

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE
MODELO REDUZIDO DE UMA ESTRUTURA DE
CONTENÇÃO PARA CENTRAIS NUCLEARES

Francisco P.S.L.Gastal

Francisco P.S.L.Gastal

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE
UM MODELO REDUZIDO DE UMA ESTRUTURA DE
CONTENÇÃO PARA CENTRAIS NUCLEARES**

Tese apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de "MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL".

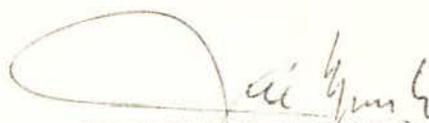
Porto Alegre
Estado do Rio Grande do Sul - Brasil
Setembro/1979

FALTANDO FOLHA 72

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de "MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL" e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. Guillermo J. Creus
Orientador



Prof. José S. Gomes Franco
Coordenador do Curso

Este trabalho é dedicado
a meus pais
FRANCISCO
e
GRAZIELLA

AGRADECIMENTOS

Ao orientador deste trabalho, Prof. Guillermo J. Creus pelo dedicado acompanhamento deste estudo e pela valiosa experiência transmitida.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na pessoa de seu coordenador Prof. José S. Gomes Franco, pelo constante apoio, pela confiança depositada e pelos incentivos dados no transcorrer de toda esta jornada.

Aos Professores Ademar G. Groehs, Flávio F. Presser, Maria Inês G. dos Santos e Pablo G. Bignon, por valiosos comentários e pela incansável cooperação no que se refere ao desenvolvimento numérico deste trabalho.

A Carlos F. Zanella, Paulo F. Bueno e Rudimar A. Chies, pela imensa colaboração, tanto na montagem, quanto no desenvolvimento dos ensaios experimentais.

A Luis Krein e a Srta. Liliani Gaeversen, pelo cuidadoso trabalho datilográfico.

A meu pai, pelo criterioso trabalho de revisão do texto.

À Sra. Juliana Z. Bonilha, pela preparação das referências bibliográficas.

À Srta. Dora Lúcia F. de Oliveira, pela reprodução dos desenhos ilustrativos.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pelo apoio financeiro prestado.

À Fundação de Ciência e Tecnologia (CIEN TEC), na pessoa dos engenheiros Alfieri F. Gobetti e Dayson M. da Silva pela colaboração e pelos equipamentos cedidos.

À minha noiva Guiomar e a todos os meus amigos que com sua compreensão e afeto tanto me incentivaram.

A todos os professores, colegas e funcionários do Curso de Pós-Graduação, que de alguma forma colaboraram para a realização de nossos objetivos.

SINOPSE

Este trabalho descreve um estudo sobre o comportamento elástico de vasos de contenção de concreto protendido, para centrais nucleares, utilizando uma análise numérico-experimental efetuada sobre um modelo reduzido.

Inicialmente é dada uma descrição da estrutura e dos carregamentos atuantes, a seguir descreve-se o modelo construído em microconcreto, com seus sistemas de carga e medição, apresentando-se, também, todos os detalhes da análise numérica, assim como uma explanação de como foram procedidos os ensaios experimentais e, finalmente, expõem-se os resultados obtidos tendo-se também algumas conclusões.

SYNOPSIS

This work describes numerical and experimental studies performed on a reduced model of a prestressed concrete containment vessel for a nuclear reactor.

Firstly, the structure and the acting loads are described. Then, the micro-concrete model, the loading and measuring systems are detailed as well as the procedures for the experimental and numerical analysis.

Finally, the results are shown and discussed, and some conclusions are drawn.

SUMÁRIO

	Pág.
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2	
DESCRIÇÃO GERAL DO PROBLEMA.....	7
CAPÍTULO 3	
ANÁLISE NUMÉRICA.....	16
3.1 - <u>Considerações gerais</u>	16
3.2 - <u>Análise da pressão interna</u>	19
3.3 - <u>Análise das protensões</u>	33
3.4 - <u>Análise da carga lateral</u>	42
CAPÍTULO 4	
MONTAGEM E PREPARAÇÃO DO MODELO.....	70
4.1 - <u>Fôrmas (*)</u>	70
4.2 - <u>Colocação dos cabos da protensão vertical</u> ...	72
4.3 - <u>Concretagem</u>	75
4.4 - <u>Retirada das fôrmas externas</u>	78
4.5 - <u>Acabamento</u>	81
4.6 - <u>Retirada da base e fôrma interna</u>	81
4.7 - <u>Colagem dos strain gages internos</u>	82
4.8 - <u>Transporte do modelo à mesa de ensaios</u>	87
4.9 - <u>Colocação dos strain gages e cabos externos</u> ..	87
4.10 - <u>Sistema de carga</u>	90
4.10.1 - Cabos de protensão.....	90
4.10.2 - Ancoragens.....	92
4.10.3 - Mesa e chapa de apoio do modelo....	96
4.10.4 - Peça de ancoragem dos cabos externos ...	98
4.10.5 - Barras de sustentação.....	100
4.10.6 - Pórtico de protensão horizontal.....	100
4.10.7 - Sistema de pressão interna.....	105
4.10.8 - Sistema de carga lateral.....	107
4.11 - <u>Posicionamento dos strain gages</u>	112
4.12 - <u>Posicionamento dos deflectômetros</u>	113

CAPÍTULO V

ENSAIOS PRELIMINARES E EQUIPAMENTOS.....	119
5.1 - <u>Sistema de carga.....</u>	119
5.1.1 - Cabos de protensão.....	119
5.1.2 - Ancoragens.....	119
5.1.3 - Barras de sustentação da carga de protensão.....	126
5.1.4 - Sistema de pressão interna.....	126
5.1.5 - Sistema de protensão vertical.....	127
5.1.6 - Sistema de protensão horizontal.....	129
5.1.7 - Sistema de carga lateral.....	129
5.1.8 - Determinação do atrito nos cabos de protensão.....	129
5.2 - <u>Microconcreto.....</u>	137
5.2.1 - Compressão simples.....	137
5.2.2 - Tração indireta.....	139
5.2.3 - Tração na flexão.....	141
5.2.4 - Curva tensão-deformação.....	148
5.2.5 - Coeficiente de Poisson.....	152
5.3 - <u>Aparelhagem de medição e equipamentos.....</u>	156
5.3.1 - Strain gages.....	156
5.3.2 - Strain indicators.....	158
5.3.3 - Células de carga.....	158
5.3.4 - Deflectômetros.....	161
5.3.5 - Equipamentos auxiliares.....	161

CAPÍTULO VI

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS NO MODELO.....	163
6.1 - <u>Introdução.....</u>	163
6.2 - <u>Protensão vertical.....</u>	169
6.3 - <u>Protensão horizontal.....</u>	174
6.4 - <u>Carregamento lateral.....</u>	179

CAPÍTULO VII

RESULTADOS E COMPARAÇÕES.....	183
--------------------------------------	------------

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	196
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	200
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	202

- (*) Não obstante ter sido abolido, pela lei nº 5657 de 18 de dezembro de 1971, o acento diferencial na letra "o" da sílaba tônica das palavras homógrafas, tomamos, no presente trabalho, a liberdade de utilizar o acento circunflexo na palavra "fôrma", para diferenciá-la da palavra "forma", como se procedia antes de entrar em vigor a referida lei, em face das dificuldades de interpretação do texto que a extinção desse acento acarretaria, em prejuízo da clareza, da facilidade da sua leitura e, portanto, de sua devida significação.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O uso de reatores nucleares como fonte geradora de energia tem sido bastante intensificado, principalmente após a grande crise energética sentida nos últimos anos.

Apesar de muito controvertida, sua utilização crescente tem incentivado sobremaneira estudos nas mais diversas áreas e principalmente no ramo da engenharia, referentes à melhor compreensão do devido comportamento destes sistemas complexos.

À engenharia estrutural cabe, dentre outros estudos, o do comportamento, projeto e construção de estruturas tais como vasos de pressão⁴ e contenção¹². Estas últimas, como ilustra a Fig. 1.1, normalmente utilizadas como estruturas envolventes de grande parte do complexo nuclear, têm a finalidade de proteger o meio externo de vapores, eventualmente radioativos³, que possam desenvolver-se em caso de acidentes, atuando, assim, como barreira biológica e física, protegendo também o conteúdo de ocorrências externas, quando não, simplesmente, dos efeitos do tempo, também do possível choque de projéteis.

Os reatores do tipo água fervente (BWR) até algum tempo utilizavam vasos de contenção construídos em aço, porém, ultimamente, para alguns destes, como também para os reatores de água pressurizada (PWR) de mais de 400 Mw(e), existe uma tendência generalizada para o uso de construções em concreto, tanto armado como protendido, por uma série de vantagens apresentadas por estes materiais, tais como⁶.

- maior facilidade na modificação de sua geometria, o que permite muita flexibilidade na orientação dos equipamentos contidos na usina nuclear;

- maior resistência a acidentes que envolvam o cho

que de projéteis, que devem ser considerados em projetos desta natureza;

- menor ocorrência de problemas tão complexos e caros como, por exemplo, o de normalização das soldas, exigidos em caso de vasos de contenção de aço que necessitam ter grandes espessuras.

Também alguns fatores econômicos impõem o uso mais acentuado deste material de tão fácil aquisição e controle, em comparação com o aço que, em muitos casos, gera uma grande dependência de tecnologia avançada.

Quanto à distinção entre o uso do concreto armado convencional e do concreto protendido, há uma série de razões favorecendo a cada um deles, sendo que algumas podem ser citadas em favor das estruturas de concreto protendido, tais como⁵:

- melhor controle de fissuração, o que traz maior segurança quanto à estanqueidade dos vasos de pressão e contenção;

- utilização de revestimentos (liners)³ de resina epoxi, mais práticos e econômicos que os de aço;

- o comportamento da estrutura durante sua vida útil pode ser acompanhado através do controle da fissuração; defeitos podem ser corrigidos antes que a estrutura perca sua utilidade.

Entretanto, geralmente esta escolha é determinada principalmente por fatores econômicos⁶.

Com a finalidade primeira de assegurar a blindagem biológica dos vasos de contenção, em muitos deles utiliza-se um revestimento, em sua superfície interna, que pode ser de aço, com espessura de até 1/2⁶, como é muito utilizado nos Estados Unidos, para vasos em concreto armado e também protendido, ou mais simplesmente, um revestimento em resina epoxi, como utiliza a central de Embalse em Córdoba⁸, Argentina, e também a central de Gantilly-2 na província de Quebec no Canadá, para vasos de contenção em concreto protendido.

Este tipo de revestimento, que consiste em uma

grossa pintura de resina epoxi, cuja vantagem é essencialmente econômica, tem demonstrado que sua confiabilidade é adequada aos requerimentos, entretanto este tipo de revestimento obriga a se obter uma maior segurança na determinação das tensões na estrutura de concreto, já que eventuais fissuras provocariam a ruptura deste revestimento e portanto perda de estanqueidade.

Torna-se, então, bastante complexa a escolha do tipo de vaso de contenção a ser construído em uma usina nuclear, podendo-se optar entre vasos de aço, de concreto armado ou protendido e ainda estes podem ou não conter um revestimento. Esta escolha, dentre uma série imensa de fatores, depende principalmente de razões estruturais e econômicas.

Para o projeto e cálculo destas estruturas, podem ser utilizadas²³ a teoria da elasticidade, a teoria de cargas limites, ou ambas, sendo que a estrutura deve sempre ser proporcionada de tal forma a que as tensões, sob cargas de serviço, fiquem contidas nos limites estabelecidos pelos códigos apropriados, tais como os ACI, ASME e outros.

As cargas utilizadas nestes projetos, além das usuais, das quais podem ser citadas

- peso próprio
- sobrecargas
- protensões
- efeitos de temperatura
- retração
- creep (fluência lenta),

envolvem, também, algumas acidentais, tais como as de acidentes por perda de arrefecedor (LOCA)¹⁷, que produzem um súbito aumento de pressão e temperatura internas, como, outrossim, aquelas produzidas por impacto de projéteis, tanto lançados interna como externamente.

Segundo o critério adotado, estas estruturas podem ainda ser consideradas como cascas finas, de média ou, até mesmo, de grossa espessura. Sobre este problema há ainda hoje uma grande divergência entre autores²³, dentre os quais alguns acreditam que a teoria de cascas finas pode ser adotada para

casca com relação espessura-raio de curvatura (t/r) de 1:50 até 1:1000, sendo que outros aceitam esta teoria para relações até inferiores a 1:5.

