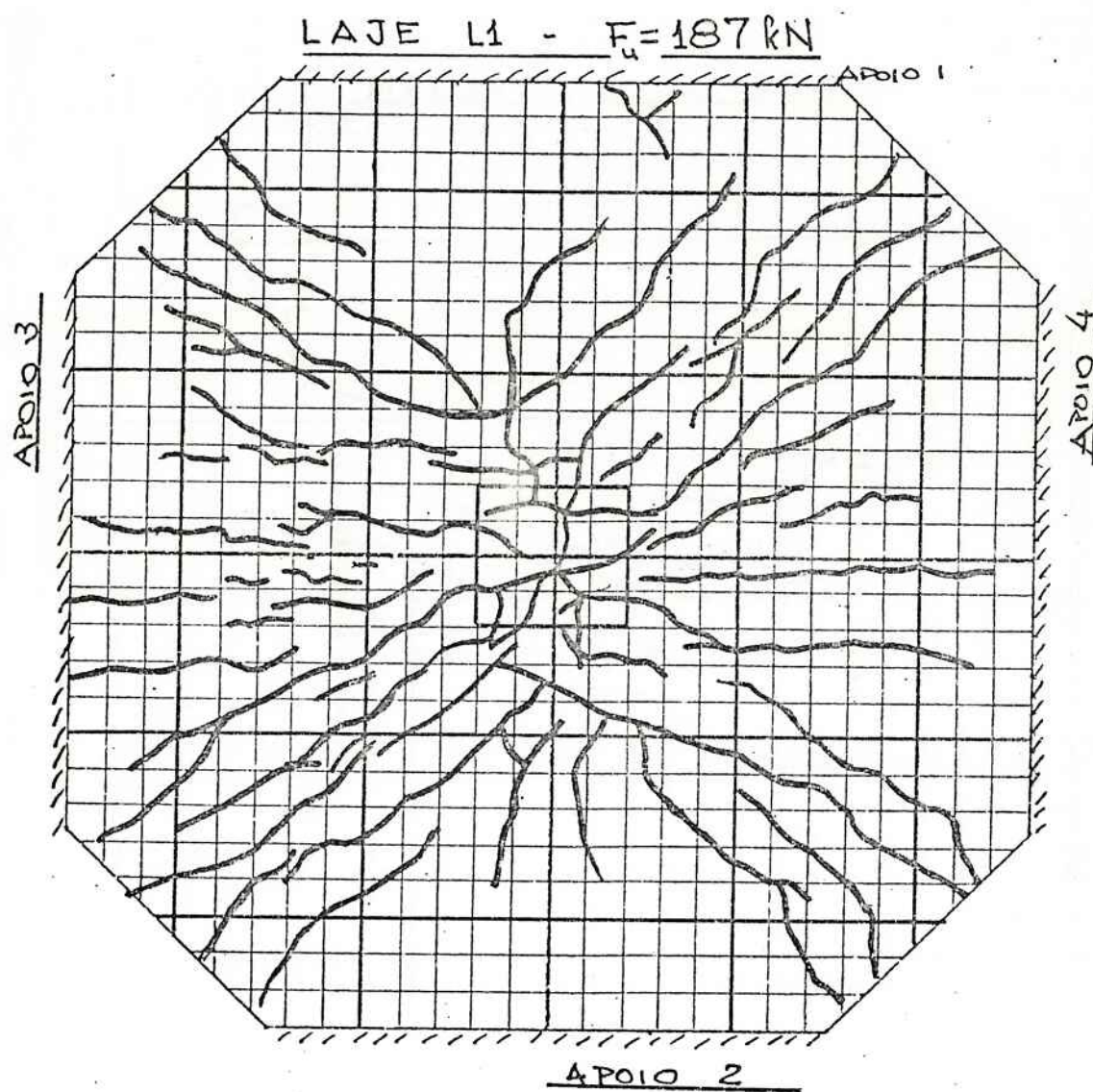


FIGURA .12
FISSURAÇÃO DA LAJE L 1

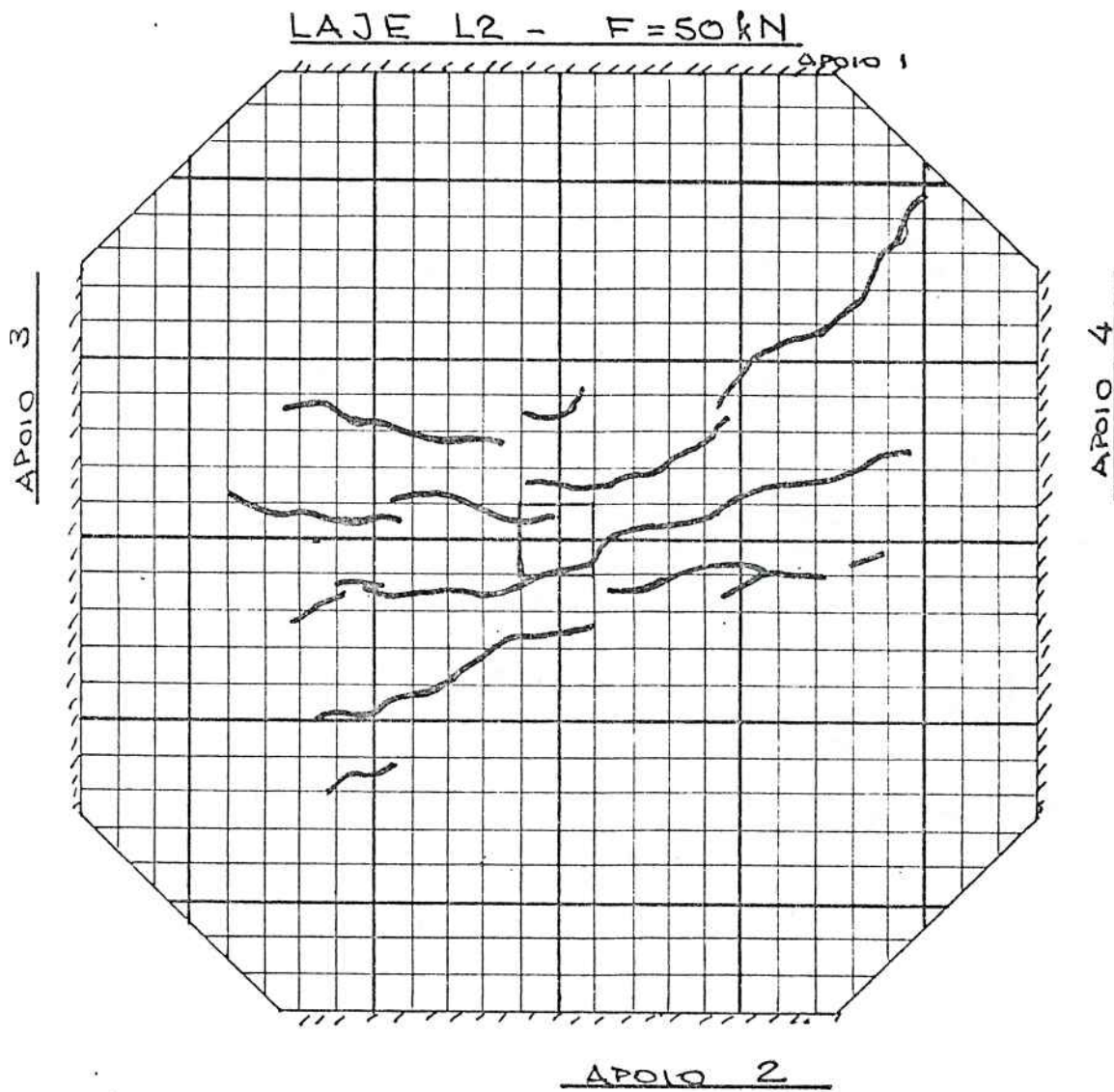


FIGURA 13
FISSURAÇÃO DA LAJE L 2

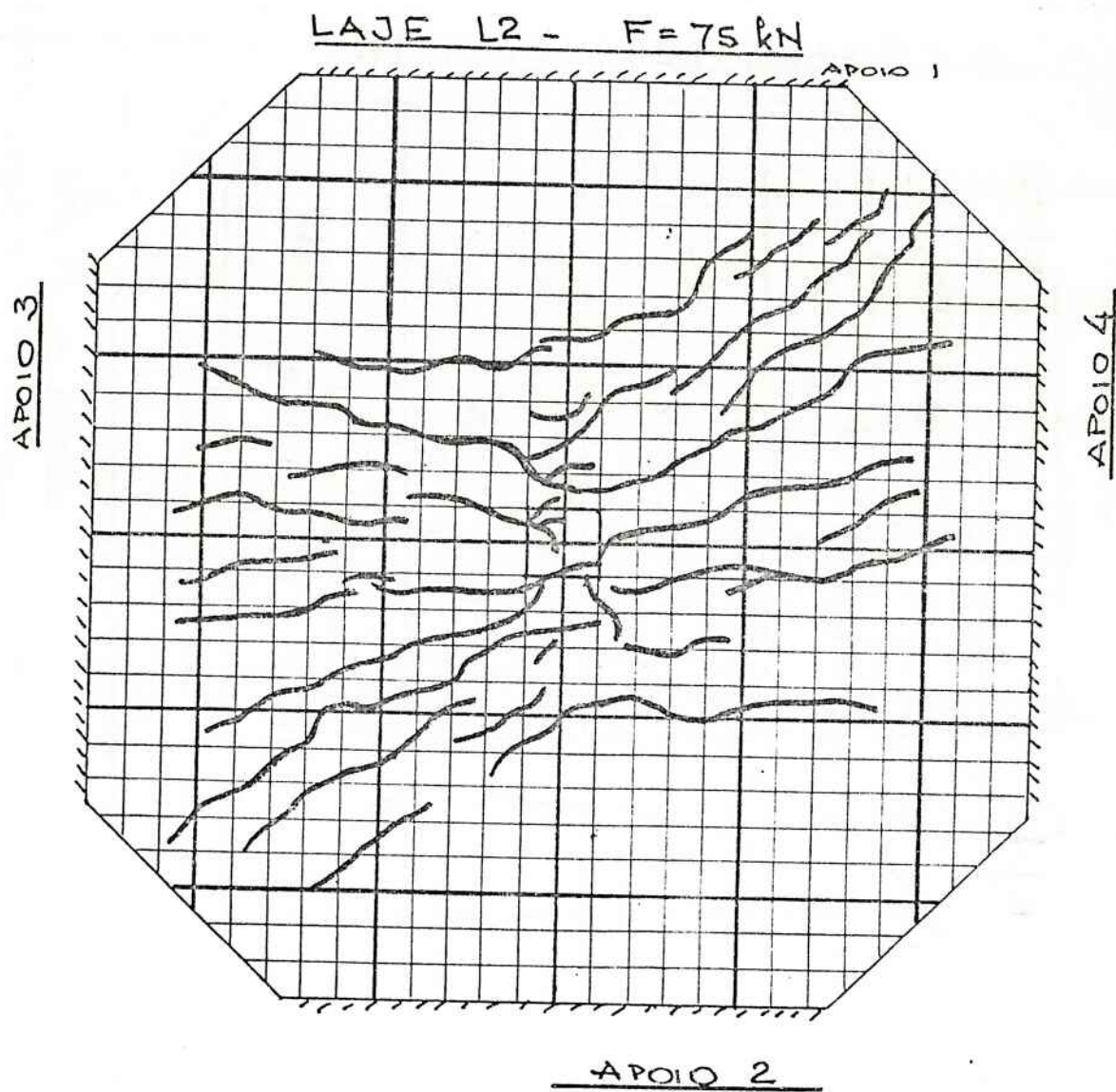


FIGURA 14
FISSURAÇÃO DA LAJE L 2

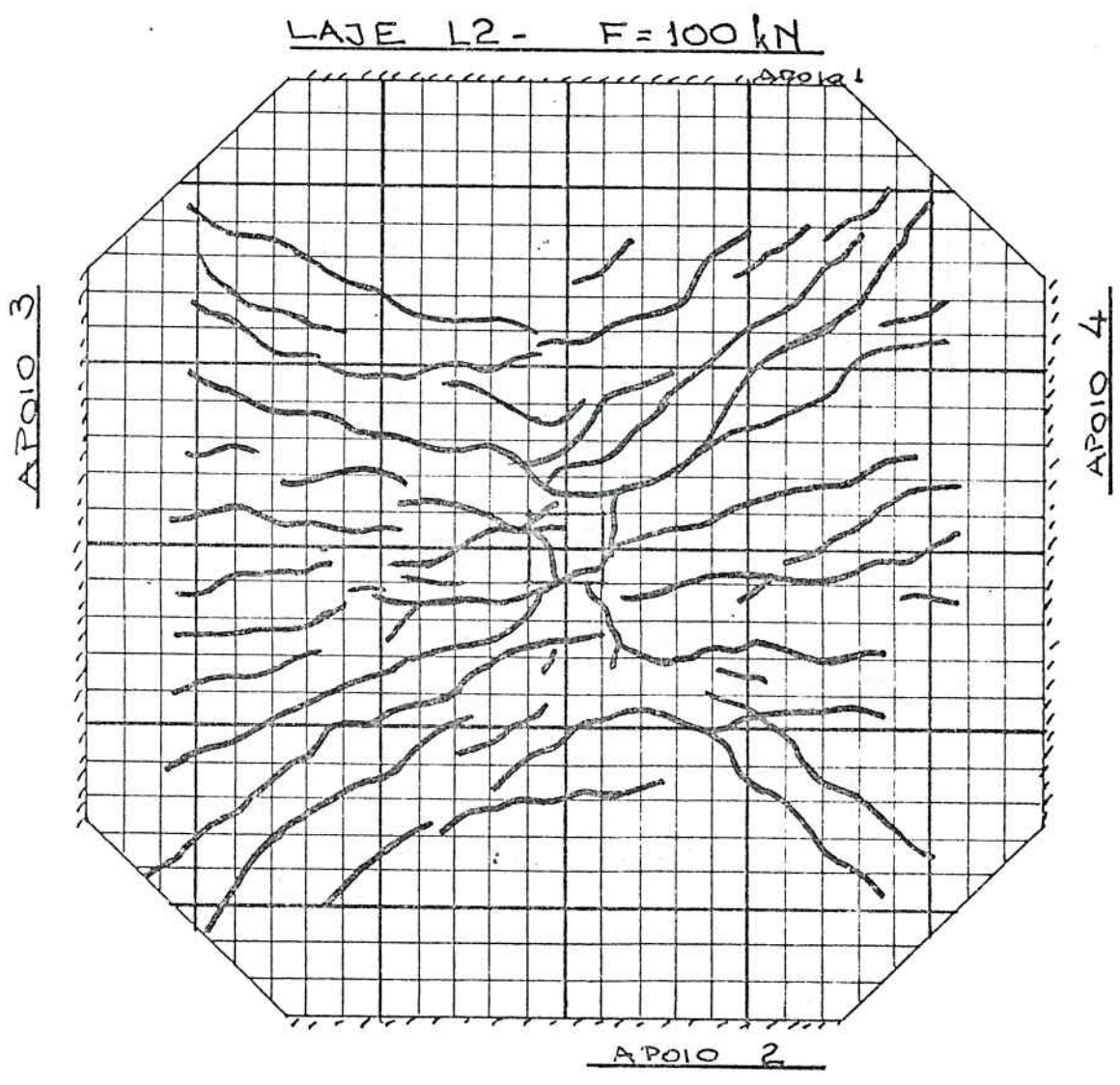


FIGURA 15
FISSURAÇÃO DA LAJE L 2

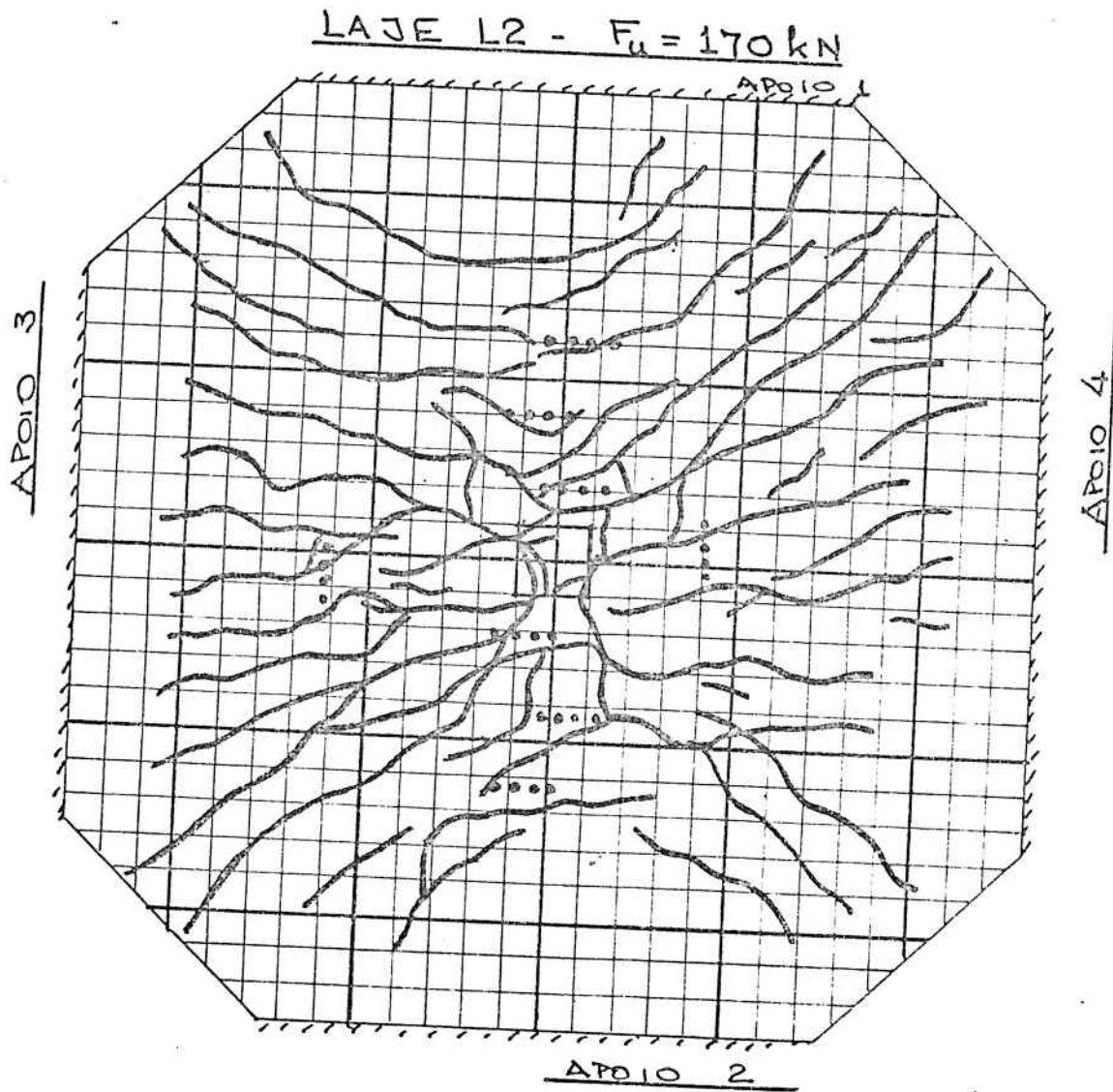


FIGURA 16
FISSURAÇÃO DA LAJE L 2
E
POSIÇÃO DOS ESTRIBOS

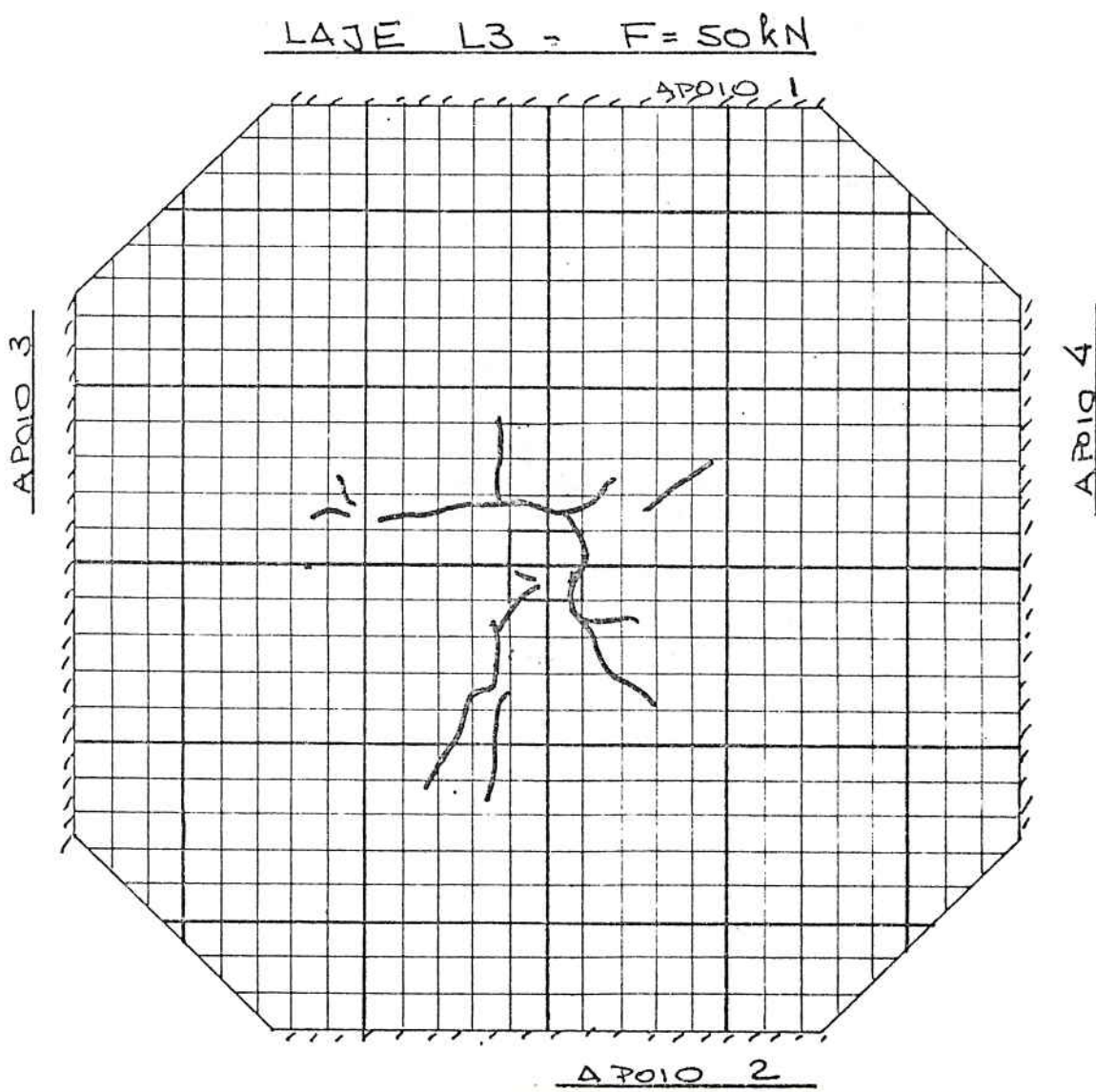


FIGURA 17
FISSURAÇÃO DA LAJE L 3

LAJE L3 - F = 75 kN

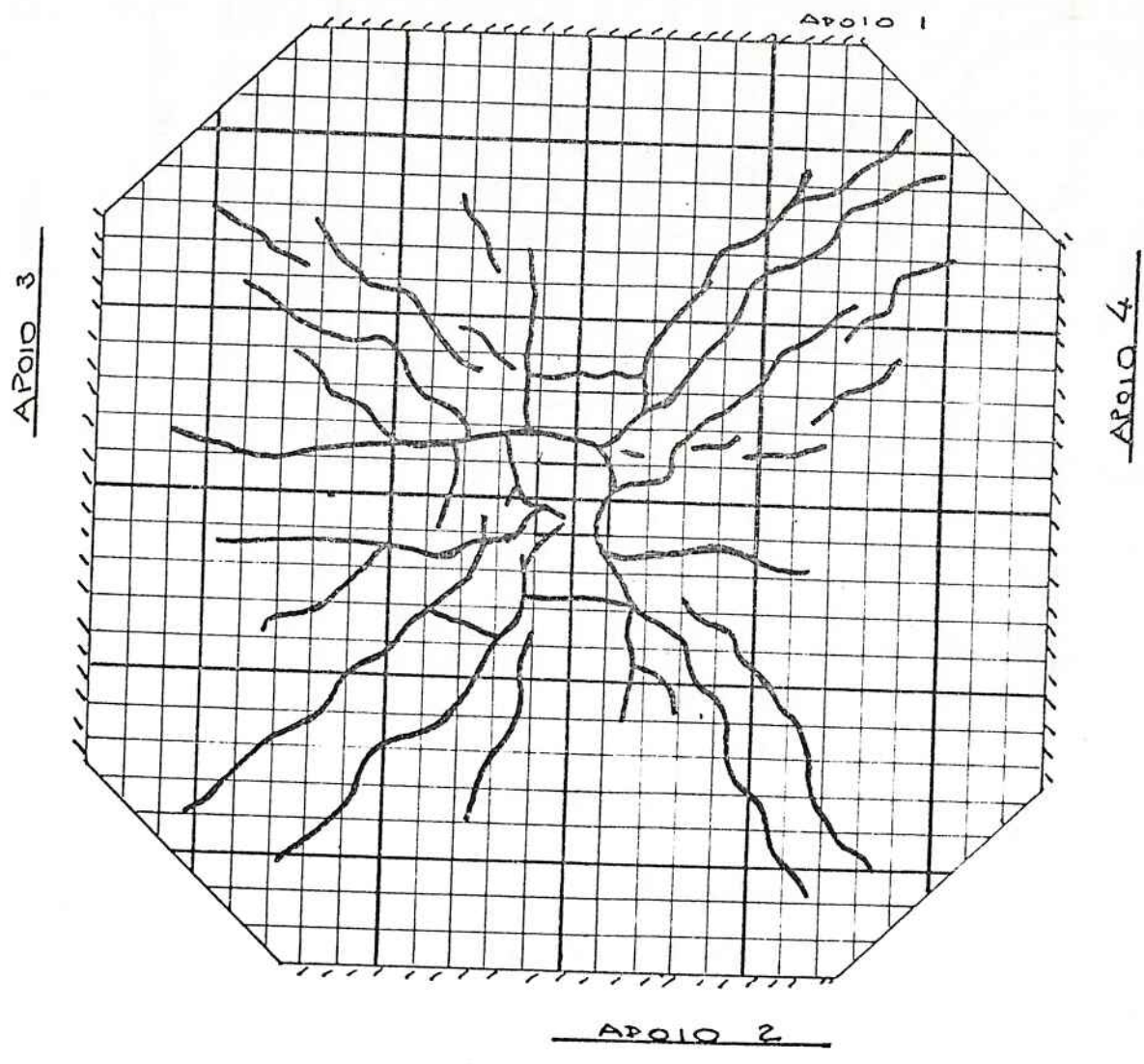


FIGURA 18
FISSURACÃO DA LAJÉ L 3

LAJE L3 - $F = 100 \text{ kN}$

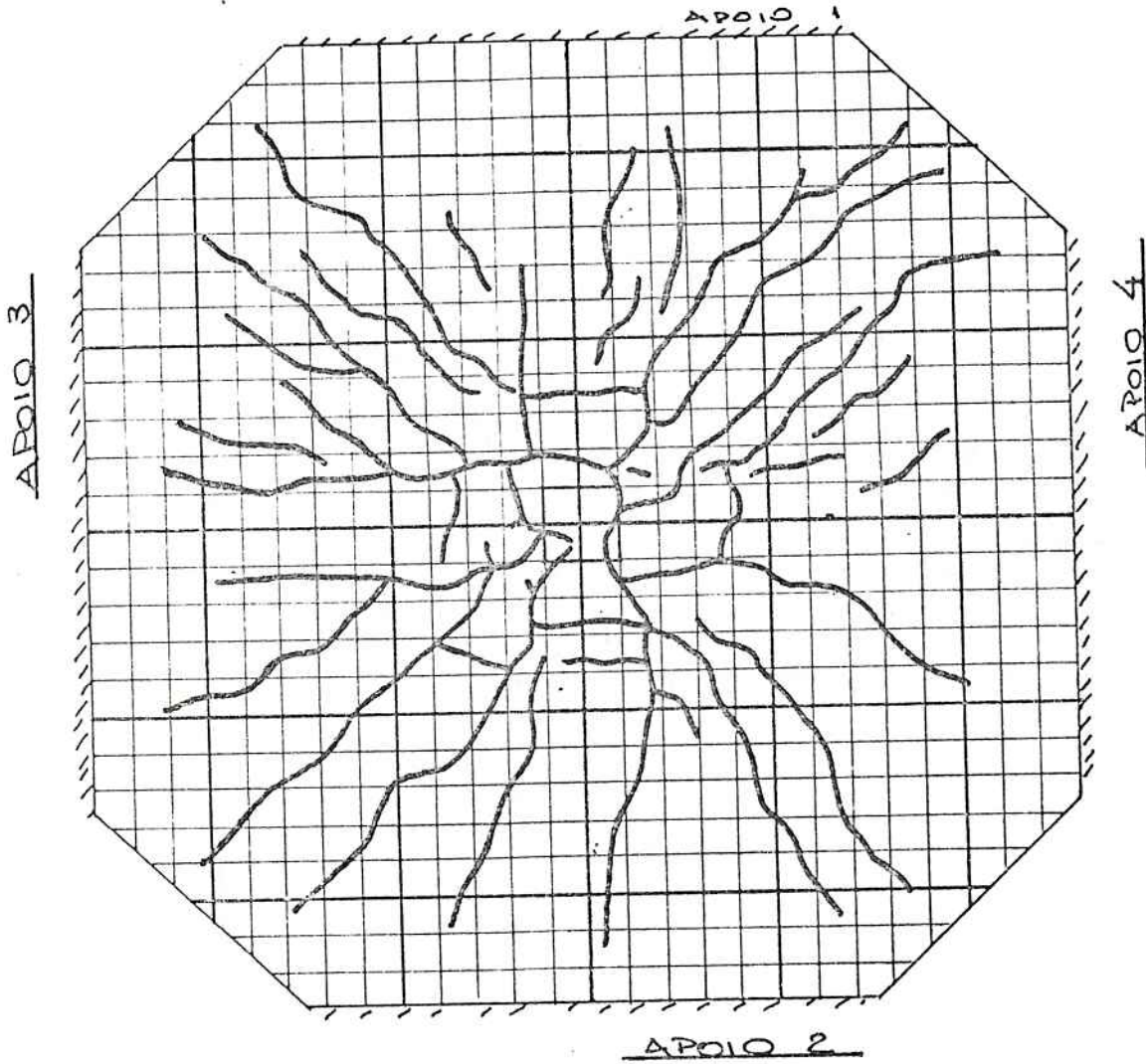


FIGURA 19
FISSURAÇÃO DA LAJE L 3

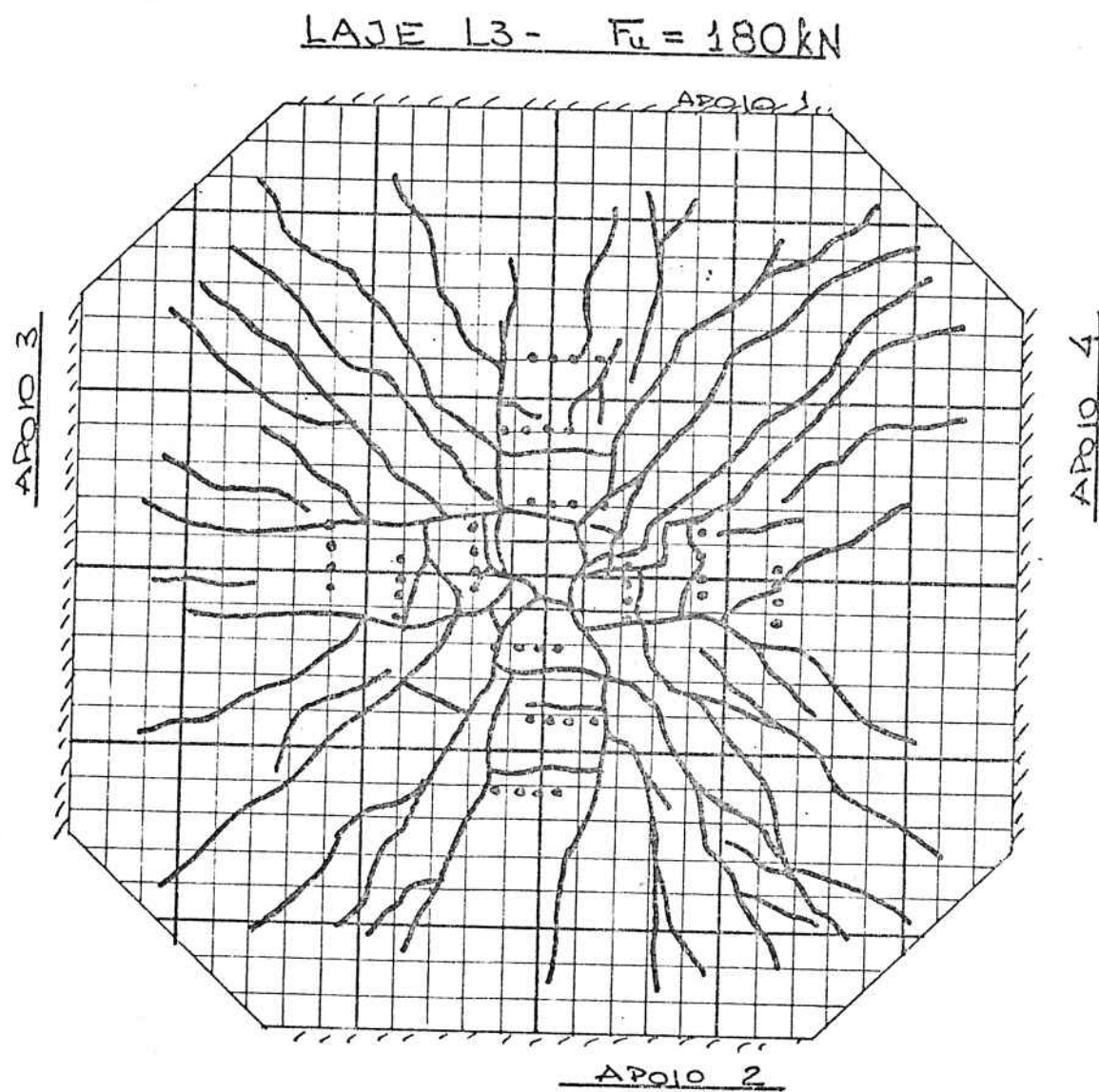


FIGURA 20
FISSURAÇÃO DA LAJE L 3