Entretanto, é geralmente aceito que para relações t/r entre 1:10 e 1:15, nas quais engloba-se a grande maioria das estruturas de contenção em concreto, estas teorias não apresentam resultados muito diferentes.

Face à complexidade de que se reveste este tipo de estrutura e pelo seu largo uso na crescente indústria nuclear, há uma necessidade premente de um crescimento paralelo no entendimento tecnológico destas estruturas, e isto é evidente como parte da obrigação industrial de garantir adequadas provisões para a segurança pública.

Como parte de um projeto integrado entre governo e universidades, cuja finalidade principal é a de desenvolver tecnologia e capacitação pessoal, não só para os complexos de Angra I e II, como também para o melhor desenvolvimento do projeto nuclear brasileiro, a UFRGS vem mantendo um programa de pesquisas⁹, relacionadas de uma ou outra forma com este objetivo.

Este trabalho, como parte disto, trata do estudo do comportamento elástico de vasos de contenção de terceira geração¹³, em concreto protendido, através do uso de um modelo reduzido.

Este modelo, Fig. 1.2, construído de forma bastante simplificada e ensaiado experimentalmente, tem a finalidade de, na medida de nossas possibilidades, fornecer resultados que, comparados com aqueles obtidos através de uma análise numérica, possam ajudar a nossa melhor compreensão sobre o devido comportamento deste tipo de estrutura. Também estes resultados, tanto numéricos como experimentais, podem servir para que, quando confrontados, esclareçam alguns problemas, até então obscuros, que podem ser solucionados melhorando o nosso conhecimento sobre análise experimental e também numérica.

Porém, a finalidade primeira deste trabalho é a de desenvolver uma tecnologia local, tanto na concepção como na

construção de modelos reduzidos, o que pode, dependendo do nosso interesse e dedicação, trazer uma grande experiência, não só na utilização da análise experimental como, também, na melhor compreensão do comportamento de algumas estruturas.

No Capítulo 2 faz-se uma apresentação do problema, descrevendo-se o modelo, quais os carregamentos a ele aplicados e como estes foram procedidos.

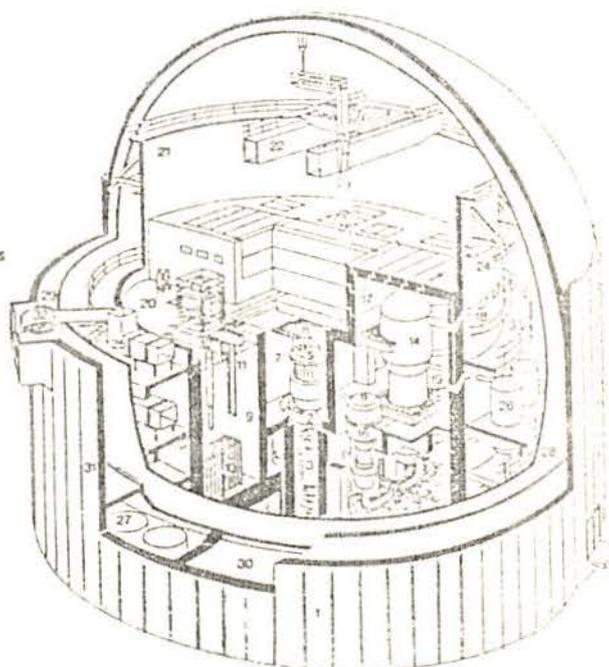
No Capítulo 3 encontra-se uma análise numérica, feita sobre o próprio modelo, utilizando elementos finitos, a qual estuda detalhadamente cada um dos carregamentos utilizados.

Nos Capítulos 4 e 5 estão detalhados todos os passos seguidos para a confecção do modelo, os sistemas de fôrmas, de carregamento e de medição, assim como também os ensaios paralelos, seus resultados e os equipamentos utilizados.

No Capítulo 6 faz-se uma narração de como foram procedidos os ensaios no próprio modelo e apresentam-se todos os problemas encontrados.

Finalmente, nos Capítulos 7 e 8 encontram-se os resultados obtidos, algumas conclusões e sugestões.

- LAYOUT
- 1 Reactor building
 - 2 Pressure vessel
 - 3 Fuel elements
 - 4 Control rods
 - 5 Platform
 - 6 Reactor pit
 - 7 Reactor room
 - 8 Cable bridge
 - 9 Fuel element well
 - 10 Storage rack for fuel elements
 - 11 Gate leaf
 - 12 Manipulation bridge
 - 13 Biological shield
 - 14 Steam generator
 - 15 Main coolant pipe
 - 16 Main coolant pump
 - 17 Steam generator room
 - 18 Live steam pipe
 - 19 Feedwater pipe
 - 20 Operating room
 - 21 Craneway
 - 22 Crane (2200/300 kN)
 - 23 Current collector for crane
 - 24 Ventilation
 - 25 Circulating air system
 - 26 Pressure store
 - 27 Coolant store
 - 28 Steel containment vessel
 - 29 Ring space
 - 30 Store for radioactive waste
 - 31 Secondary containment
 - 32 Material lock
 - 33 Gallery



Layout reactor building KPP Stade FRG.

Fig. 1.1 - Vaso de Contenção

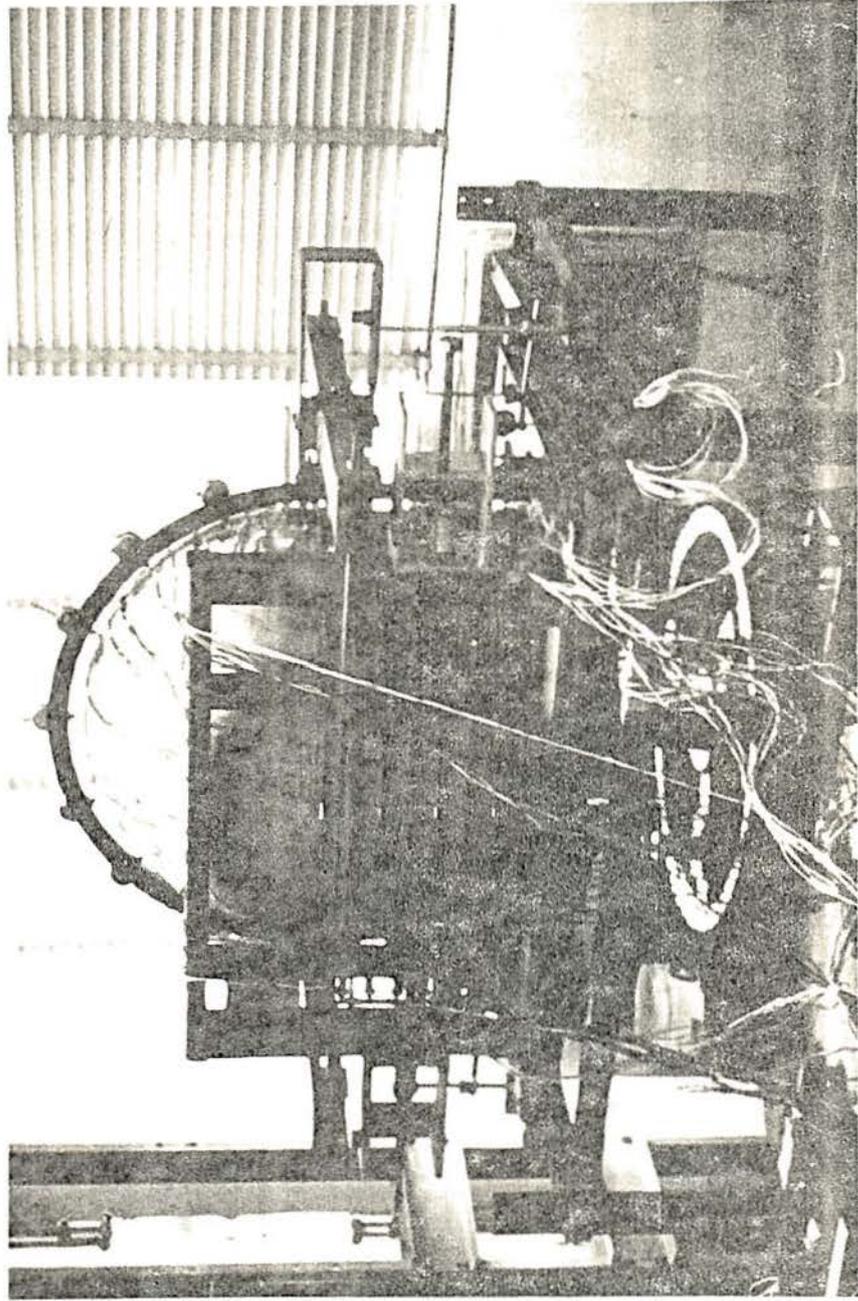


Fig. 1.2 - Vista geral do modelo

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO GERAL DO PROBLEMA

O modelo estudado tem uma forma constituída pela união de duas superfícies que concordam geometricamente, uma hemisférica, na parte superior, e outra cilíndrica, na parte inferior.

Como mostram as Figs. 2.1 e 2.2, este modelo resume-se em uma casca de revolução, axissimétrica, cuja forma foi escolhida com base em vasos de contenção de terceira geração, semelhantes aos do tipo KWU utilizados na central de Angra II.

Neste modelo, porém, não foram considerados detalhes adicionais, comumente encontrados em protótipos, tais como anéis, nervuras, orifícios e penetrações, nem tampouco suas condições reais de bordo.

Quanto às dimensões, estas foram arbitradas atendendo a uma escala aproximada de 1:50; entretanto, este modelo não tem a finalidade de representar fielmente um protótipo construído ou em projeto, mas sim a de ser um modelo teórico, simples, que possa ser facilmente estudado numericamente e experimentalmente.

O modelo foi confeccionado em microconcreto, como encontra-se descrito no capítulo 4, e para ele foram idealizados dois tipos de protensão e dois carregamentos.

As protensões, que têm a finalidade de imprimir ao modelo uma pressão externa distribuída e, tanto quanto possível, homogênea, são bem distintas e são chamadas: uma, de protensão vertical e outra, de protensão horizontal.

A protensão vertical, assim chamada porque seus cabos desenvolvem-se sempre em planos verticais, tem estes cabos posicionados dentro da parede do modelo, em sua superfície mē-

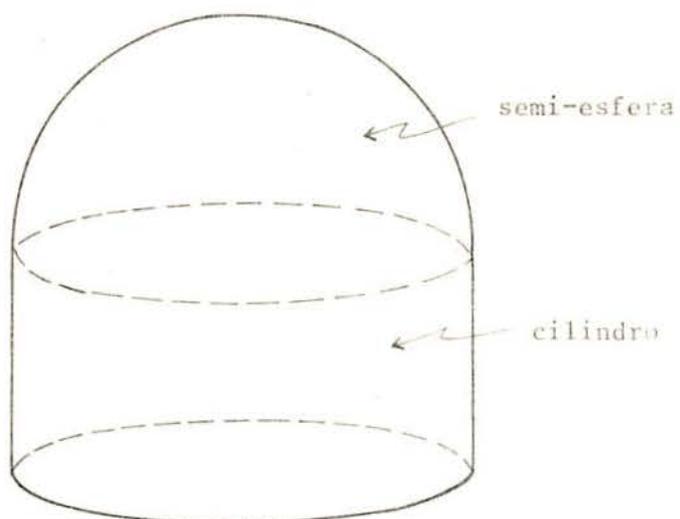


Fig. 2.1 - Forma do modelo

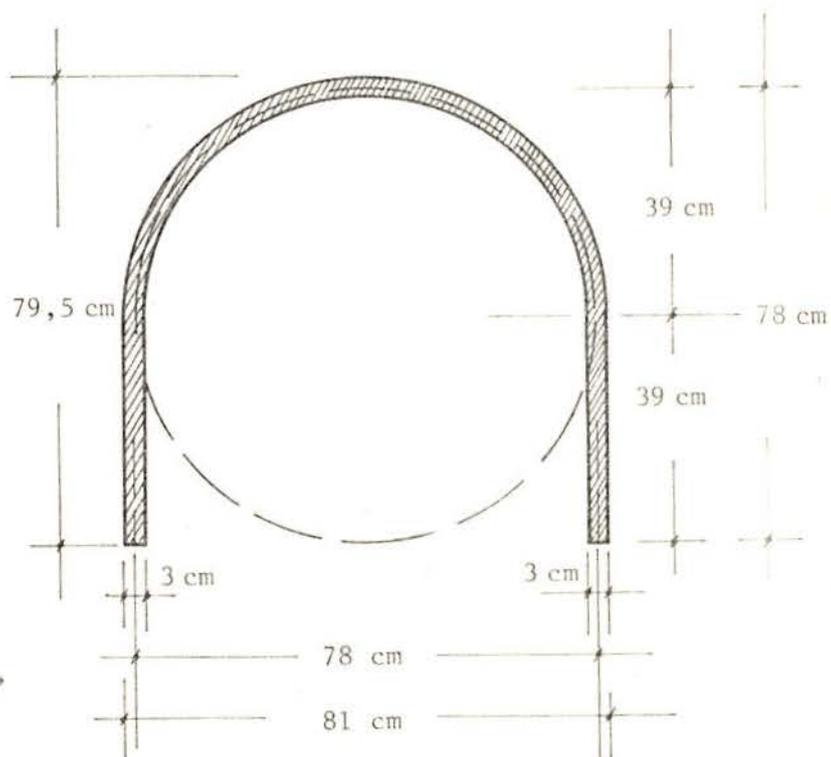


Fig. 2.2 - Corte meridional

dia, ou seja, a 1,5 cm de cada face, externa e interna. Estes cabos, que somam um total de vinte e quatro, dividem-se em três conjuntos iguais de oito cabos cada um, que, por sua vez, posicionam-se na superfície semi-esférica, girados de 120° um em relação aos outros, como pode ser visto na Fig. 2.3.

Na superfície cilíndrica, porém, estes cabos descem igualmente espaçados, tendo suas extremidades projetadas para fora do modelo, através de seu bordo inferior, deixando comprimentos livres, onde são posteriormente ancorados.

Esta distribuição de cabos, semelhante à utilizada em protótipos¹³, foi assim projetada para que fosse possível promover-se uma protensão simultânea de todos os cabos verticais, através de um sistema de ancoragem comum a todo o conjunto.

Esta protensão, como mostra o esquema da Fig. 2.4, é aplicada de modo muito simples, basicamente separando-se a chapa P_1 , onde apoia-se o modelo, e a peça P_2 , onde ancoram-se os cabos verticais, por intermédio de um macaco hidráulico acoplado a uma célula de carga, com o qual produzem-se forças nas direções de F_1 e F_2 .

Entre as duas peças P_1 e P_2 , encontram-se três barras de aço, verticais, que sustentam três outras células de carga.

A força total de protensão, aplicada pelo macaco hidráulico e atuando no conjunto de cabos é, então, transferida às três células de carga C_1 , C_2 e C_3 , que a mantêm controlada e distribuída ao longo de todos os cabos.

No capítulo 4, encontra-se uma descrição detalhada de todos os componentes deste sistema de protensão.

Tanto esta protensão vertical, como a horizontal, descrita a seguir, foram idealizadas de forma a protender todos os cabos simultaneamente, pois, desta maneira, além de serem reduzidas as perdas por protensões sucessivas e de poder-se obter um controle da tensão em todos os cabos, pode-se aplicar e retirar o esforço de protensão tantas vezes quantas forem necessárias, com relativa facilidade.

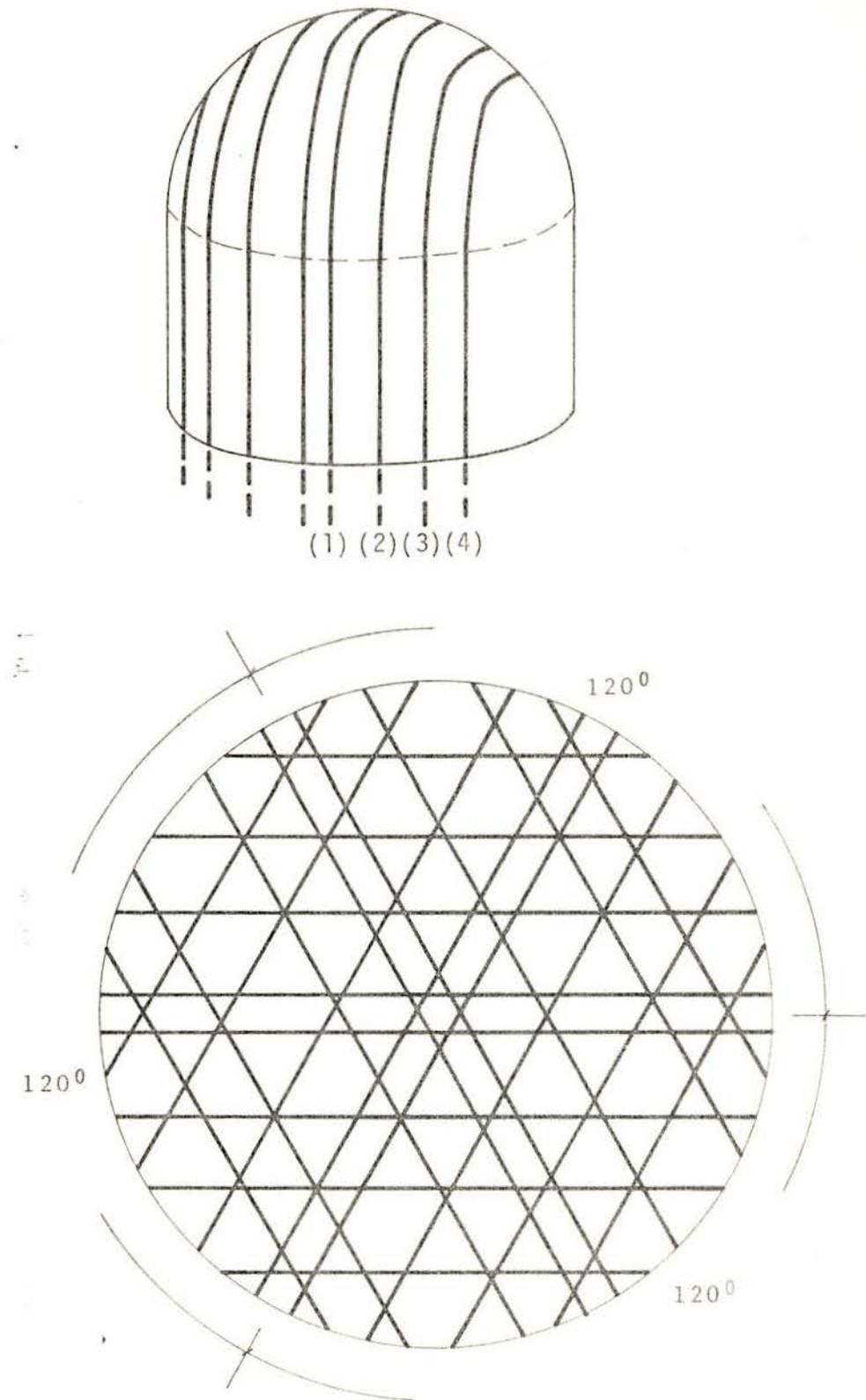


Fig. 2.3 - Posicionamento dos cabos da protensão vertical

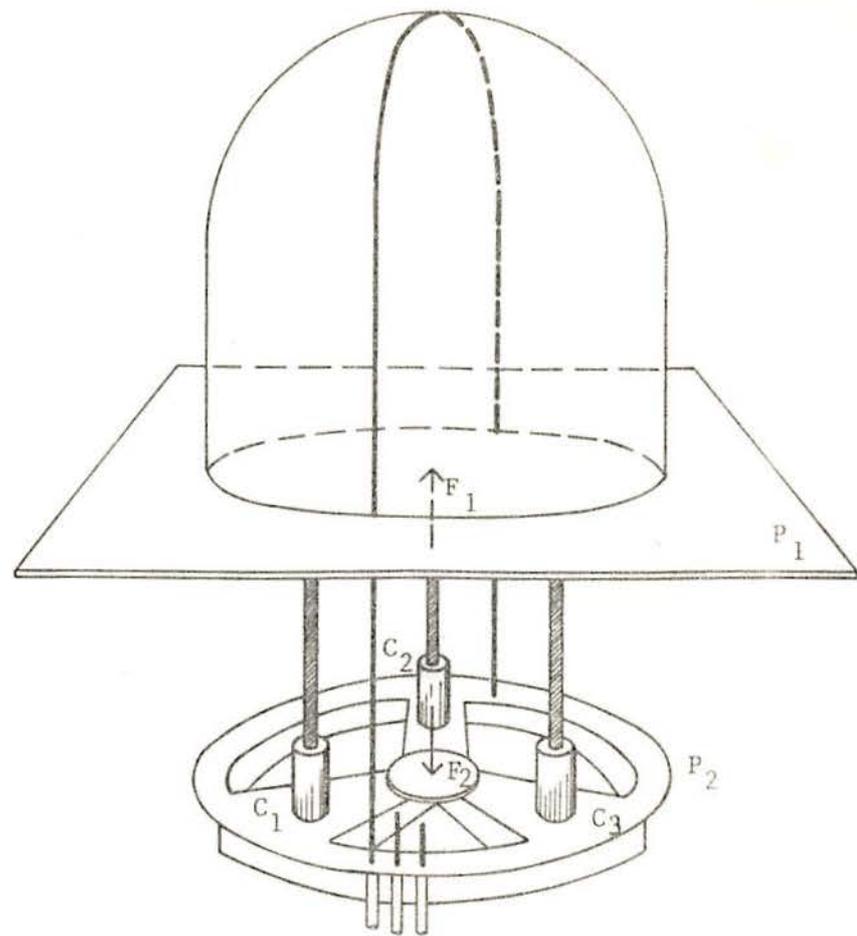


Fig. 2.4 - Esquema da protensão vertical

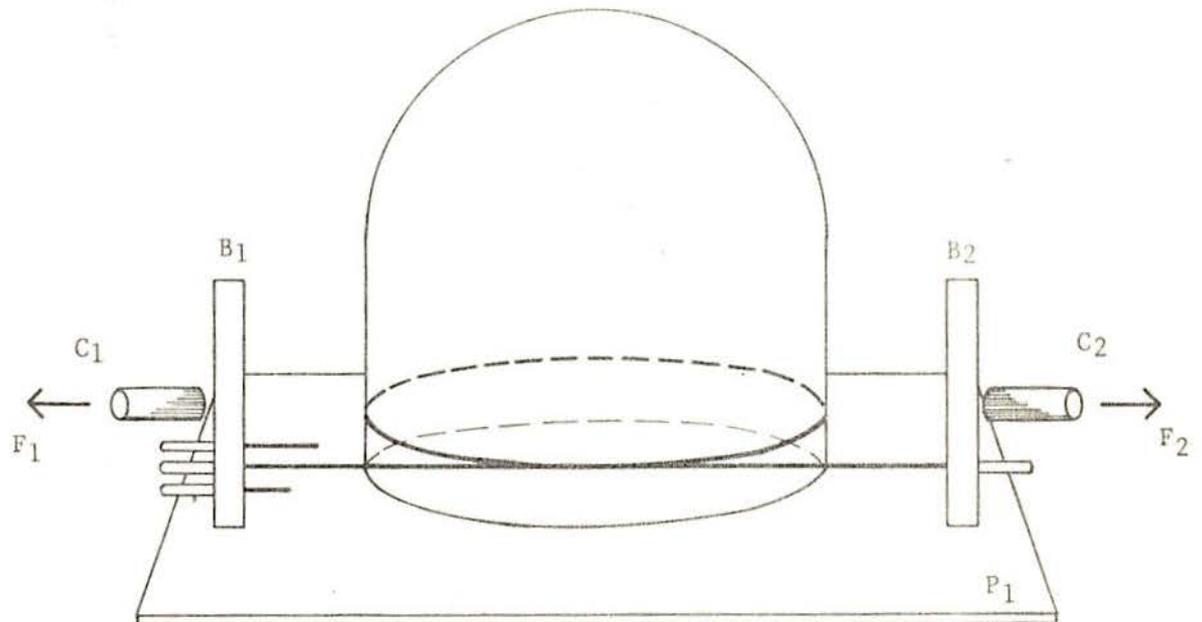


Fig. 2.5 - Esquema de protensão horizontal

A outra protensão, chamada de horizontal, pois seus cabos desenvolvem-se em círculos contidos em planos horizontais, tem estes cabos colocados externamente às paredes do modelo.

Esta forma de posicionamento foi adotada com o intuito de facilitar a execução, uma vez que os efeitos da protensão sobre o modelo são praticamente os mesmos que surgiriam no caso de serem estes cabos colocados no interior das paredes.

Esta protensão, que também atua simultaneamente em todo o conjunto de oito cabos, é obtida através de um sistema colocado tangencialmente à parte cilíndrica do modelo, formado por um pórtico de reação com duas barras móveis B_1 e B_2 , nas quais ancoram-se os cabos.