E
POSIÇÃO DOS ESTRIBOS

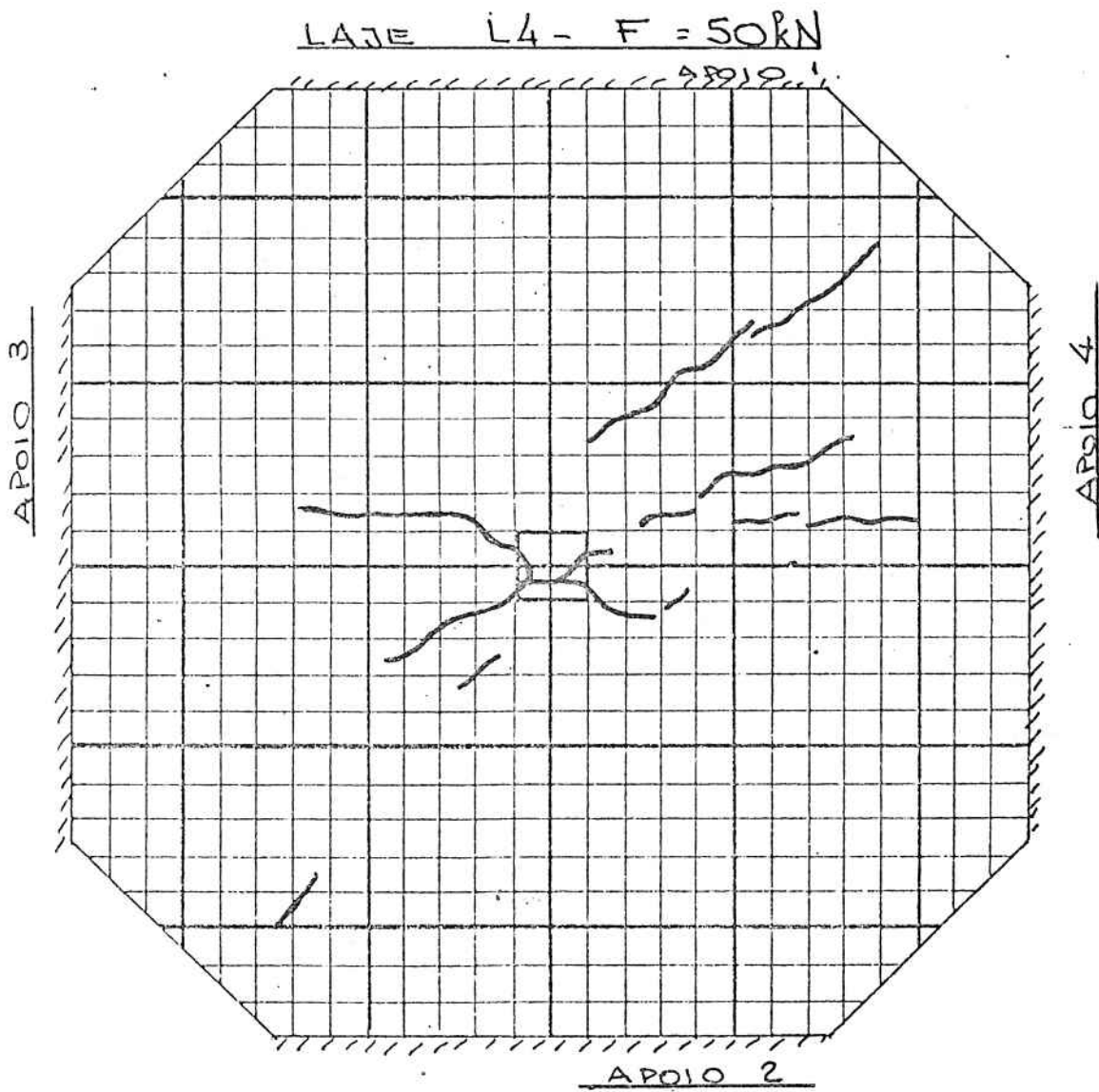


FIGURA 21
FISSURAÇÃO DA LAJE L 4

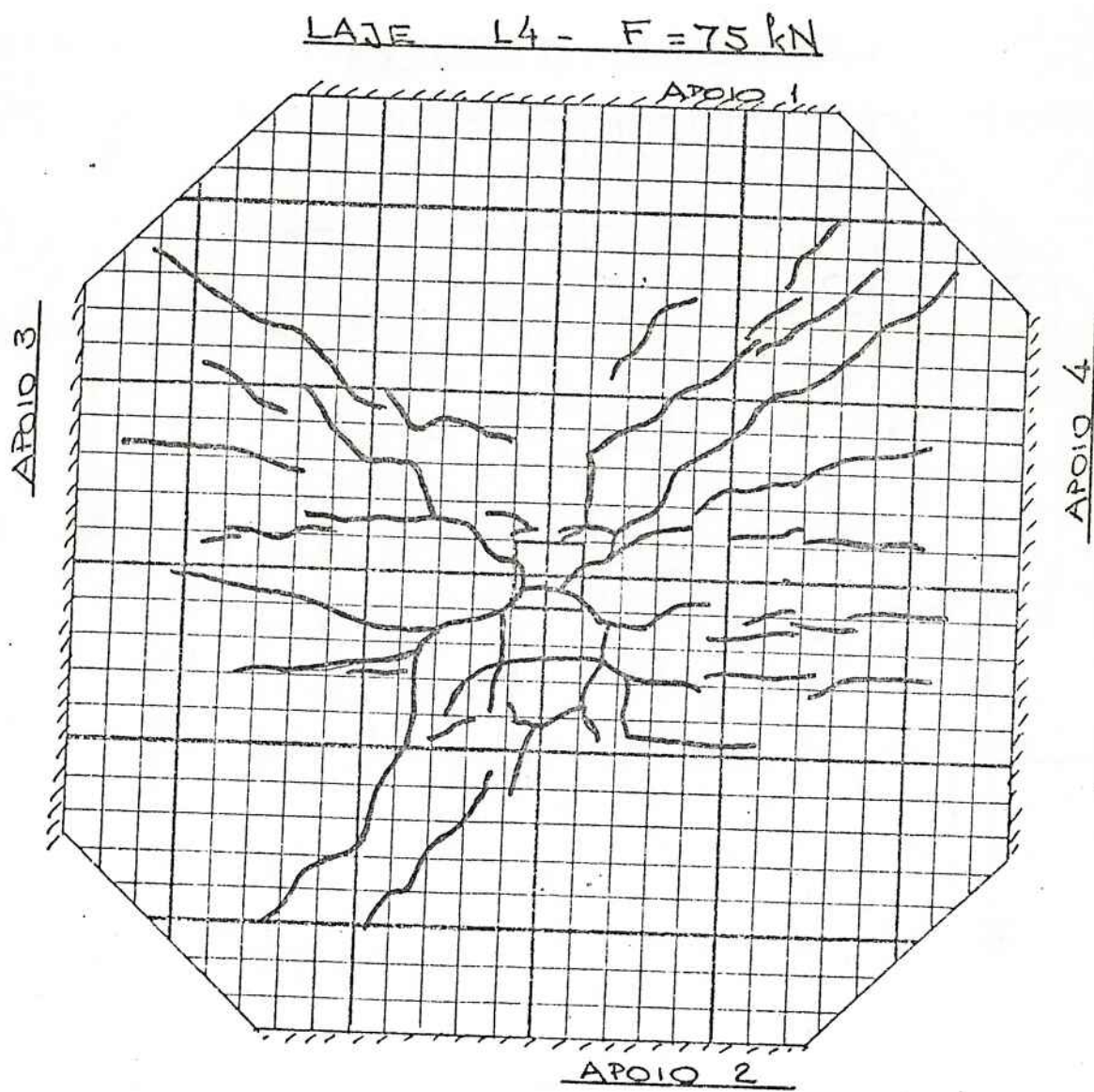


FIGURA 22
FISSURAÇÃO DA LAJE L 4

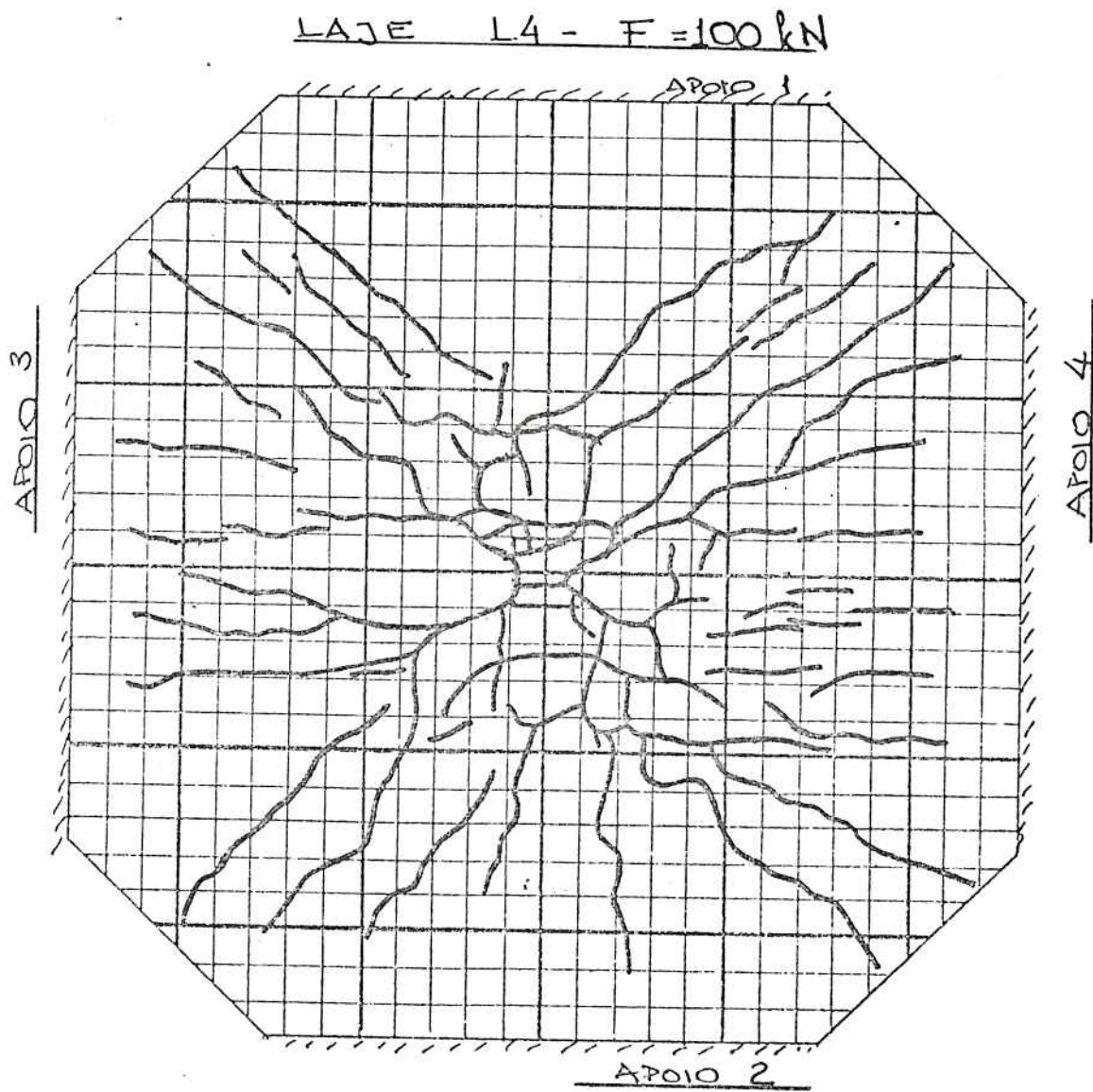


FIGURA 23
FISSURAÇÃO DA LAJE L 4

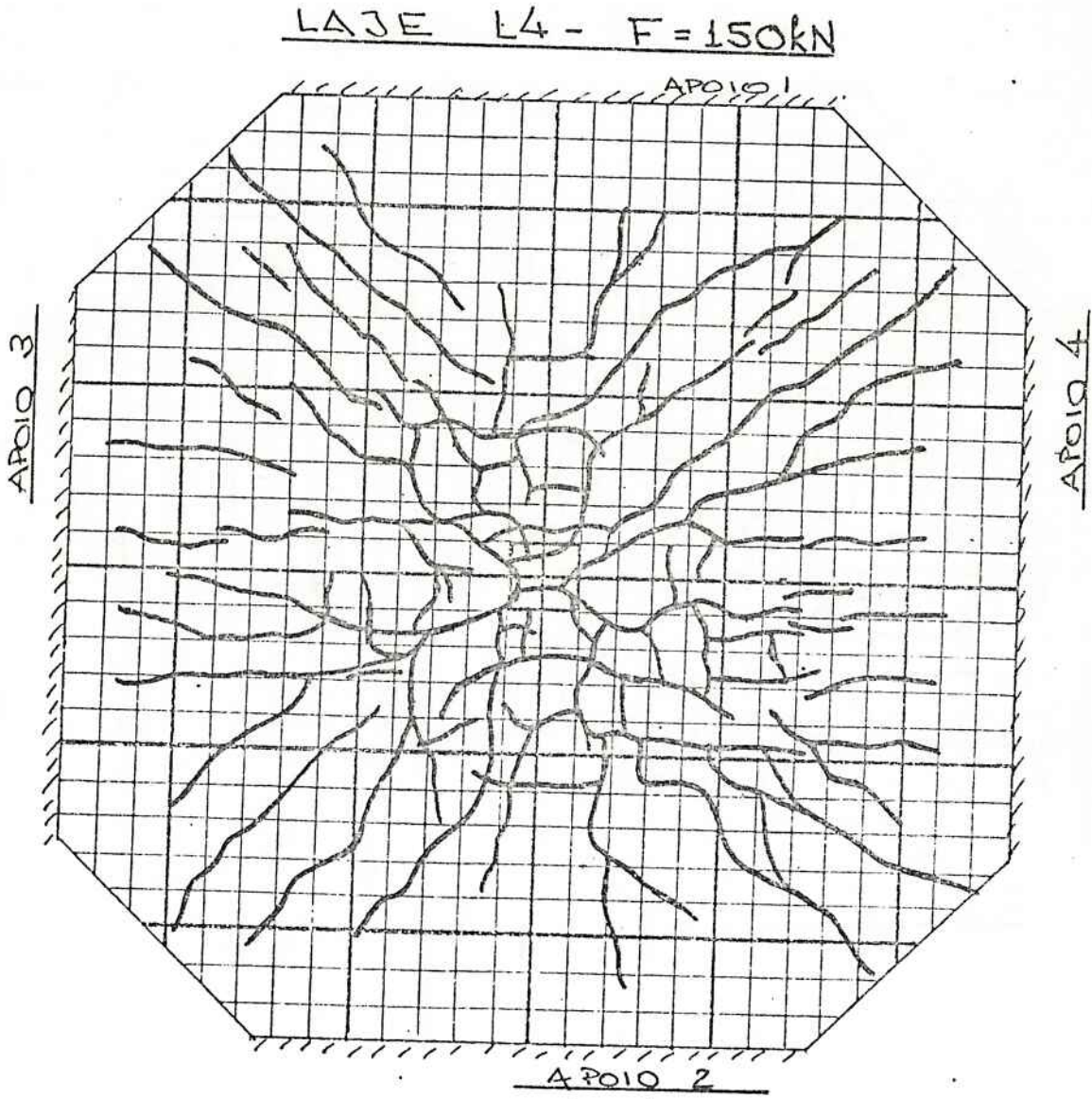


FIGURA 24
FISSURAÇÃO DA LAJE L 4

LAJE L4 - $F_c = 210 \text{ kN}$

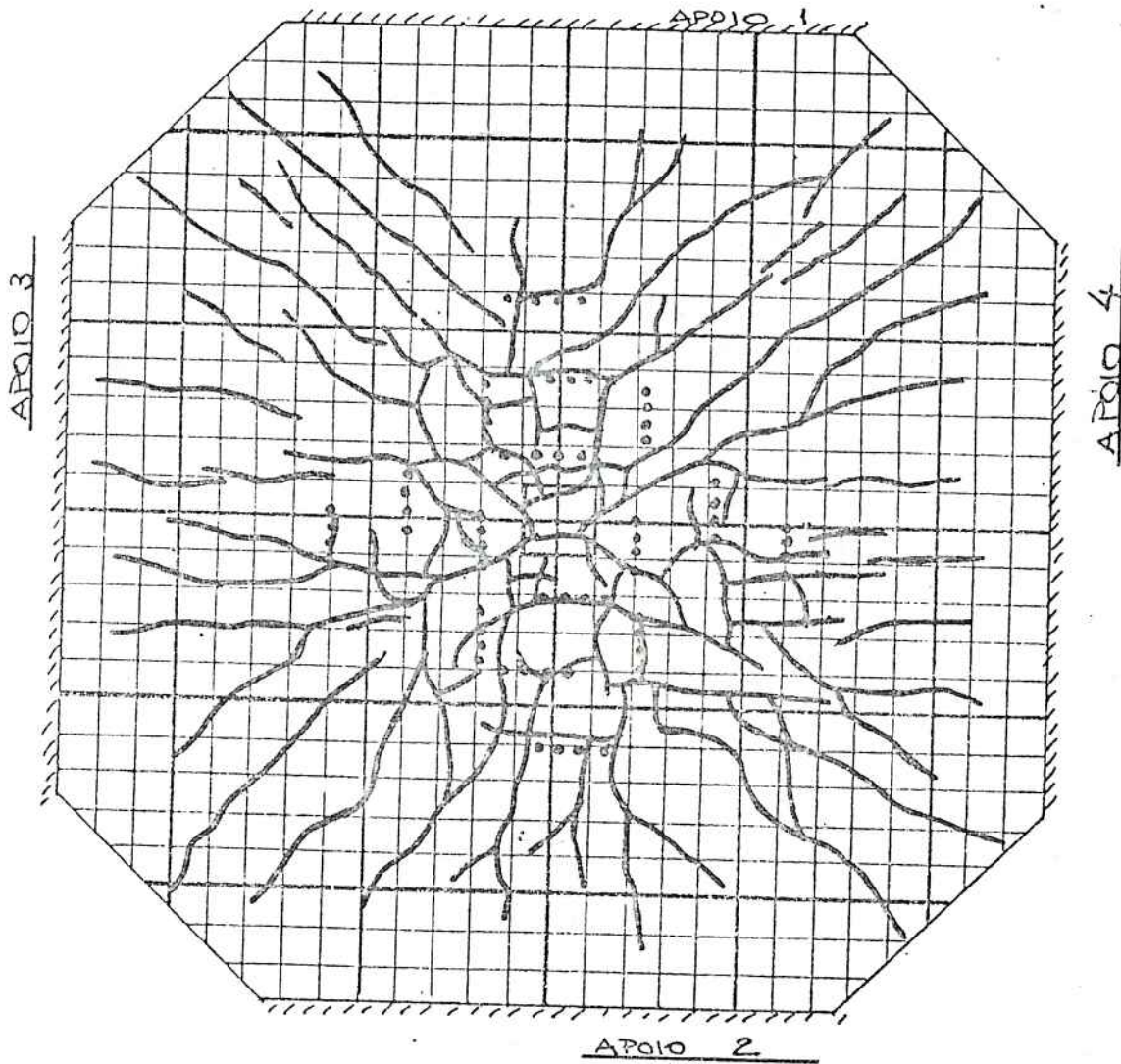


FIGURA 25

FISSURAÇÃO DA LAJE L 4
E
- POSIÇÃO DOS ESTRIBOS

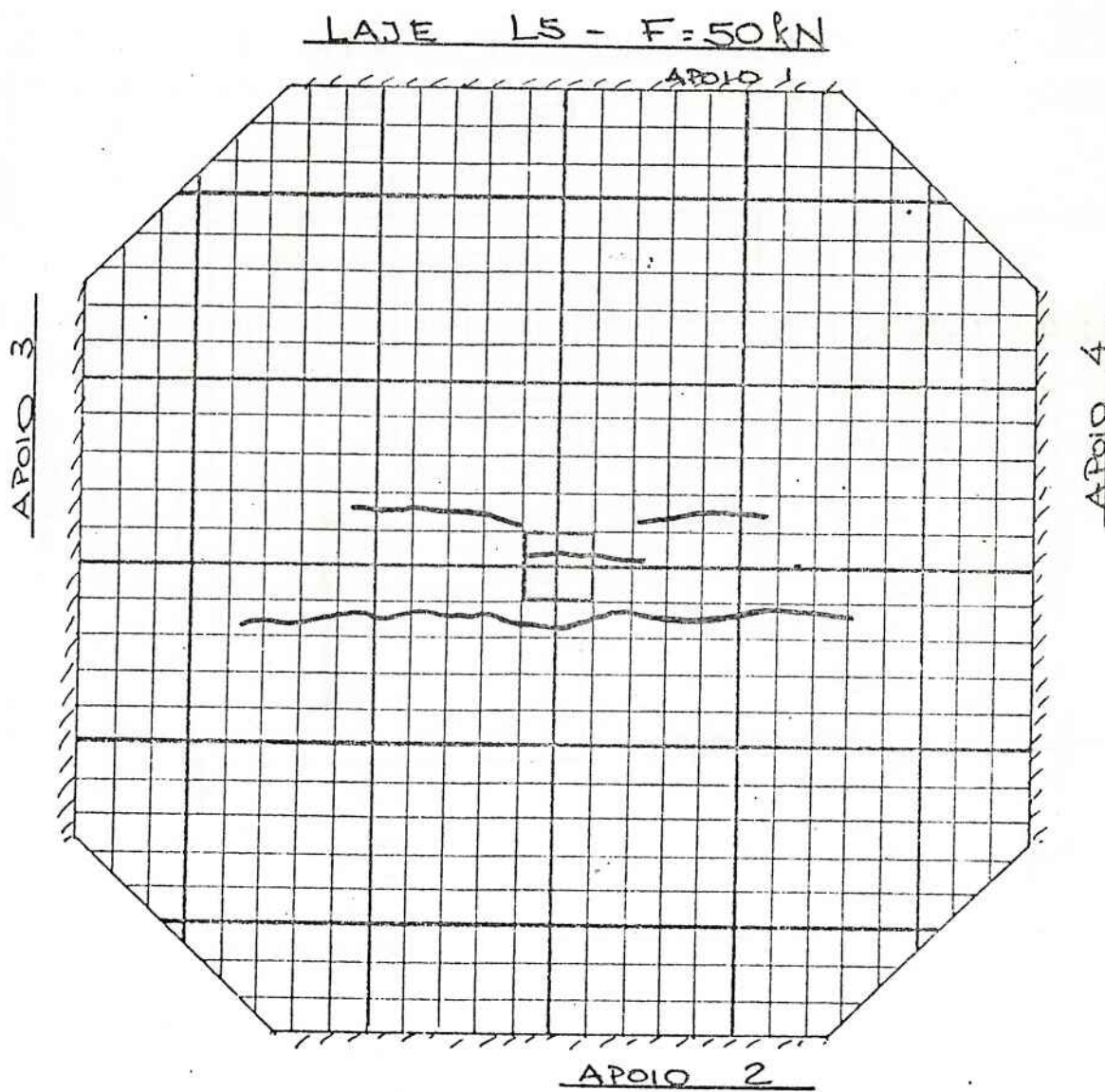


FIGURA 26
FISSURAÇÃO DA LAJE L 5

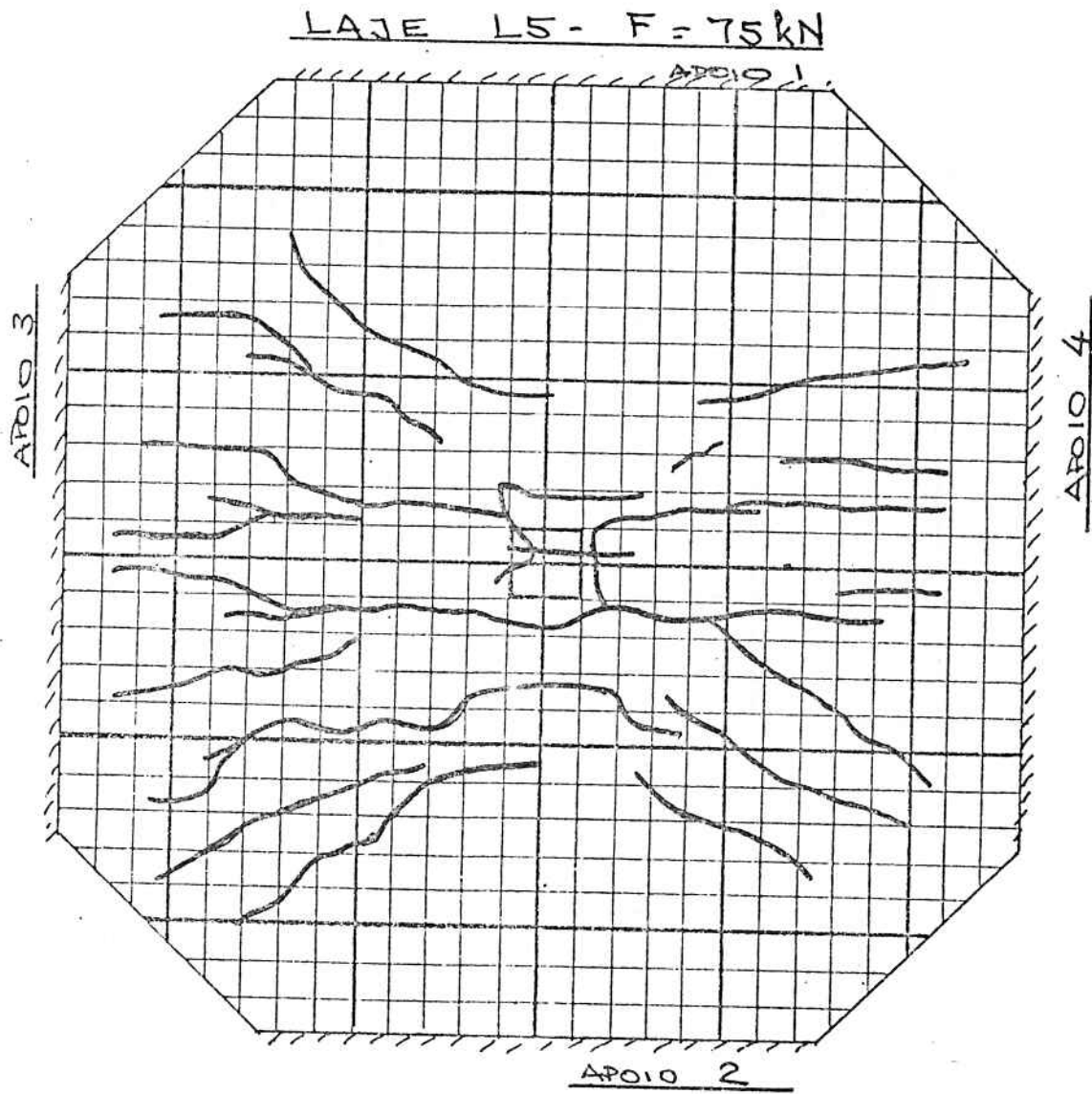


FIGURA 27

FISSURAÇÃO DA LAJE L 5

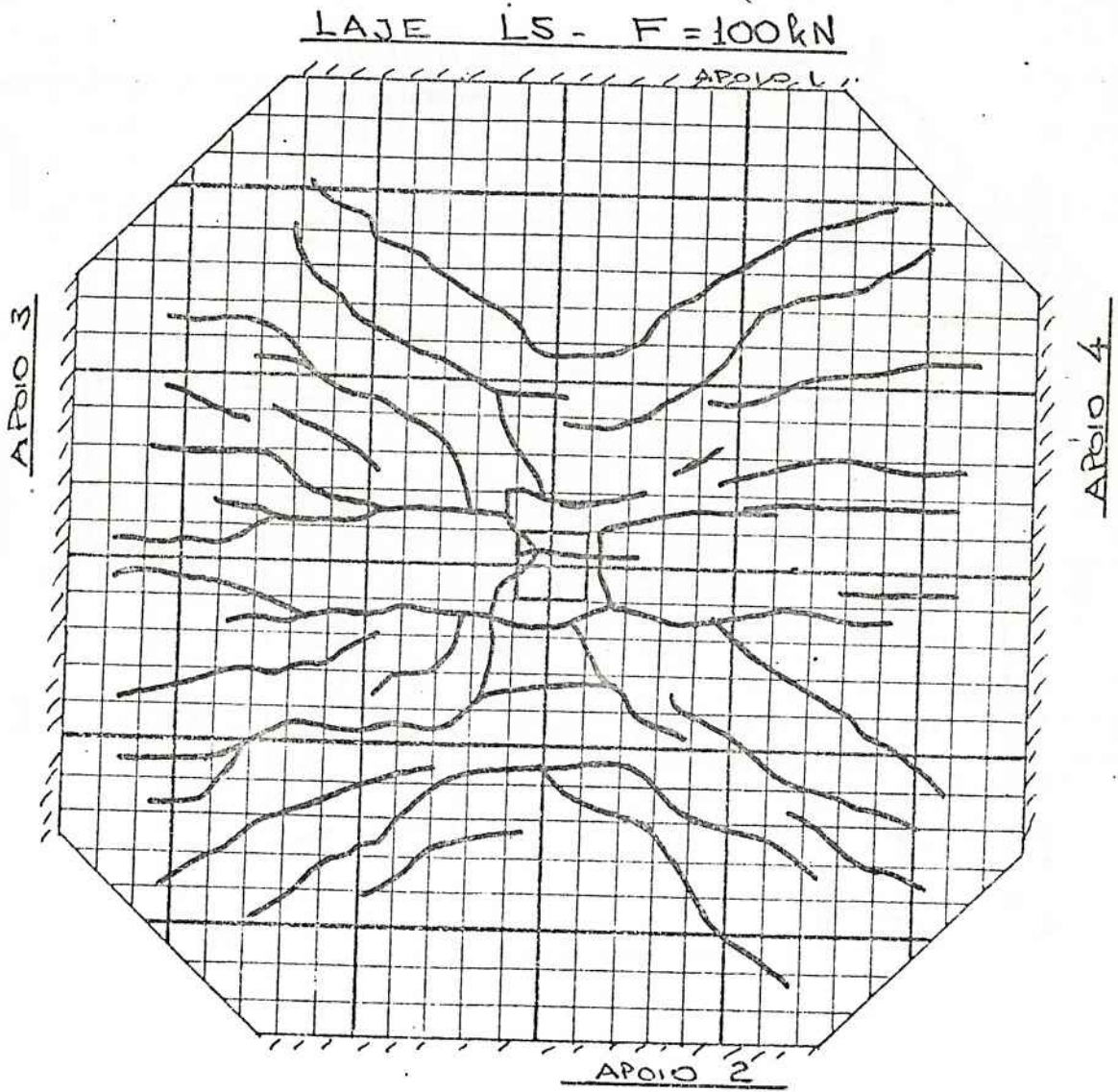


FIGURA 28
FISSURAÇÃO DA LAJE L 5

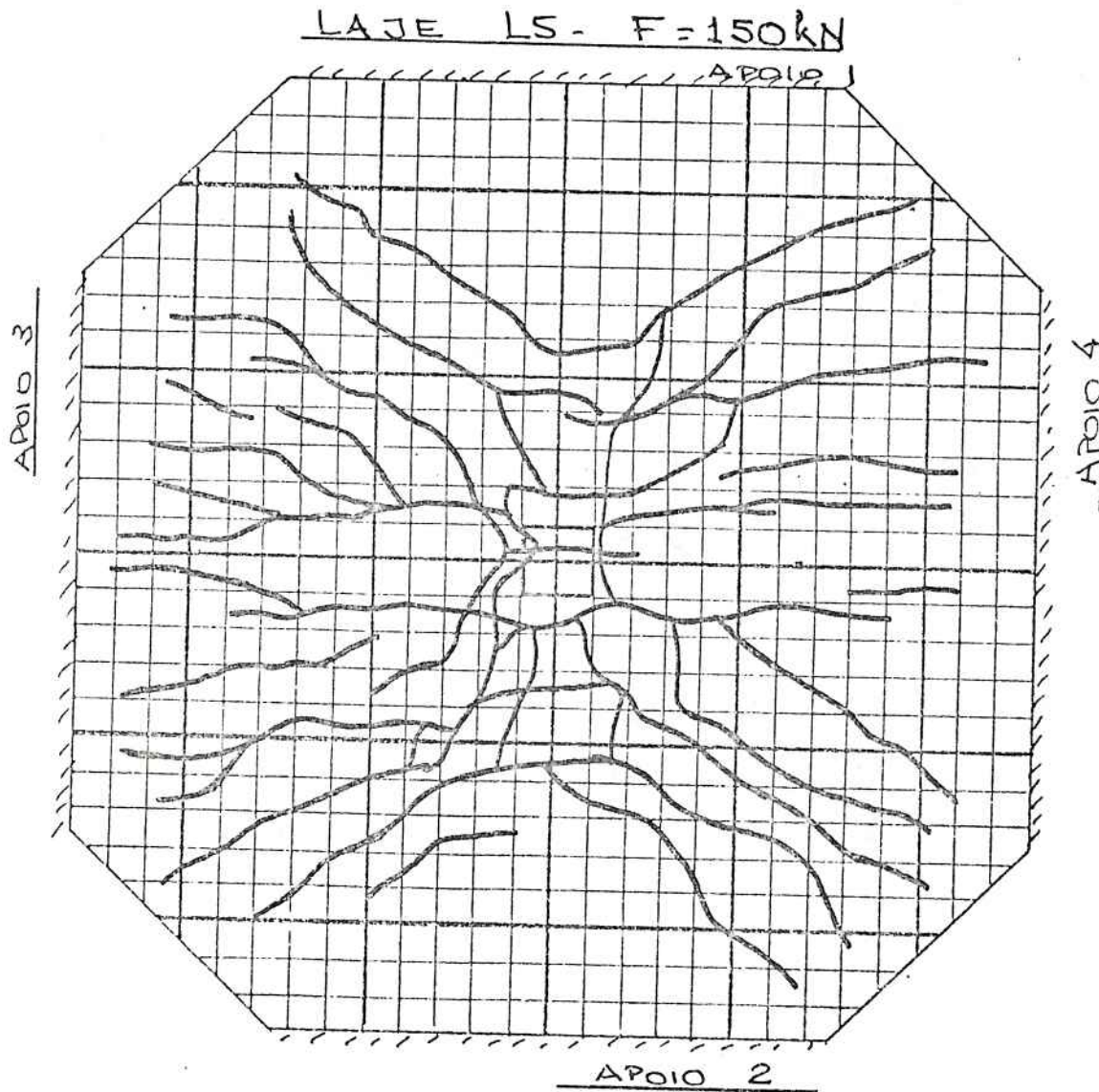


FIGURA 29