Como pode ser visto no esquema da Fig. 2.5, esta protensão é obtida promovendo-se a separação das barras B_1 e B_2 , por intermédio de macacos hidráulicos também acoplados a células de carga.

A força total de protensão, dirigida na direção das forças F_1 e F_2 e atuando no conjunto de oito cabos, é transferida do macaco hidráulico para as células de carga C_1 e C_2 que a mantêm controlada e distribuída ao longo de todo o conjunto.

Todas as partes que compõem o sistema de aplicação desta protensão estão detalhadas no capítulo 4.

Esta protensão, entretanto, pode ser aplicada de duas maneiras distintas. Uma, em que os cabos são tracionados de ambas as extremidades e outra, em que eles são tracionados por somente uma das extremidades, sendo que a outra se mantém ancorada.

Estas duas formas de protensão, que produzem no modelo os mesmos efeitos de compressão radial, diferem quanto à consideração das perdas por atrito ao longo do desenvolvimento dos cabos, o que se encontra melhor explanado no capítulo 5.

Foram também idealizados para este modelo dois carregamentos distintos, um que imprime uma pressão interna e outro que aplica uma carga externa concentrada em uma pequena re

gião, na intersecção das duas superfícies cilíndrica e semi-esférica.

O primeiro deles, que aplica sobre toda a superfície interna do modelo uma pressão distribuída e homogênea, tenta representar um equivalente estático para o caso de um acidente que envolva a perda de arrefecedor (LOCA)¹⁷. Um acidente desta natureza é um processo transitório, com pressões e temperaturas variáveis, porém, com a finalidade de projeto estrutural, esta pressão dinâmica pode ser substituída por uma pressão estática equivalente².

Também, um ensaio experimental que levasse em consideração a atuação de pressões dinâmicas, tornar-se-ia de muito difícil execução e mais complexos ainda seriam os sistemas para a leitura dos resultados, tais como deformações específicas e deslocamentos, que não poderiam ser avaliados com os equipamentos de leitura de strain gages e relógios comparadores, simples, os quais são os únicos de que dispomos atualmente.

Para a aplicação deste carregamento, foi montado um sistema, descrito no capítulo 4, composto por uma câmara de borracha e outros equipamentos para a produção e regulação da pressão.

Colocada esta câmara dentro do modelo, a qual estaria cheia d'água, a pressão seria, então, dada por intermédio de ar comprimido que, por sua vez, a transmitiria à água, promovendo, assim, uma boa distribuição desta em toda a superfície interna do modelo.

Este sistema, infelizmente, não chegou a ser utilizado devido a um acidente ocorrido com a câmara de borracha (vide item 5.1.4); contudo, encontra-se em perfeito estado de funcionamento, necessitando apenas de reparos na câmara de contenção do líquido.

Os ensaios experimentais relativos a este carregamento pretende-se que sejam efetuados tão logo sejam sanados estes problemas.

Como citado anteriormente, um outro tipo de carregamento foi estudado: este consiste na atuação de uma carga ex

terna, horizontal, aplicada em uma pequena região da parte cilíndrica, junto à intersecção desta com a zona semi-esférica, como pode ser observado na Fig. 2.6.

Este carregamento, assim como o anterior, pretende também representar um equivalente estático, porém, neste caso, de um acidente que envolva o choque de algum projétil¹¹, ou mesmo de uma aeronave, contra o vaso de contenção de um reator nuclear.

Vários trabalhos no gênero encontram-se na literatura 20, 21, 24 e, baseando-se em alguns deles, foram escolhidas a forma e posição deste carregamento; não obstante, a área da região de aplicação, assim como a intensidade de carga, foram arbitrados em função de certas limitações experimentais.

Também por este motivo, foi construído um sistema, descrito no capítulo 4, que faz atuarem no modelo, não uma, mas sim duas cargas iguais e opostas, tornando-se este um carregamento simétrico.

Obviamente, isto não representa exatamente o caso do impacto de um projétil, porém, com exceção do comportamento global da estrutura, como um todo, os efeitos causados em regiões próximas à da carga, tais como tensões, e os deslocamentos relativos à posição indeformada, também nestas regiões, não diferem muito, seja quando aplicada uma só carga, ou um par de cargas simétricas.

Através deste modelo, submetido a todos os carregamentos descritos, e também sob os efeitos das protensões, espera-se obter, experimentalmente, como resultados, os valores de deslocamentos e de deformações específicas, as quais podem ser transformadas em esforços normais e momentos fletores, atuantes por unidade de perímetro na estrutura.

Para obtenção destes resultados, utilizaram-se, neste trabalho, deflectômetros e strain gages, dispostos em um certo número de pontos, como pode ser encontrado nos capítulos 4 e 5.

No capítulo 3 encontra-se uma análise numérica, feita sobre o próprio modelo, utilizando programas de elemen-

tos finitos. Esta análise utiliza vários tipos distintos de elementos e analisa todos os carregamentos mencionados, assim como também as protensões, simultânea e separadamente.

Através dos ensaios experimentais e desta análise numérica, ambos atuantes somente no regime elástico, pode-se obter algumas comparações e conclusões, que encontram-se abordadas nos últimos capítulos deste trabalho.

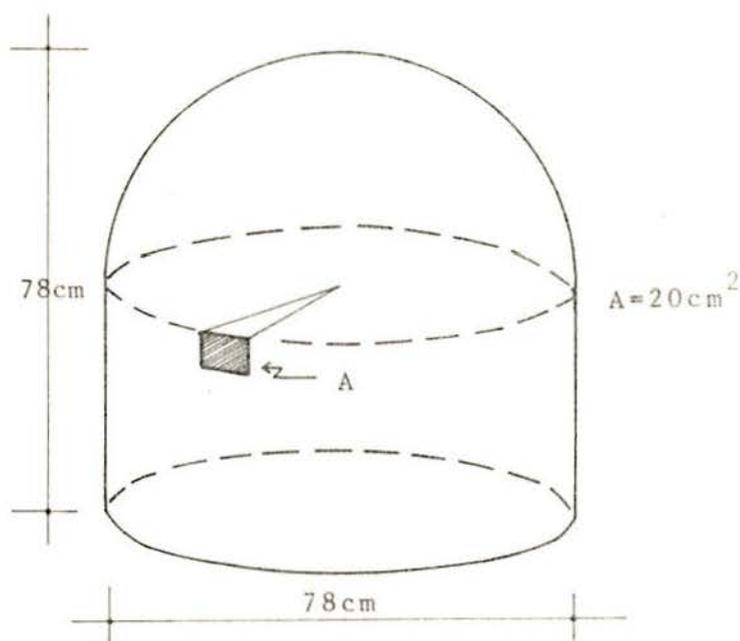


Fig. 2.6 - Área de atuação da carga horizontal

CAPÍTULO 3

ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 - Considerações gerais

Uma análise numérica foi feita sobre o modelo, com o auxílio de programas que utilizam elementos finitos, integrantes do sistema LORANE¹², e de outros desenvolvidos no CPGEC, com a finalidade de determinar-se o maior número possível de resultados, tais como esforços, tensões e deslocamentos da estrutura, referentes a todos os tipos de carregamento estudados e, também, levando-se em consideração o tipo de vinculação existente no modelo (já que esta análise fornece resultados que servem como termo de comparação para aqueles obtidos através dos ensaios experimentais).

Para alcançar este objetivo, foram escolhidos três tipos distintos de elementos finitos, facilmente adaptáveis ao problema em questão e, a partir deles, foi elaborada uma série de malhas, que serão detalhadas neste capítulo.

Os elementos escolhidos foram o CPTH1, CAXR1 e CGIQ1, que terão a seguir uma breve descrição de suas características.

Elemento CPTH1 (ref.12)

Um elemento tridimensional, híbrido, triangular, de três pontos nodais, tendo como incógnitas nodais os deslocamentos "U", "V" e "W" e as rotações "RU", "RV" e "RW".

Sua matriz de rigidez é formada pela união das matrizes de rigidez do elemento EPTTHR, para estado plano de tensões, e FPTH1, para flexão de placas delgadas.

Elemento CAXR1 (ref.22)

Um elemento tronco-cônico de dois pontos nodais, para análise de cascas axissimétricas com carregamento axissimétrico, apresentando como incógnitas nodais os deslocamentos

"U" e "V" e uma rotação "RW", sendo que o deslocamento segundo o meridiano varia linearmente, enquanto a variação do deslocamento transversal é dada por um polinômio de terceiro grau.

Elemento CGIQ1 (ref.19)

Um elemento quadrilátero, tridimensional, de oito pontos nodais, cujos lados podem variar segundo polinômios quadráticos, assim como, também, em forma quadrática variam seus deslocamentos.

Este elemento é obtido a partir do elemento tridimensional ETTIQQ⁷, por degeneração no sentido da espessura, e apresenta, com incógnitas nodais, os deslocamentos "U", "V" e "W", e as rotações θ_x , θ_y e θ_z .

Como pode ser visto no capítulo 2, o modelo foi submetido a dois tipos distintos de carregamentos, protensão e carga lateral externa; nesta análise numérica, porém, foi também incluído o estudo de mais um estado de carga, o da pressão interna, em face da grande importância deste frente a qualquer projeto de vasos de contenção, e também porque é nossa intenção levar a cabo os ensaios experimentais, já iniciados, tão logo sejam superados os problemas ocorridos com o sistema que promove a pressão interna.

Os carregamentos de pressão interna e carga lateral externa, considerando-se que pretendem representar um súbito aumento da pressão interna no vaso de contenção e um choque externo produzido por um projétil, deveriam ser considerados como carregamentos dinâmicos.

Em face da dificuldade de ser feita uma análise numérica para um caso dinâmico e principalmente um ensaio experimental que represente um carregamento desta natureza, é comumente aceito utilizar-se um equivalente estático² que o represente da melhor forma possível.

Não sendo propósito deste trabalho a determinação de tal carregamento equivalente, a partir de um dinâmico, real, limitamo-nos, simplesmente, a arbitrar o valor de um carregamento estático, que seria supostamente fruto de um prévio estudo dinâmico.

Também estes carregamentos foram considerados atuantes somente no regime elástico, tanto na análise numérica quanto na parte experimental, pois os programas de que dispunhamos¹², somente estão aptos para efetuar uma análise linear, e também porque, tendo em vista que este modelo será ainda ensaiado sob os efeitos de uma pressão interna, ele deve ser preservado nas melhores condições possíveis, o que provavelmente não ocorreria caso fossem efetuados ensaios que o submetessem a um regime plástico.

Como visto anteriormente, o modelo, sendo apoiado sobre uma chapa de aço, apresenta em seu bordo uma condição de vinculação pouco definida, ou melhor, sob os efeitos de qualquer um dos carregamentos ele não poderia ser considerado, para uma análise numérica, como tendo uma das três condições clássicas de bordo, quais sejam: apoio simples, rótula ou engastamento, uma vez que em seu bordo, em contato direto com a chapa metálica, há não só um considerável atrito, como também uma certa oposição ao giro livre.

Seria bastante laboriosa a determinação do exato funcionamento deste vínculo, que poderia ser definido como um engaste imperfeito; à vista disto, optou-se por se considerar em todas as malhas utilizadas as três condições de bordo citadas, uma vez que o funcionamento da estrutura deveria estar contido dentro da faixa delimitada pelas duas condições extremas, em cada caso particular.

Procurou-se, então, fazer um estudo em separado, para cada tipo de carregamento, em função do qual eram escolhidos os elementos que melhor se adaptassem ao caso e, logicamente, que melhores resultados pudessem fornecer e, então, novamente em função do carregamento, e também do elemento escolhido, eram elaboradas as malhas. Estas malhas, que sofreram uma série de modificações ao longo do estudo, evoluindo então para aquelas que apresentaram melhor funcionamento, necessitavam atender às exigências de que os resultados apresentados deveriam ser compatíveis com aqueles obtidos nos ensaios experimentais, pois, por exemplo, como vê-se no capítulo 4, em cada ponto do modelo analisado poder-se-ia obter o valor dos esforços

somente em duas direções ortogonais, a de um meridiano e a de um paralelo, portanto seria conveniente que a análise numérica também viesse a fornecer os esforços segundo estas mesmas direções.