FISSURAÇÃO DA LAJE L 5

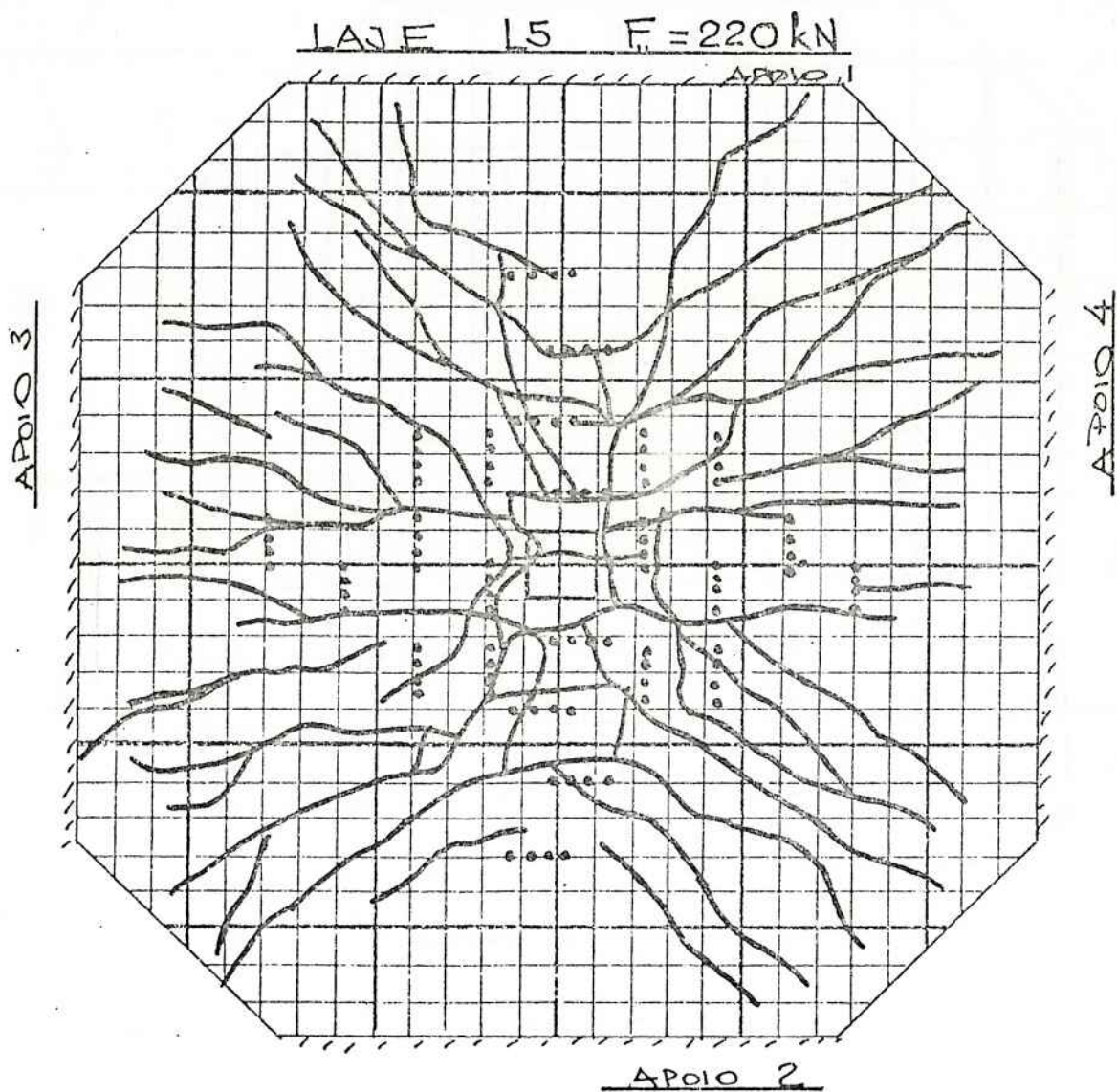


FIGURA 30
FISSURACÃO DA LAJE L 5
E
POSICÃO DOS ESTRIBOS

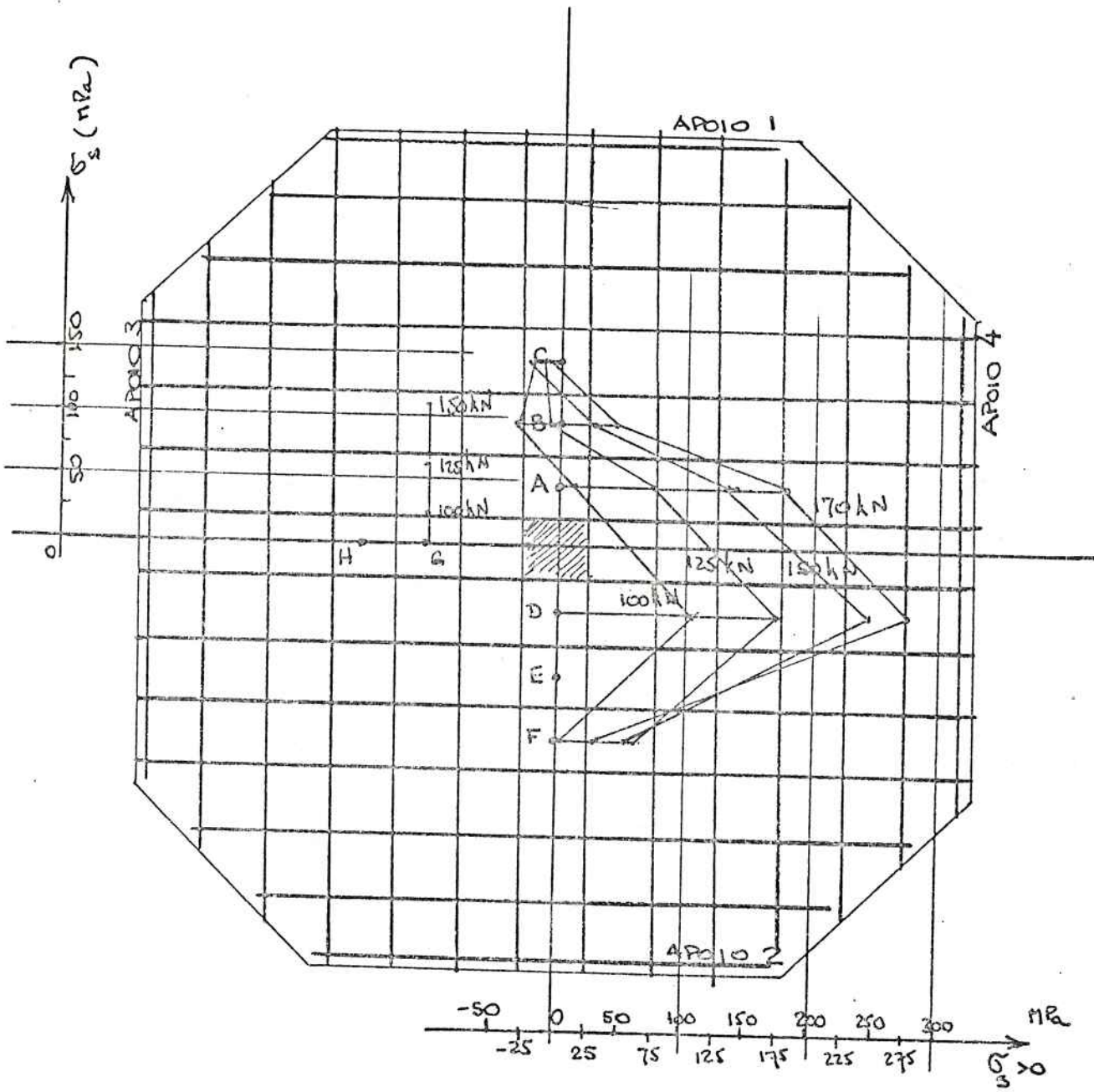


FIGURA 31

TENSÕES NOS ESTRIBOS DA LAJE L 2

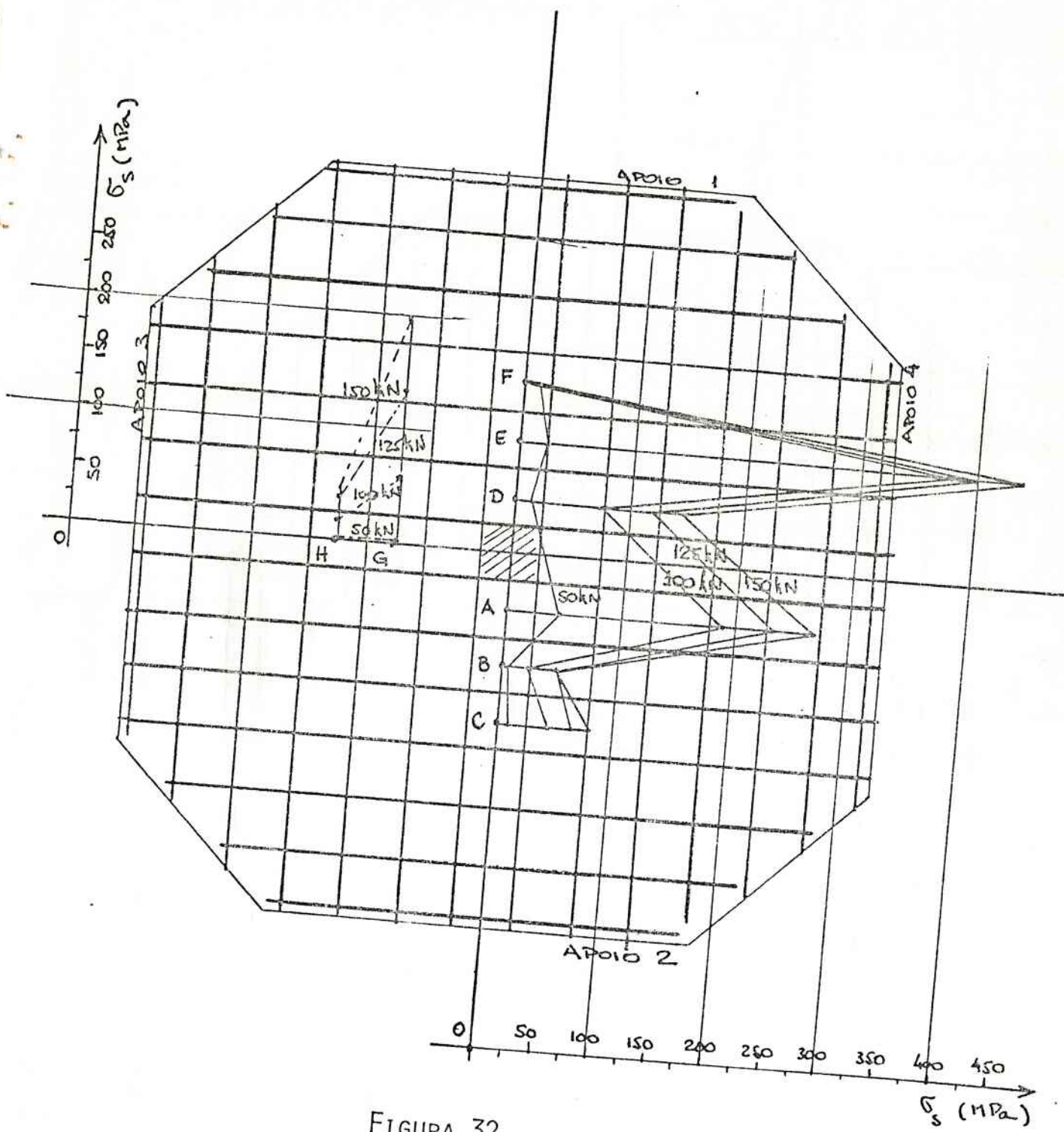


FIGURA 32
TENSÕES NOS ESTRIBOS DA LAJE L 3

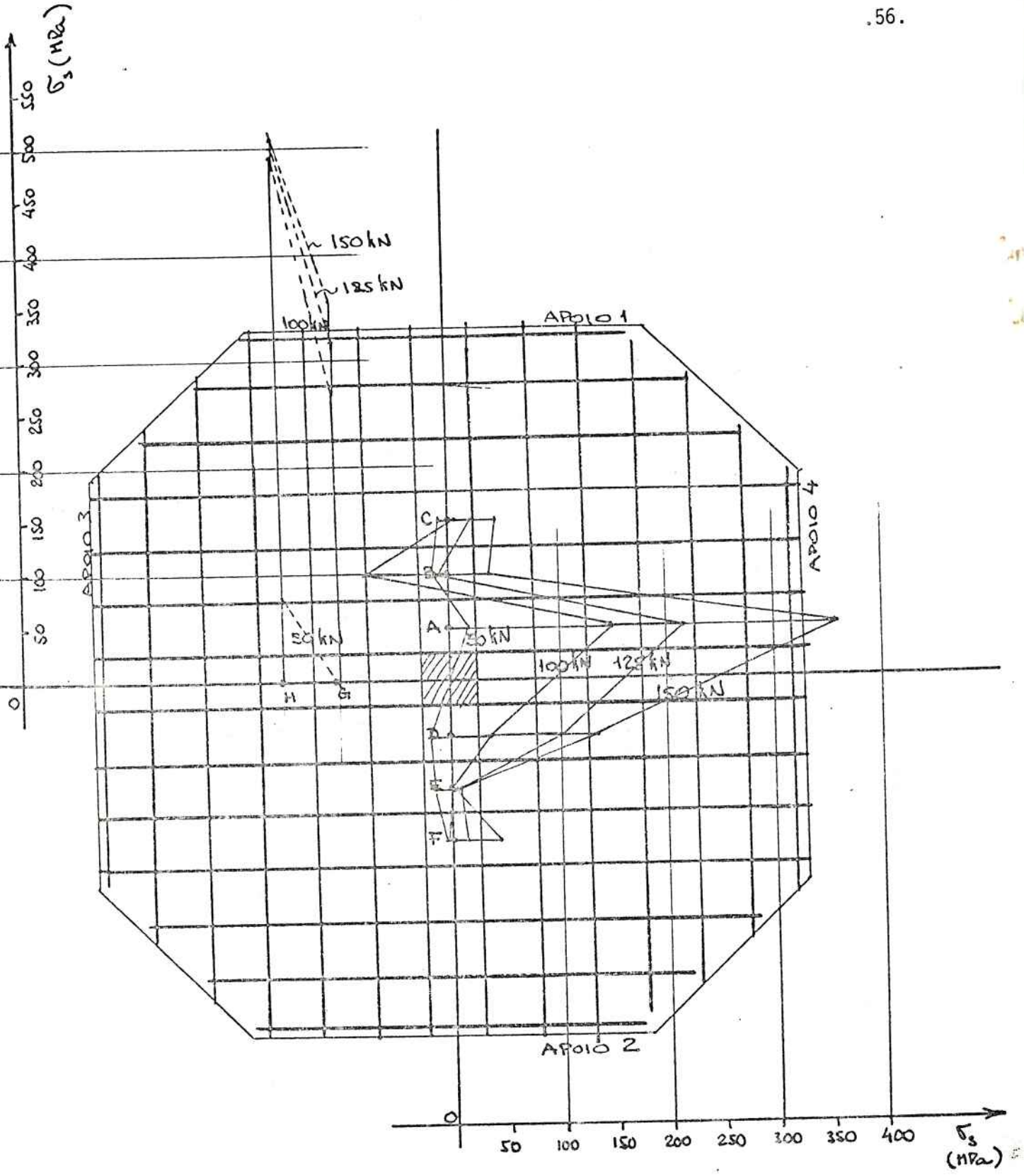


FIGURA 33
TENSÕES NOS ESTRIBOS DA LAJE L 4

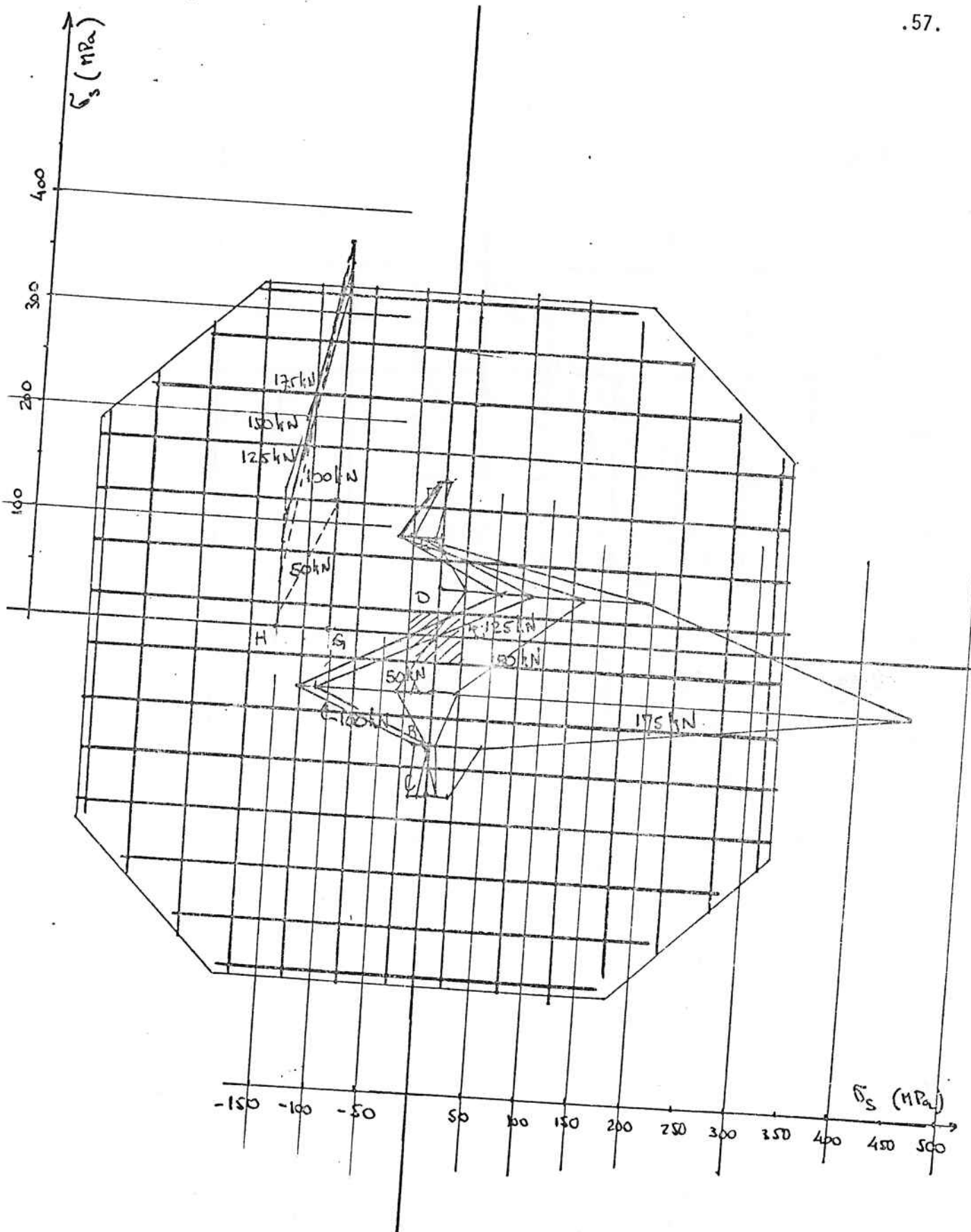
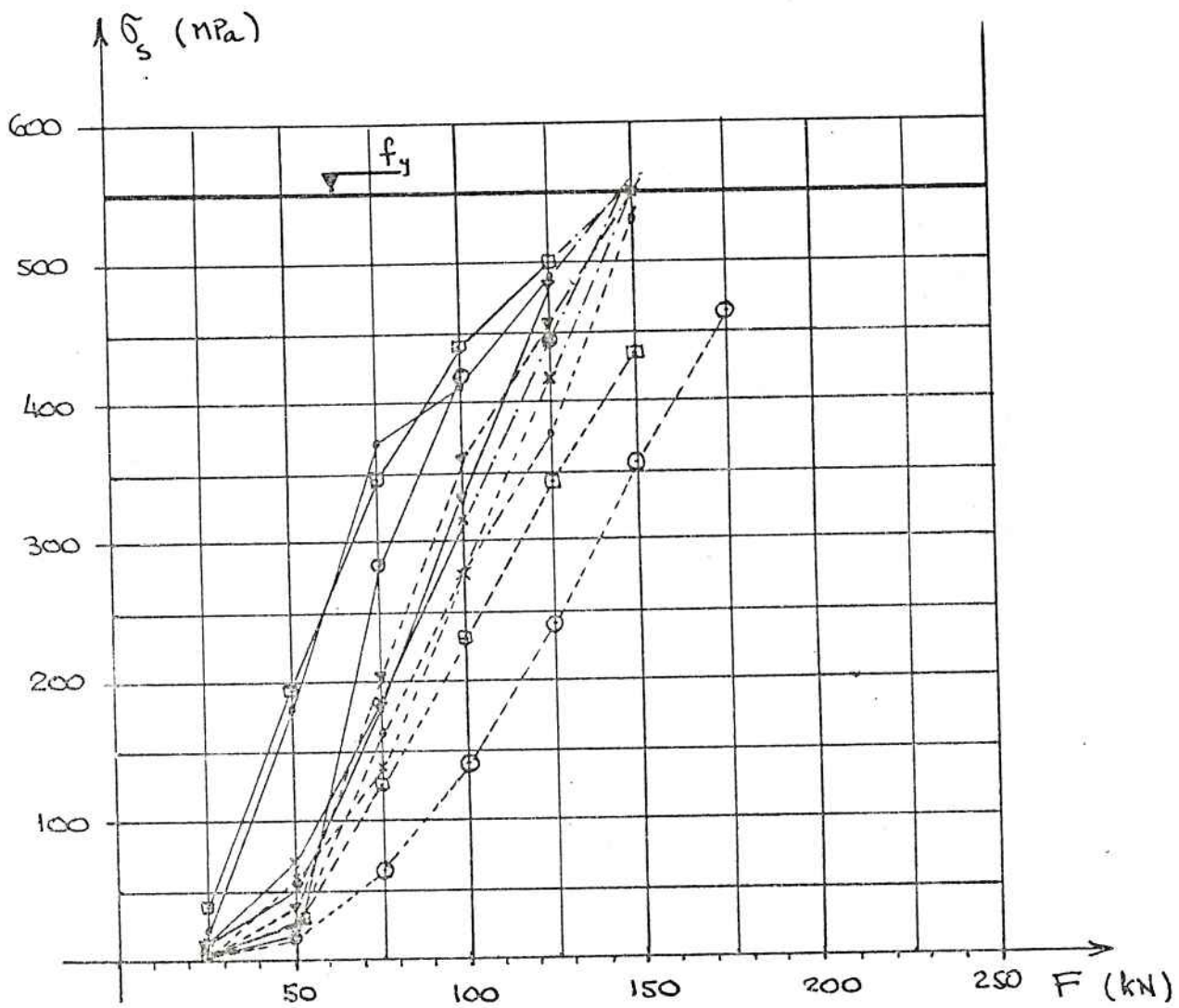


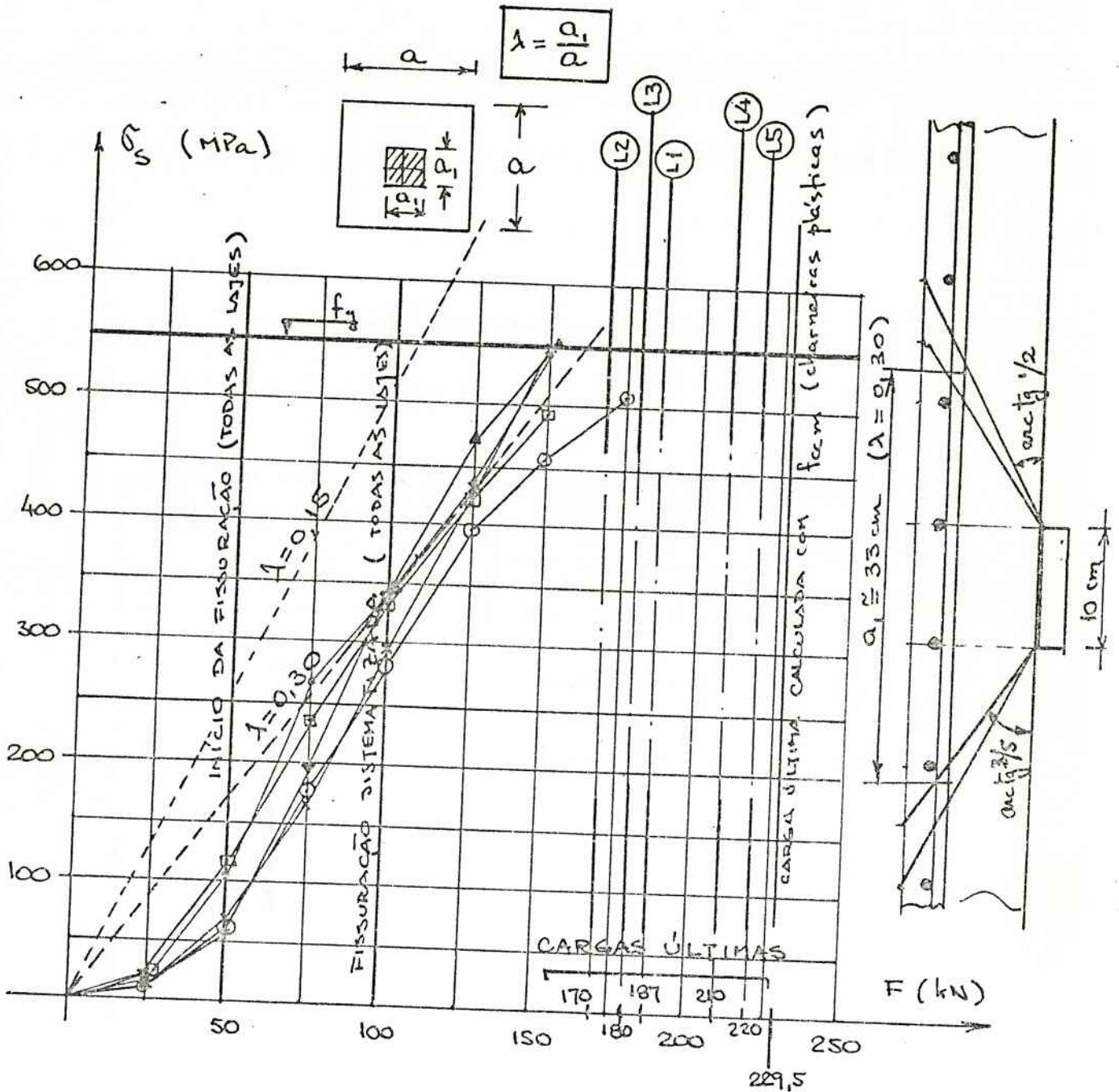
FIGURA 34.
TENSÕES NOS ESTRIBOS DA LAJE L 5



————— ARMADURA EXTERNA (média das leituras dos extensômetros 1 e 2)
 - - - - - ARMADURA INTERNA (média das leituras dos extensômetros 3 e 4)
 ······ VALORES EXTRAPOLADOS

- L1
- x L2
- ▼ L3
- ◻ L4
- ⊙ L5

FIGURA 35
TENSÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO



----- Momento calculado em regime elástico

•	L1	} (média da leitura de todos os extensômetros de cada laje, exceto os defeituosos na L5)
x	L2	
▼	L3	
□	L4	
○	L5	

FIGURA 36
TENSÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO
SÍNTESE DOS RESULTADOS

TABELAS E GRÁFICOS

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

(MPa)

LAJE	CORPOS DE PROVA DE CONTROLE		VALOR REPRESENTATIVO f_{cc}
	Nº 1	Nº 2	
L 1	28,7	27,0	28,7
L 2	27,4	29,9	29,9
L 3	29,7	30,4	30,4
L 4	28,0	28,5	28,5
L 5	26,8	27,1	27,1

Resistência à compressão do concreto

TABELA 1

$\phi \frac{1}{4}$ ($\phi 6,3$)
 $l = 88 \text{ mm}$

CARGA (KN)	ALONGAMENTOS NAS AMOSTRAS ($\Delta l - \text{mm}$)		
	1	2	3
0	0	0	0
2,00	0,040	-	0,045
4,00	0,065	0,050	0,085
6,00	0,095	0,080	0,110
8,00	0,120	0,105	0,140
10,00	0,150	0,140	0,170
12,00	0,195	0,185	0,205
14,00	0,250	0,250	0,240
16,00	0,360	0,440	0,300
18,00	0,590	0,800	0,420
20,00	1,100	1,400	0,750
22,00	-	-	1,200
CARGA DE RUPTURA	28,00	27,20	29,00

ALONGAMENTOS MEDIDOS

Determinação do diagrama tensão-deformação do aço dos estribos

TABELA N.º 2

$\phi 1/4$ ($\phi 6,3$)

σ_s	$10^6 \cdot \epsilon_s$		
	①	②	③
kN/cm^2			
0	0	0	0
6,3	450	-	510
12,6	740	570	970
18,9	1080	910	1250
25,3	1360	1190	1590
31,6	1700	1590	1930
37,9	2220	2100	2330
44,2	2840	2840	2730
50,5	4090	5000	3410
56,8	6700	9090	4770
63,2	12500	15910	8520
69,5	-	-	13640
σ_{su}	88,4	85,9	91,6

DEFORMAÇÕES MEDIDAS

Determinação do diagrama tensão-deformação do aço dos estribos