3.2 - Análise da pressão interna

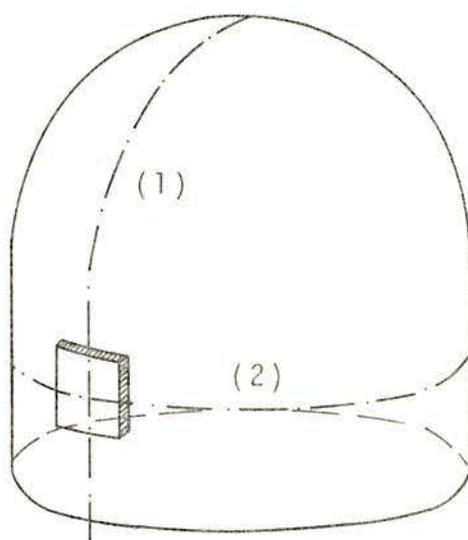
Para a análise do carregamento de pressão interna, já que o modelo foi estudado dentro do regime elástico, foi escolhida uma pressão arbitrária de 2 kg/cm^2 (1,9357 atm) distribuídas igualmente em toda a sua superfície interna. Este carregamento, dependendo do elemento finito escolhido, foi aplicado em forma de cargas equivalentes nodais, ou simplesmente aplicado com uma pressão distribuída ao longo da superfície do elemento.

Foram escolhidos, então, os elementos CPTH1, CAXR1 e CGIQ1, sendo que, sobre o primeiro, o carregamento foi aplicado em forma de cargas nodais e, sobre os dois outros, com uma carga superficial.

Para o elemento CPTH1 (Fig. 3.1), foi inicialmente estudada uma malha com 21 elementos, 23 nós e 138 graus de liberdade na forma de uma fatia de casca (Fig. 3.2) contida entre dois meridianos separados de $14,4^\circ$. Esta primeira malha apresenta certos problemas, como uma flutuação na curva de deslocamentos nodais, nas extremidades, e também uma falta de simetria nos deslocamentos dos nós contidos nos dois meridianos, o que não poderia ocorrer, já que o carregamento é axissimétrico, assim como também o é a estrutura.

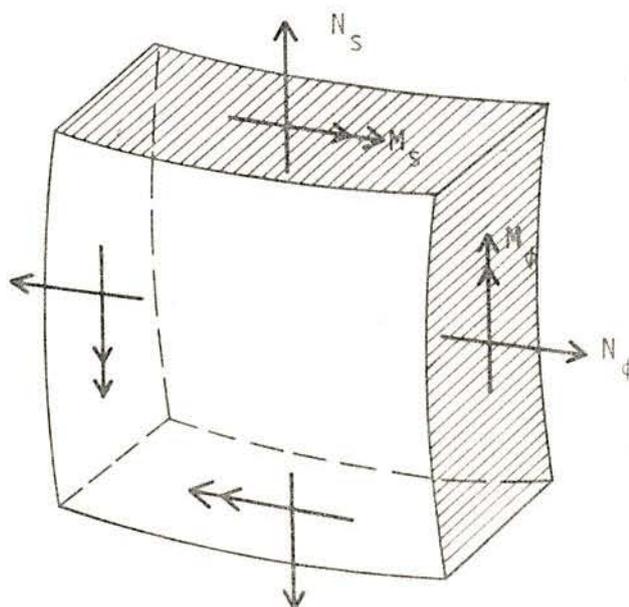
Para solucionar estes problemas, foi elaborada uma segunda malha, de 90° , com 102 elementos, 64 nós e 384 graus de liberdade, que apresentou, como esperado, resultados simétricos e uma grande melhora na continuidade dos deslocamentos nas regiões extremas, no ápice e na região de apoio. Esta malha, porém, uma vez que abrangia uma região bastante grande, 1/4 da superfície total do modelo, embora composta por 102 elementos, não era suficientemente refinada, apresentando nós bastante distanciados para o traçado dos gráficos dos esforços e também

DEFINIÇÃO DE MOMENTOS FLETORES E ESFORÇOS NORMAIS,
MERIDIONAIS E CIRCUNFERENCIAIS, ATUANTES NA ESTRUTURA



(1) Direção meridional

(2) Direção circunferencial



M_s, N_s - Momento fletor e esforço normal meridionais

M_ϕ, N_ϕ - Momento fletor e esforço normal circunferenciais

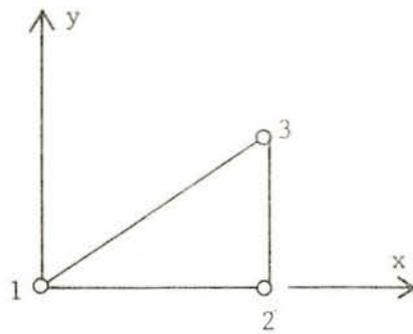


Fig. 3.1 - Elemento "CPTH1"

Fig. 3.2 - Primeira malha analisada

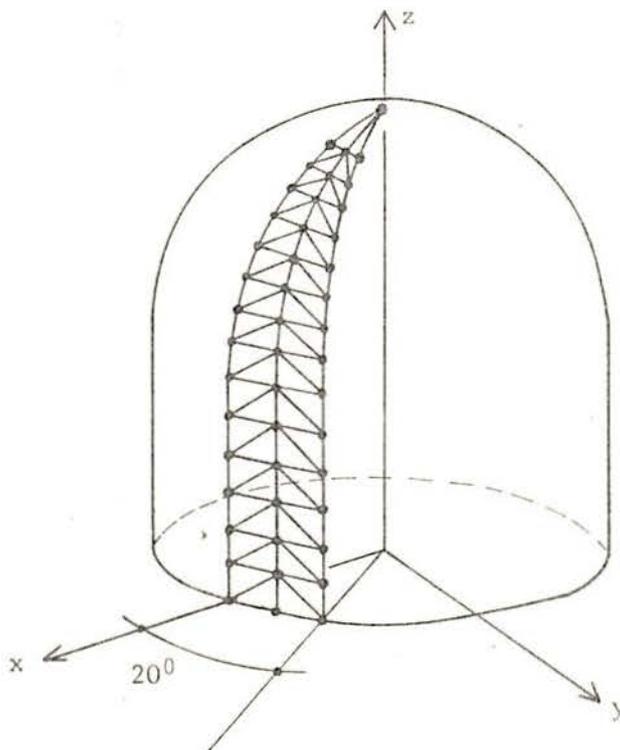
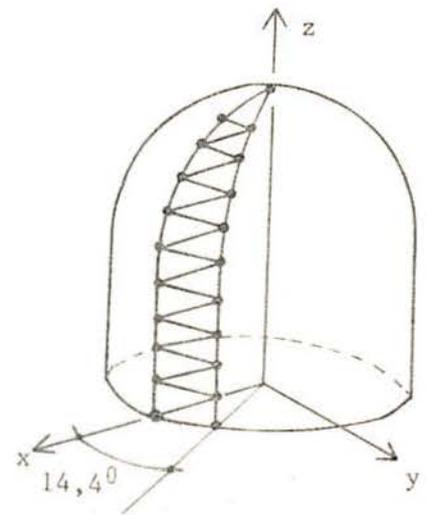


Fig. 3.3 - Malha definitiva

dos deslocamentos.

Em uma terceira e última tentativa, chegou-se a uma malha, na forma da primeira estudada, porém com 58 elementos, 46 nós e 276 graus de liberdade (Fig. 3.3), que apesar de ter somente 20° , possuía uma concentração de elementos por área 2,5 vezes maior do que a malha de 90° , portanto bem mais refinada.

Uma outra vantagem desta última malha é a de que, tendo os elementos dispostos em forma simétrica, resolveu consideravelmente os problemas de simetria e flutuação dos resultados.

O carregamento, discretizado em cargas nodais, teve estas cargas determinadas através do cálculo da pressão exercida sobre a área de influência de cada nó, ou seja, como ilustra a Fig. 3.4, a carga aplicada no nó j foi calculada como o produto da pressão de 2 kg/cm^2 pela área contida na região hachurada, determinada pelas retas que unem os pontos a , b , c e d .

Como condições de contorno, relativas aos deslocamentos e rotações esquematizadas na Fig. 3.5, foram aplicadas as restrições constantes no quadro 3.1, onde 1 significa permitido e 0 restringido, sendo que no bordo inferior foram aplicadas as três hipóteses mencionadas: de apoio simples, rótula e engastamento.

Quadro 3.1

Condições de contorno para o carregamento de pressão interna, utilizando o elemento CPTH1, onde 1 significa permitido e 0 restringido

nó superior	nós de contorno lateral		nós do bordo inferior		
u	0	1	0	0	1
v	0	0	0	0	0
w	1	1	0	0	0
ru	0	0	0	0	0
rv	0	1	0	1	1
rw	0	0	0	0	0

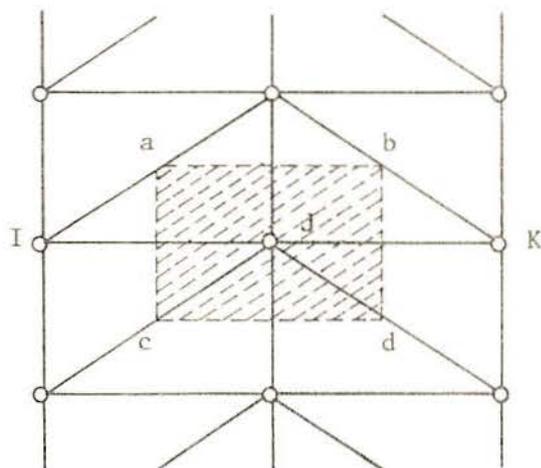


Fig. 3.4 - Área de influência de um nó

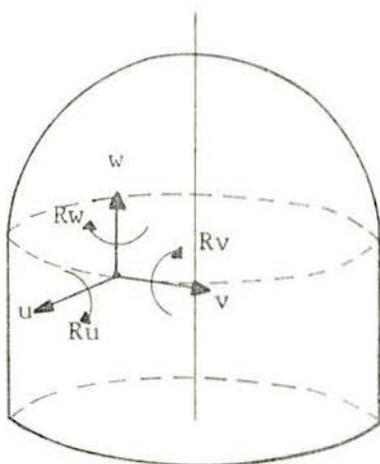


Fig. 3.5 - Deslocamentos e rotações

Desta análise, obteve-se como resultado:

- Deslocamentos
- Momentos fletores na direção meridional
- Momentos fletores na direção circunferencial
- Esforços normais na direção meridional
- Esforços normais na direção circunferencial

que se encontram nos gráficos 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente.

Utilizando-se o elemento CAXR1 (Fig. 3.6), construiu-se uma malha, como esquematiza a Fig. 3.7, composta de 66 elementos, 67 nós e com 204 graus de liberdade, sobre a qual foi aplicado o carregamento de pressão interna na forma de uma carga distribuída ao longo da superfície do elemento, também de 2 kg/cm^2 .

Como condições de bordo, foi imposto no nó 1, no ápice, somente um deslocamento vertical e no nó 67, representativo do bordo inferior do modelo, as três condições já estudadas para o elemento anterior.

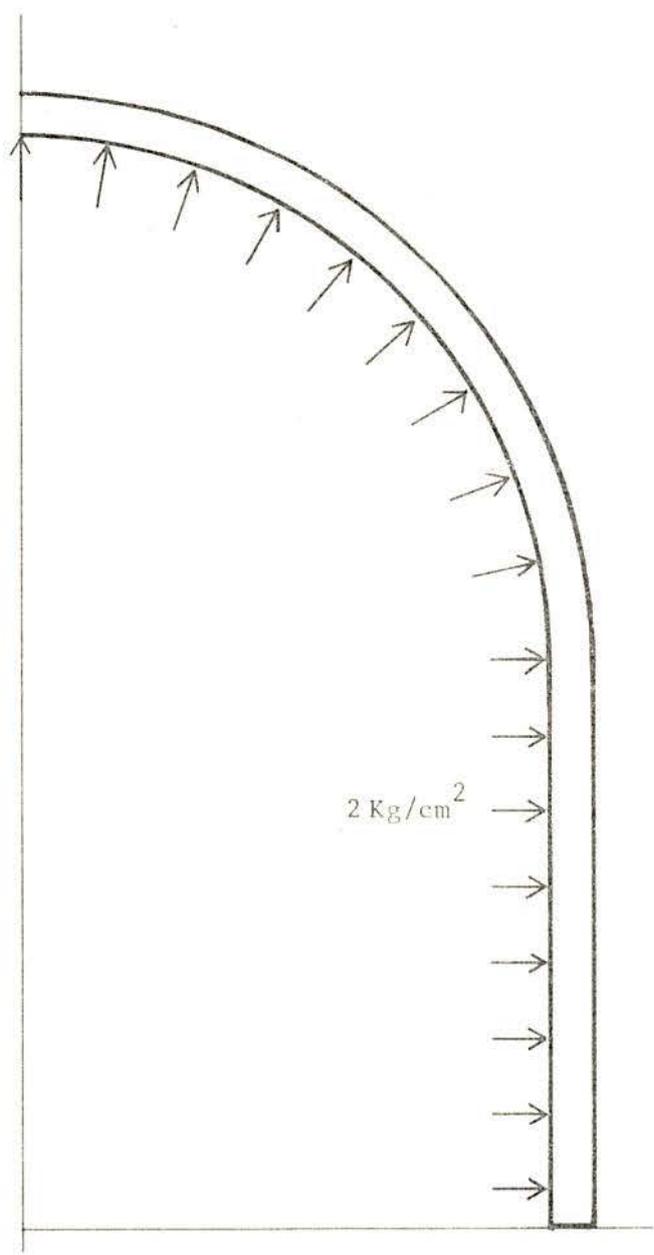
Também, a partir desta malha, obteve-se como resultado:

- Deslocamentos
- Momentos fletores na direção meridional
- Momentos fletores na direção circunferencial
- Esforços normais na direção meridional
- Esforços normais na direção circunferencial

que se encontram melhor representados nos gráficos 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente.