TABELA N.º 3

$\phi 1/4$ ($\phi 6,3$)

σ_A	$10^6 \cdot \epsilon_p$			
	1	2	3	média.
0	0	0	0	0
6,3	300	-	160	-
12,6	590	570	620	590
18,9	930	910	900	910
25,3	1210	1190	1240	1210
31,6	1550	1590	1580	1570
37,9	2070	2100	1980	2050
44,2	2690	2840	2380	2640
50,5	3940	5000	3060	4000
56,8	6550	9090	4420	6690
63,2	12350	15910	8170	12140
69,5				

DEFORMAÇÕES CORRIGIDAS

Determinação do diagrama tensão-deformação do aço dos estribos

TABELA N.º 4

$\phi 3/8$ ($\phi 10$)

.65.

$l = 88 \text{ mm}$

CARGA kN	Δl (mm)	
	①	②
0	0	0
4	0,020	0,020
8	0,045	0,045
12	0,070	0,070
16	0,095	0,095
20	0,120	0,125
24	0,145	0,155
28	0,175	0,190
32	0,215	0,230
36	0,265	0,285
40	0,450	-
CARGA RUPTURA	63,6	63,00

ALONGAMENTOS MEDIDOS

σ_s kN/cm ²	$10^6 \cdot \epsilon_s$	