Com o elemento CGIQ1 (Fig. 3.8), foram estudadas duas malhas distintas. A primeira, que abrangia 1/4 da superfície total do modelo, composta de 7 elementos, 32 nós e com 192 graus de liberdade, que pode ser visto na Fig. 3.9, foi montada tentando-se superpor seus nós aos pontos analisados, através dos ensaios experimentais, porém em face de seu pouco refinamento, esta não apresentou resultados satisfatórios quanto a precisão, embora estes tenham sido bastante coerentes.

Tendo-se em vista, então, os bons resultados apresentados pela última malha analisada com o elemento CPTH1 (Fig.



CARREGAMENTO DE PRESSÃO INTERNA ($P=2\text{Kg/cm}^2$)

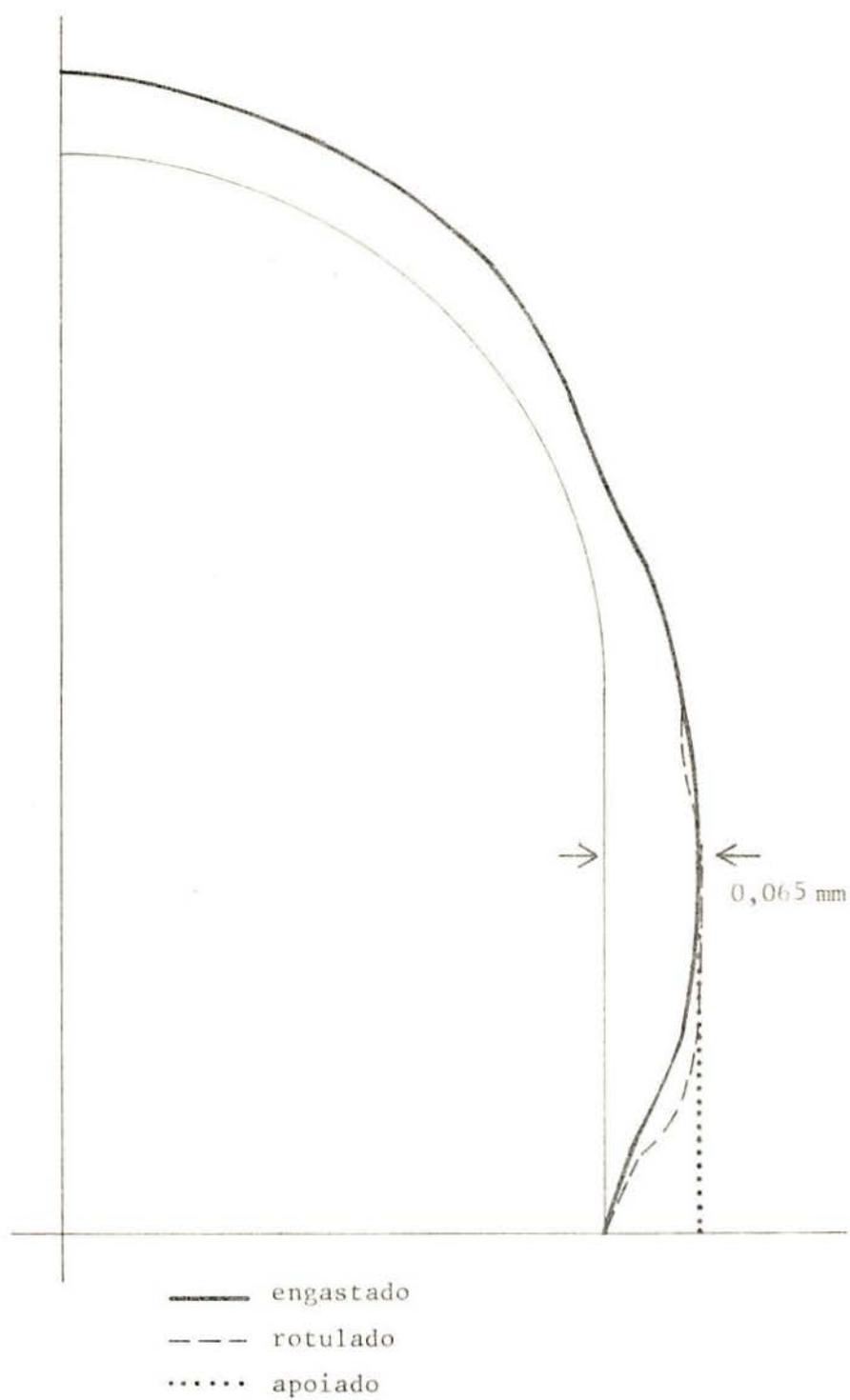
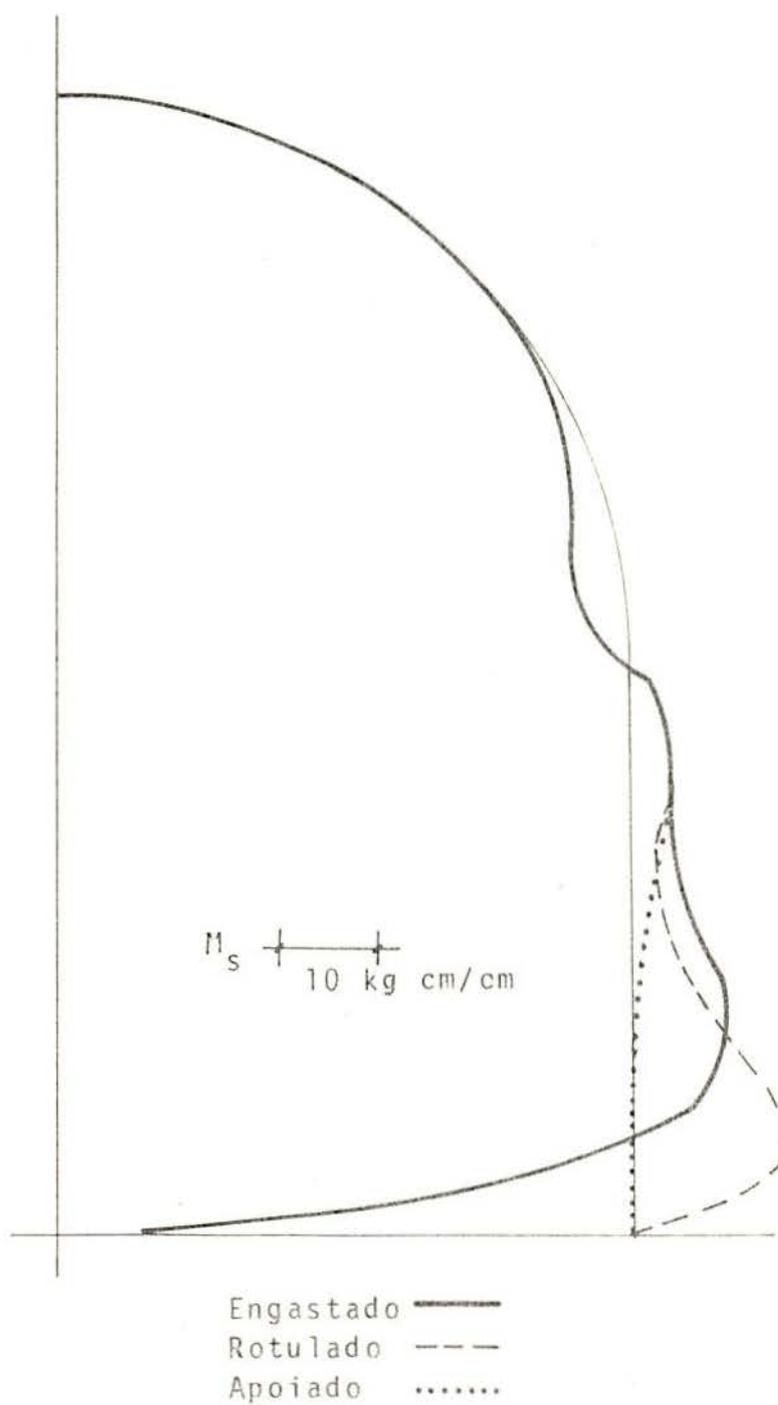
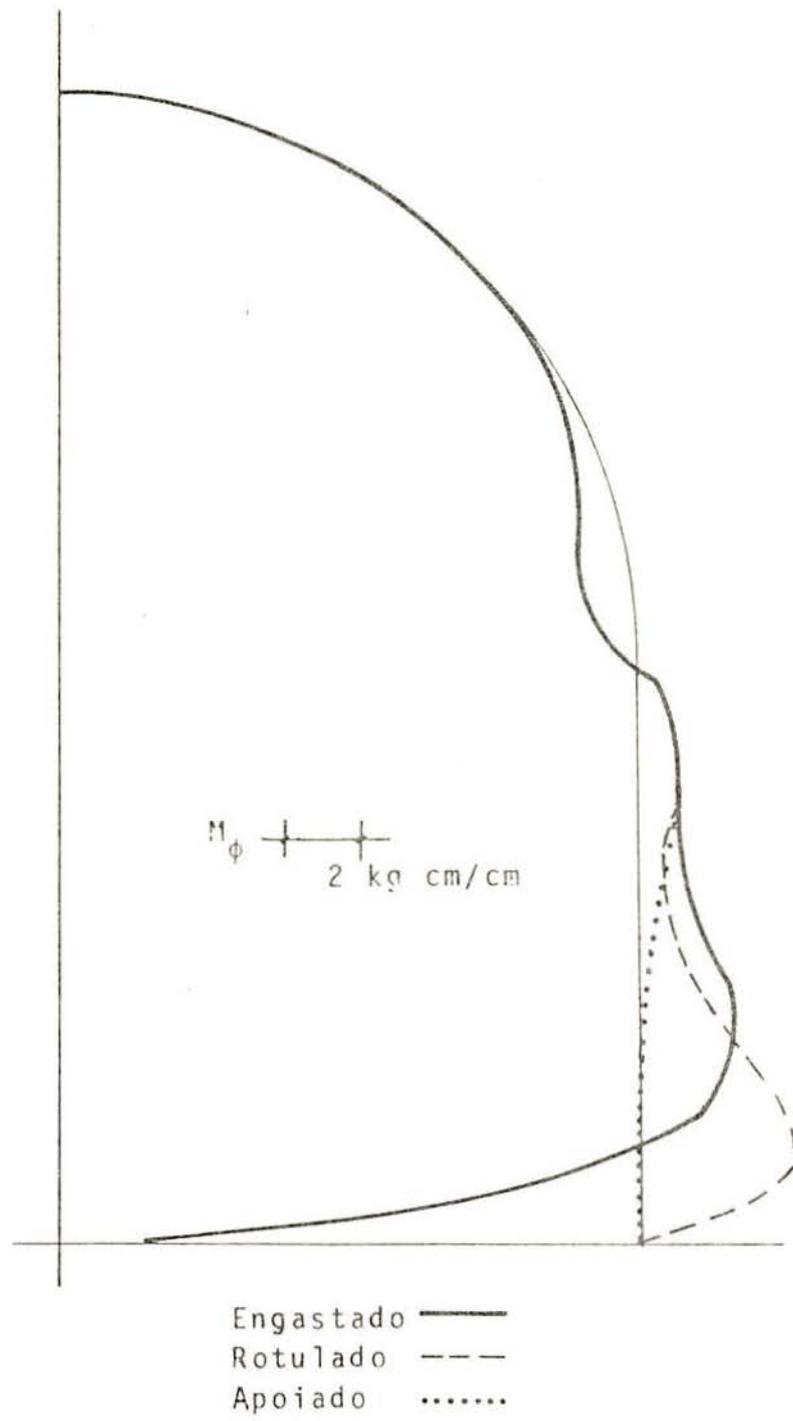
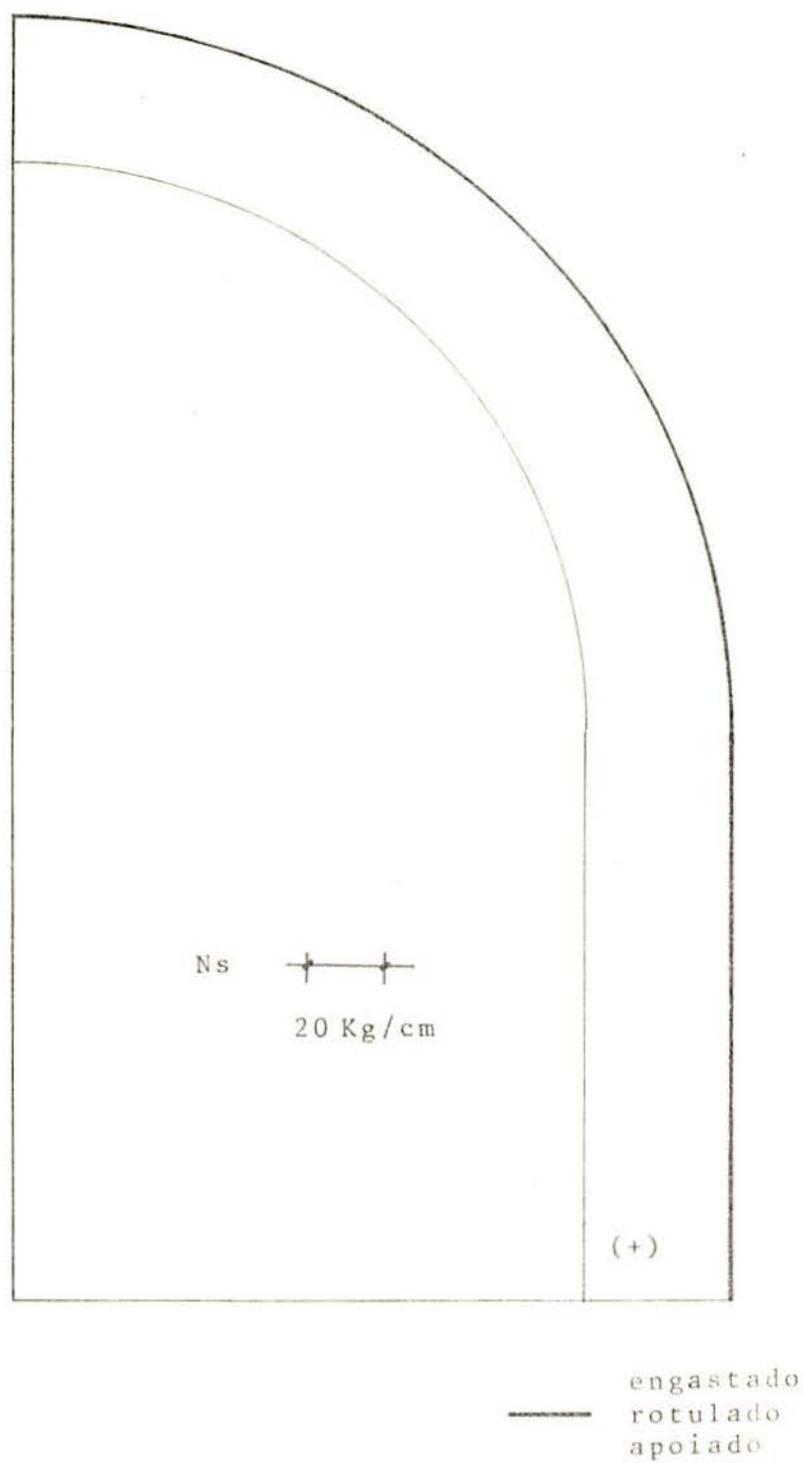