	①	②
0	0	0
5,6	230	220
11,2	510	510
16,8	800	800
22,5	1080	1080
28,1	1360	1420
33,7	1650	1760
39,3	1990	2160
44,9	2440	2610
50,5	3010	3240
56,1	5110	-
σ_{su}	89,3	88,4

DEFORMAÇÕES MEDIDAS

Determinação do diagrama tensão-deformação do aço
da armadura de flexão

TABELA N.º 5

$\phi 3/8$ ($\phi 10$)

σ_A	$10^6 \cdot \epsilon_A$		
	①	②	média
0	0	0	0
5,6	0,080	0,080	0,080
11,2	0,105	0,105	0,105
16,8	0,130	0,130	0,130
22,5	0,155	0,155	0,155
28,1	0,180	0,185	0,182
33,7	0,205	0,215	0,210
39,3	0,235	0,250	0,242
44,9	0,275	0,290	0,282
50,5	0,325	0,345	0,335
56,1	0,510	-	-

DEFORMAÇÕES CORRIGIDAS

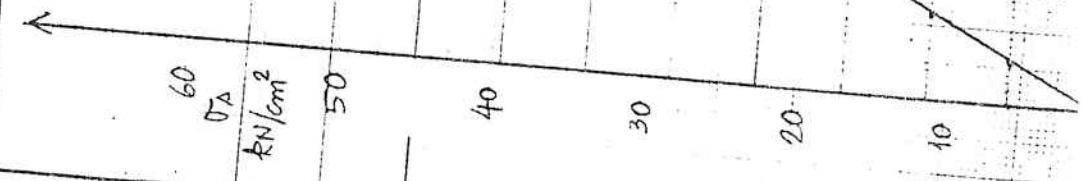
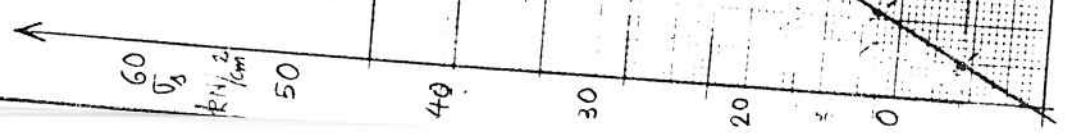
Determinação do diagrama tensão-deformação do aço
da armadura de flexão