GRÁFICO 3.1 - Deslocamentos em um meridiano

GRÁFICO 3.2 - Momentos meridionais M_s

GRÁFICO 3.3 - Momentos circunferenciais M_ϕ

GRÁFICO 3.4 - Esforços normais meridionais N_s

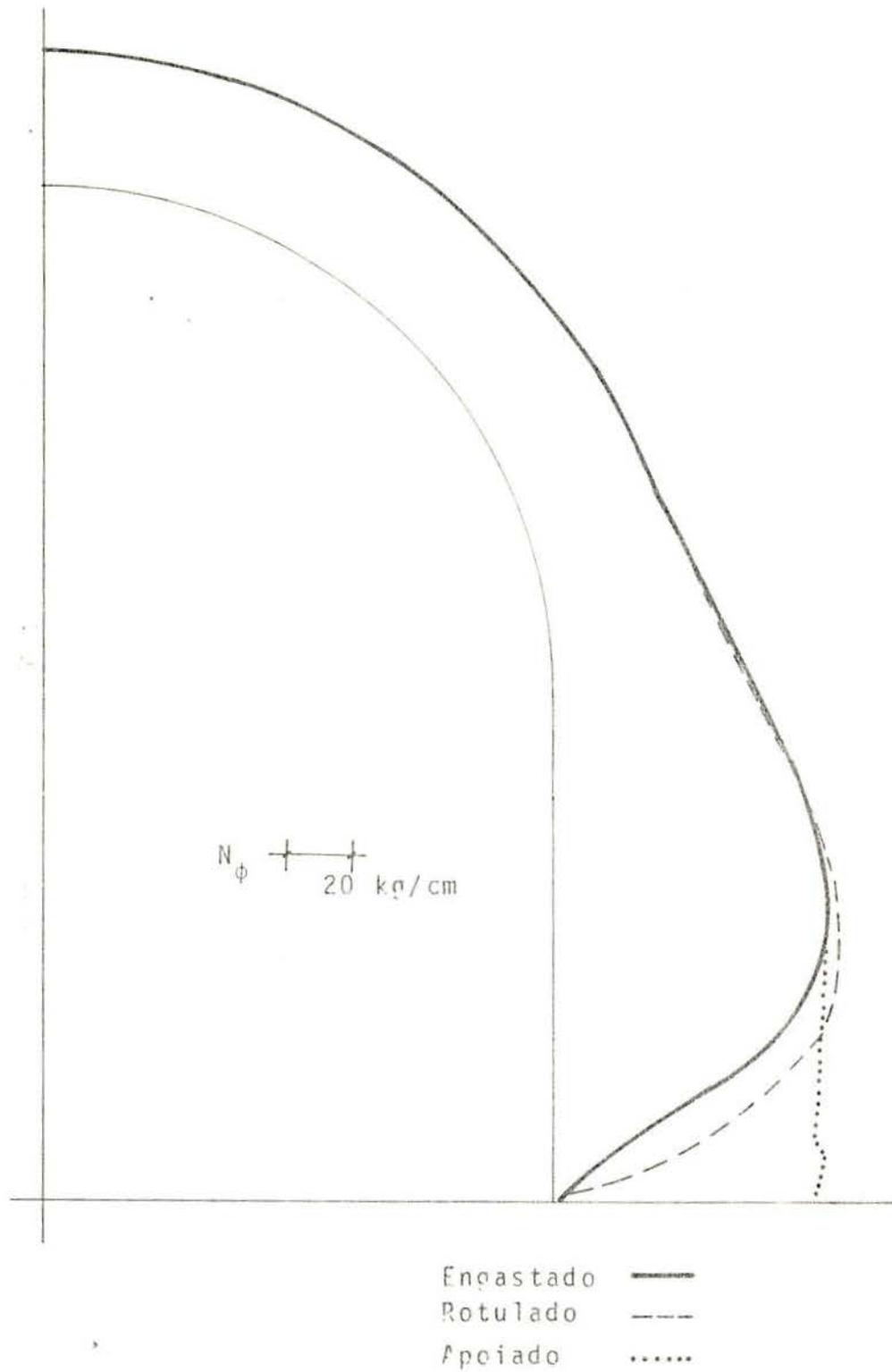


GRÁFICO 3.5 - Esforços normais circunferenciais N_ϕ

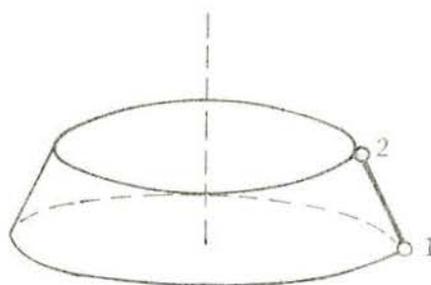


Fig. 3.6 - Elemento "CAXR1"

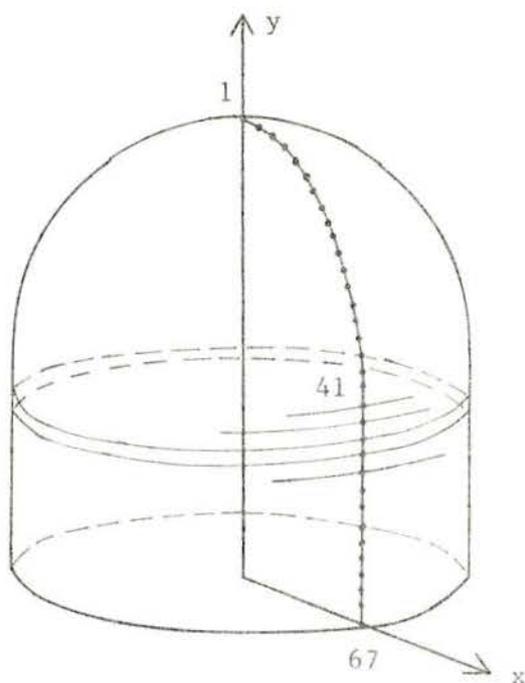


Fig. 3.7 - Malha utilizada

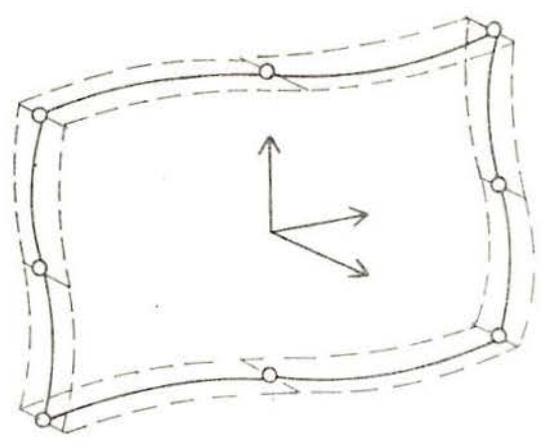


Fig. 3.8 - Elemento "CGIQ1"