TABELA N.º 6

GRÁFICO Nº 2

DIAGRAMAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

$\phi 3/8$ ($\phi 10$)



$E_A = 19500 \text{ KN/cm}^2$

$E_s = 195000 \text{ MPa}$

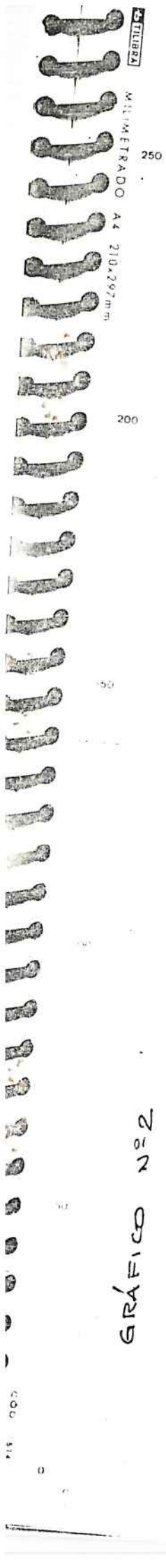


TABELA N.º 7

LAJE L1 - LEITURAS DOS EXTENSÔMETROS

R=120Ω; 10mm; GF=2,13

EXT. CARGA (kN)	1	2	3	4																
0	8000	8000	8000	8000																
25	8100	8112	8030	8020																
50	8870	8960	8120	8140																
75	10360	9620	8930	8740																
100	11020	10210	9370	9480																
125	12160	10570	9870	10160																
150	20050	14050	12450	11380																
175	25520	20200	20200	18660																

F_u = 187 kN

TABELA N.º 9

LAJE LI - TENSÕES NAS ARMADURAS (kN/cm²) (m)

EXT. CARGA (kN)	φ 3/8 (φ 10)											
	1	2	3	4								
0	0	0	0	0								
25	2,0	2,2	0,6	0,4								
50	17,1	18,7	2,3	2,7								
75	42,0	31,6	18,1	14,6								
100	49,0	32,7	26,7	28,9								
125	53,5	45,0	35,5	39,7								
150	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO	53,7	52,0								
175	-	-	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO								

* : kN/cm² = 10 MPa

TABELA N.º 10

LAJE L2 - LEITURAS DOS EXTENSÔMETROS

$R=120\Omega$; 10mm ; $GF=2,13$ $R=120\Omega$; 2mm ; $GF=2,07$ $R=120\Omega$
5mm; $GF=2,10$

EXT. CARGA (kN)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000		6000	6000	
25	6060	6090	6040	6000	6020	6040	6020	6020		6010	5950	
50	6380	6330	6560	6080	6070	6060	6010	6010		5990	5820	
75	7190	6710	7140	6270	6000	5780	6010	6140		6000	5920	
100	8140	7180	7860	6860	6060	5840	5900	6520		6010	6110	
125	11300	7810	8690	8010	6360	5940	5920	6840		6310	6300	
150	17000	14400	10200	—	6640	6130	5880	7180		6250	6540	
170	—	—	—	—	6870	6220	5970	7340		6140	6630	

$F_u = 170\text{ kN}$

TABELA N° II

LAJE L2 - DEFORMAÇÕES MEDIDAS (10⁶ ε_s)

EXT. CARGA (KGF)	R=120Ω; 10mm; GF=2,13				R=120Ω; 2mm; GF=2,07								R=120Ω 5mm; GF=2,10	
	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25	60	90	40	0	20	40	20	20		10	-150			
50	380	330	560	80	70	60	10	10		-10	-180			
75	1190	710	1140	270	0	-220	10	140		0	-80			
100	2140	1180	1860	960	60	-160	-100	520		10	110			
125	5300	1810	2690	2010	360	-60	-80	840		310	300			
150	11000	8400	4200	-	640	130	-120	1180		250	540			
170	-	-	-	-	870	220	-30	1340		140	630			

TABELA N.º 12

LADJE L2 - TENSÕES NAS ARMADURAS (kN/cm²)*

φ3/8 (φ10) φ1/4 φ(6,3)

EXT CARGA (kN)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	-
25	1,2	1,8	0,8	0	0,4	0,8	0,4	0,4	-	0,2	-3,1	-
50	7,4	6,4	10,9	1,6	1,4	1,2	0,2	0,2	-	-0,2	-3,7	-
75	23,2	13,8	22,2	5,3	0	-4,5	0,2	2,9	-	0	-1,6	-
100	39,5	23,0	35,5	18,7	1,2	-3,2	-2,1	10,7	-	0,2	2,3	-
125	ESCOAM.	34,5	46,0	37,5	7,4	-1,2	-1,6	17,2	-	6,4	6,2	-
150	-	ESCOAM.	54,5	ESCOAM.	13,1	2,7	-2,5	24,2	-	5,1	11,0	-
170	-	-	ESCOAM.	-	17,8	4,5	-0,6	27,5	-	2,9	12,9	-

* 1 kN/cm² = 10 MPa

TABELA N.º 13

LAJE L3 - LEITURAS DOS EXTENSÔMETROS

$R=120\Omega$; 5 mm ; $GF=2,10$ $R=120\Omega$; 10 mm ; $GF=2,13$

EXT. CARGA (kN)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
25	6040	6120	6020	6040	6010	6000	6000	6000	6000	6030	6030	6020
50	6170	6430	6360	6170	6220	6020	6040	6060	6100	6060	6010	6010
75	6750	7150	7400	6710	6640	5960	6150	6190	7880	6060	5960	6080
100	7500	7970	8330	7590	6920	6110	6210	6370	8040	5960	6280	6080
125	8580	9770	8860	8450	7220	6230	6300	6580	8210	6010	6640	6190
150	15650	17020	16460	14000	7300	6220	6390	6730	8620	6100	6940	6230
180	22140	20670	24000	19800	7340	6250	6460	6990	9040	6250	7320	6340

$F_u = 180\text{ kN}$

TABELA N° 14

LAJE L3 - DEFORMAÇÕES MEDIDAS (10⁶ ε_s)

R=120Ω; 10 mm; GF=2,13 R=120Ω; 5 mm; GF=2,10

EXT. CARGA (KN)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	40	120	20	40	10	0	0	0	0	0	0	0
50	170	430	360	170	220	20	40	60	100	30	30	20
75	750	1150	1400	710	640	-40	150	190	1880	60	10	10
100	1500	1970	2330	1590	920	110	210	370	2040	-40	-40	80
125	2580	3770	2860	2450	1120	230	300	580	2210	10	280	80
150	9650	11020	10460	8000	1300	220	390	730	2620	100	640	190
180	16140	14670	18000	13800	1340	250	460	990	3040	250	1320	340

TABELA N.º 15

LAJE L3 - TENSÕES NAS ARMADURAS (kN/cm²) (*)

EXT CARGA (kN)	Ø 3/8 (Ø 10)								Ø 1/4 (Ø 6,3)															
	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,8	2,3	0,4	0,8	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,6	0,4	0,4
50	3,3	8,4	7,0	3,3	4,5	0,4	0,4	0,8	1,2	2,1	0,2	0,2	1,2	1,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,2	1,2	0,2	0,2	0,2
75	14,6	22,4	27,3	13,8	13,1	-0,8	3,1	3,9	3,9	35,5	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8	1,6	1,6	1,6	1,6	1,2	1,2	0,8	1,6	1,6
100	29,3	37,5	41,5	30,7	18,9	2,3	4,3	7,6	7,6	37,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	1,6	1,6	1,6	0,8	0,8	5,7	1,6	1,6
125	45,0	52,5	47,5	43,5	23,0	4,7	6,2	11,9	11,9	39,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,6	1,6	1,6	1,6	0,2	0,2	13,1	3,9	3,9
150	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO	26,7	4,5	8,0	15,0	15,0	44,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,6	1,6	1,6	1,6	2,1	2,1	19,3	4,7	4,7
180	-	-	-	-	28,0	5,1	9,4	20,3	20,3	46,0	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	1,6	1,6	1,6	1,6	5,1	5,1	27,0	7,0	7,0

(*) 1 kN/cm² = 10 MPa

TABELA N.º 16

LAJE L4 - LEITURAS DOS EXTENSÔMETROS

EXT CARGA (kN)	R=120Ω ; 5mm ; GF = 2,10											
	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000
25	11300	11100	11060	11030	11030	10990	11000	11000	10950	11020	11000	11000
50	12090	11930	11250	11070	11090	10910	10970	10920	10920	10990	10990	11380
75	12870	12670	11800	11460	11510	10730	11020	10920	10920	10980	11800	11200
100	13840	13240	12320	12010	11730	10620	11060	11180	11000	10980	12320	14650
125	14220	14080	12910	12670	12060	10940	11100	11490	11030	11070	12590	14870
150	23940	23630	13450	13350	12890	11190	11210	11660	11010	11210	12840	15100
175	28870	28040	16740	19580	12600	11460	11240	11820	11010	11260	13120	15330
	-	-	-	-	12800	11810	11320	12070	10940	11370	13470	15430

F_u = 210 kN

TABELA Nº 17

LABE LH - DEFORMAÇÕES MEDIDAS (10⁶ ε_s)

R = 120 Ω; 10 mm; GF = 2,13 R = 120 Ω; 5 mm; GF = 2,10

Ext Carga (kg)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	300	100	60	30	30	-10	0	0	-50	20	0	0
50	1090	930	250	70	90	-90	-30	-80	-80	-10	-10	380
75	1870	1670	800	460	510	-270	20	-80	-80	-20	800	3200
100	2840	2240	1320	1010	730	-380	60	180	0	-20	1320	3650
125	3220	3080	1910	1670	1060	-60	100	490	30	70	1590	3870
150	12940	12630	2450	2350	1890	190	210	660	10	210	1840	4100
175	17870	17040	5740	8580	1600	490	240	820	10	260	2120	4330
	-	-	-	-	1800	810	320	1070	-60	370	2470	4430

TABELA Nº 18

LAJE L4 - TENSÕES NAS ARMADURAS (kN/cm²) (*)

CARGA (kN)	TENSÕES NAS ARMADURAS (kN/cm ²)											
	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	5,9	2,0	1,2	0,6	0,6	-0,2	0	0	-1,0	0,4	0	0
50	21,3	18,1	4,9	1,4	1,8	-1,8	-0,6	-1,6	-1,6	-0,2	-0,2	7,8
75	35,4	34,0	15,6	9,0	10,5	-5,5	0,4	-1,6	-1,6	-0,4	16,4	47,0
100	47,3	40,5	25,7	19,7	15,0	-7,8	1,2	3,7	0	-0,4	27,0	49,0
125	50,5	49,5	36,0	32,0	21,7	-1,2	2,1	10,0	0,6	1,4	31,6	50,0
150	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO	44,5	42,0	35,7	3,9	4,3	13,5	0,2	4,3	35,2	50,8
175	-	-	ESCOAMENTO	ESCOAMENTO	32,0	10,0	4,9	16,8	0,2	5,3	38,6	51,3
					34,5	16,6	6,6	21,9	-1,2	7,6	42,5	51,5

(*) 1 kN/cm² = 10 MPa

TABELA N° 19

LAJE LS - LEITURAS DOS EXTENSÔMETROS

$R=120\Omega$; 10 mm ; $GF=2,13$ $R=120\Omega$; 5 mm ; $GF=2,10$

EXT. CARGA (KN)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	11000	11000	11000	—	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000
25	11090	10950	11020	—	10960	10970	11010	11020	10980	10990	11015	10970
50	11530	11050	11080	—	10830	10980	11030	11120	10980	11010	11610	11050
75	12450	11100	11330	—	10340	10950	10970	11290	10900	11020	12820	11100
100	13310	11260	11720	—	10380	10920	10910	11290	10800	10970	12950	11200
125	17800	11560	12230	—	10450	10980	10970	11410	10850	10970	12960	11390
150	25800	11930	12870	—	11110	11020	11030	11660	10800	10950	12710	11520
175	—	12310	13740	—	13840	11230	11100	11960	10880	10980	12840	11650
200	—	—	—	—	14770	11300	11130	12240	10980	11070	12820	11710
220	—	—	—	—	16700	11400	14270	12670	14110	11300	13310	11940

$F_u = 220\text{ kN}$

TABELA N.º 20

LAJE LS - DEFORMAÇÕES MEDIDAS (10⁶ ε_s)

$R=120\Omega; 10\text{mm}; GF=2,13$ $R=120\Omega; 5\text{mm}; GF=2,10$

EXT. CARGA (KV)	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
25	90	-50	20	-	-40	-30	10	20	-20	-10	15	-30
50	530	50	80	-	-170	-20	30	120	-20	10	610	50
75	1450	100	330	-	-660	-50	-30	290	-100	20	1820	100
100	2310	260	720	-	-620	-80	-90	290	-200	-30	1950	200
125	6800	560	1230	-	-550	-20	-30	410	-140	-30	1960	390
150	14800	930	1870	-	110	20	30	660	-200	-50	1710	520
175	-	1310	2740	-	2840	230	100	960	-120	-20	1840	650
200	-	-	-	-	3770	300	130	1240	-20	70	1820	710
220	-	-	-	-	5700	400	3270	1670	3110	300	2310	940

TABELA N.º 21

L.AJE. LS - TENSÕES NAS ARMADURAS (KN/cm²) (*)

EXT. CARGA (KN)	φ 3/8 (φ10)							φ 1/4 (φ6,3)						
	1	2	3	4	A	B	C	D	E	F	G	H		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25	1,8	-1,0	0,4	-	-0,8	-0,6	0,2	0,4	-0,4	-0,2	0,3	-0,6		
50	10,3	1,0	1,6	-	-3,5	-0,4	0,6	2,5	-0,4	0,2	12,5	1,0		
75	28,3	2,0	6,4	-	-13,5	-1,0	-0,6	5,9	-2,0	0,4	35,0	2,0		
100	41,5	5,1	14,0	-	-12,7	-1,6	-1,8	5,9	-4,1	-0,6	36,7	4,1		
125	ESCOA- NETO	10,9	23,9	-	-11,3	-0,4	-0,6	8,4	-2,9	-0,6	36,8	8,0		
150	*	18,1	35,5	-	2,3	0,4	0,6	13,5	-4,1	-1,0	33,0	10,7		
175	#	25,5	46,5	-	45,0	4,7	2,0	19,7	-2,5	-0,4	35,0	13,3		
200					49,5	6,2	2,7	25,4	-0,4	1,4	35,0	14,6		
220					-	8,2	47,0	32,5	45,3	6,2	41,7	19,3		

(*) 1 KN/cm² = 10 MPa

(#) VALORES SOB SUSPEITA