Fig. 3.9 - Primeira malha estudada

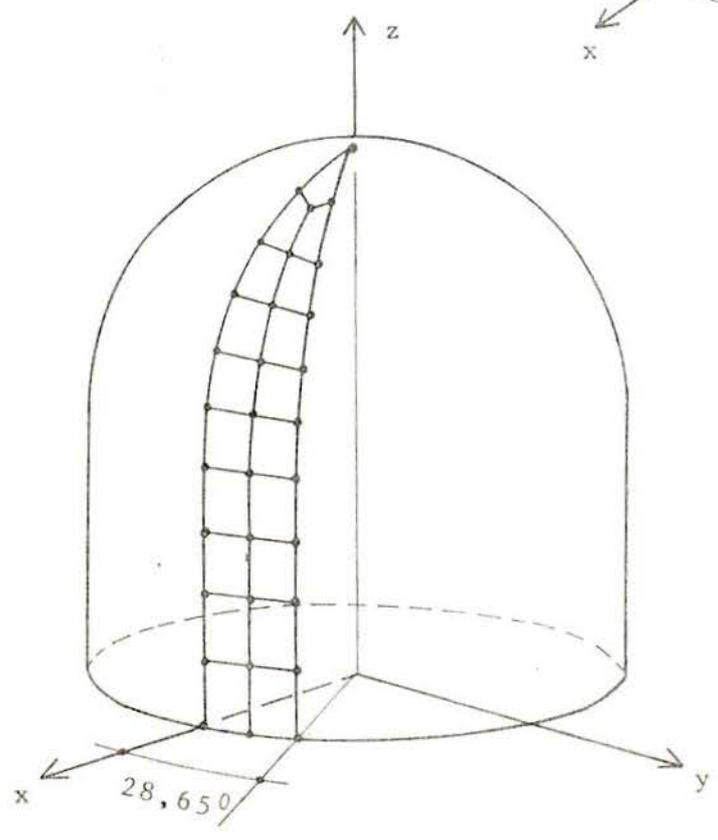
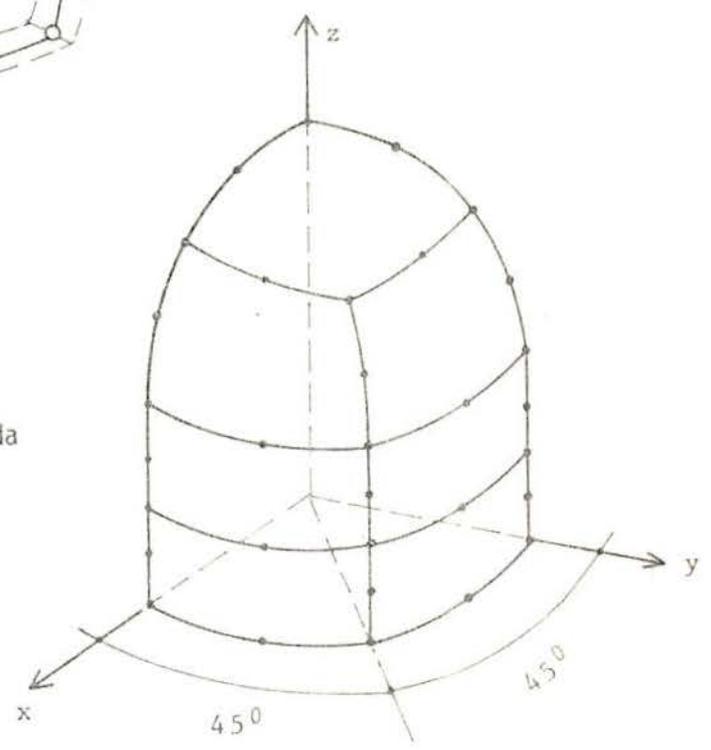


Fig. 3.10 - Malha definitiva

3.3), fez-se uma nova malha, semelhante àquela, porém com 19 elementos, 80 nós e 480 graus de liberdade, esquematizada na Fig. 3.10, sobre a qual foi também aplicado o carregamento de pressão interna, como uma pressão de 2 kg/cm^2 aplicados uniformemente ao longo da superfície dos elementos.

Como condições de contorno, aplicaram-se as mesmas constantes do quadro 3.1.

Esta malha, à semelhança das demais, apresentou como resultado:

- Deslocamentos
- Momentos fletores na direção meridional
- Momentos fletores na direção circunferencial
- Esforços normais na direção meridional
- Esforços normais na direção circunferencial

que também se encontram nos gráficos 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente.

Como pode ser observado, os gráficos 3.1 a 3.5, representam a similitude dos resultados obtidos por todas as malhas e pelos três elementos escolhidos. Tal forma simplificada de apresentação foi-nos permitida, porque, realmente, os resultados obtidos através dos três estudos, apresentaram uma ótima semelhança, como pode ser comprovado pelos gráficos 3.6 e 3.7, que comparam os resultados de deslocamentos nodais e momentos fletores meridionais, com o bordo inferior engastado, para os três elementos finitos utilizados.

3.3 - Análise das protensões

Como visto no capítulo anterior, ambas protensões são promovidas através de um tensionamento simultâneo de todos os cabos e, sendo estes cabos iguais em comprimento, como explica o item 4.10.2, eles terão um esforço, igual à força total de protensão, dividida pelo número de extremidades de cabos traçados em cada caso, ou seja:

$$f_c = \frac{F}{n}; \quad n = 48, \quad 8$$

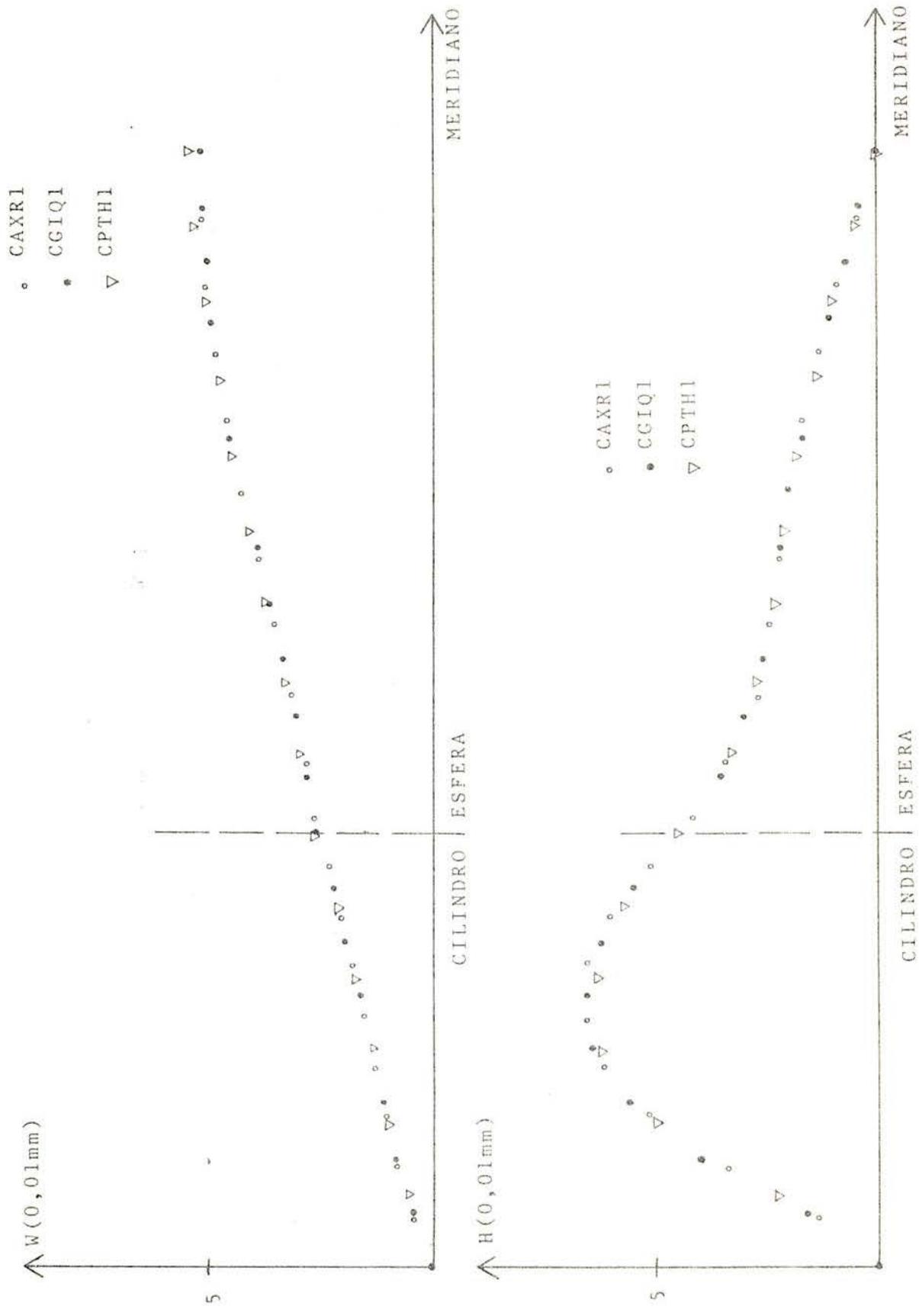


GRÁFICO 3.6 - Deslocamentos H e W de um meridiano (vide gráfico 3.1)

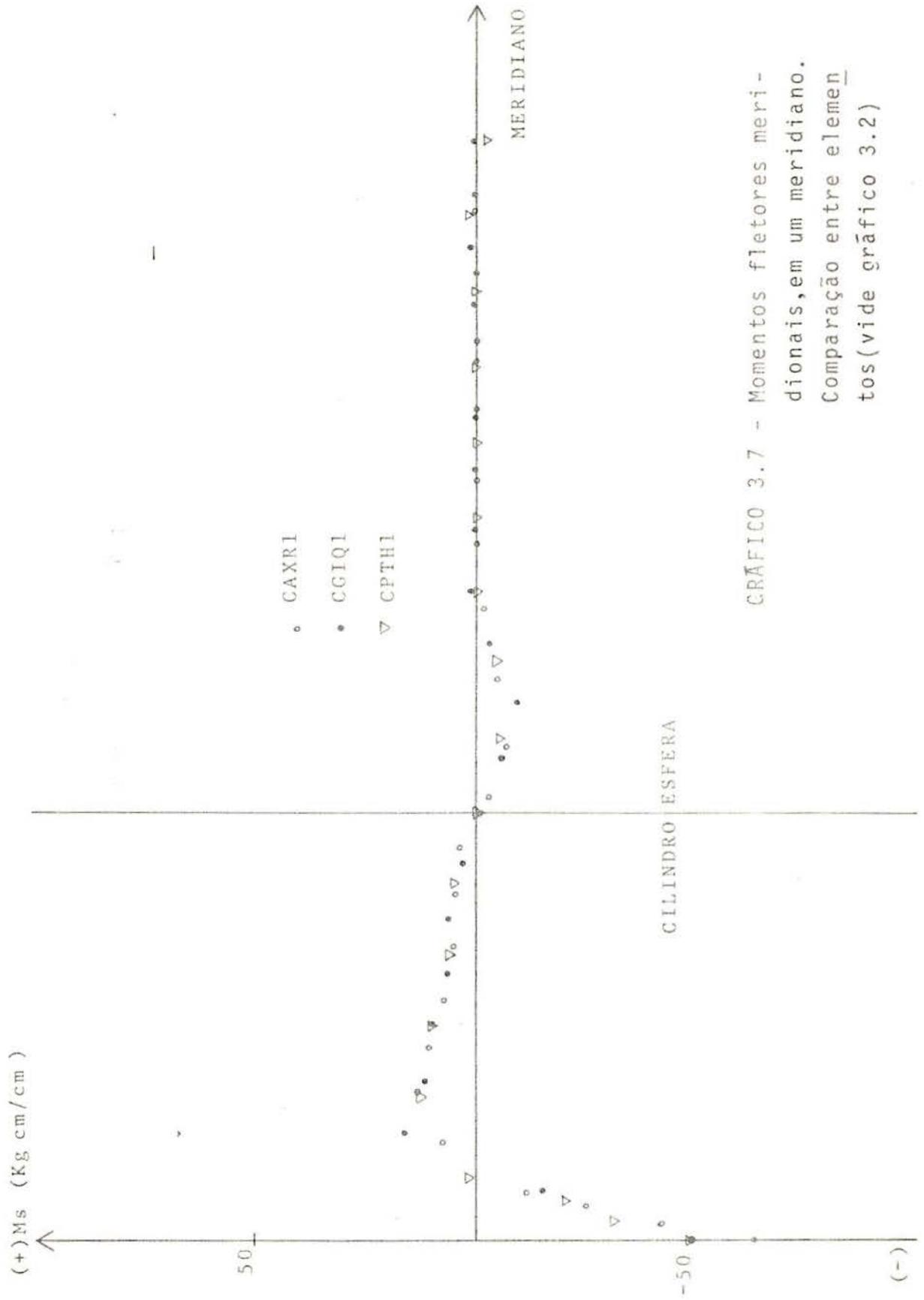


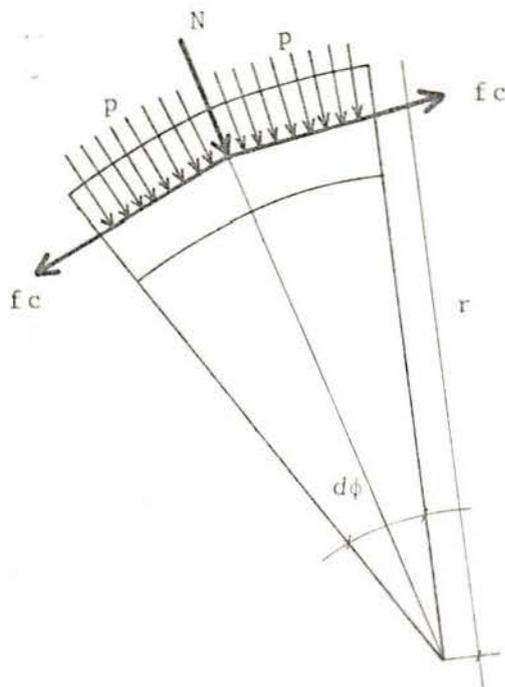
GRÁFICO 3.7 - Momentos fletores meri-
 dionais, em um meridiano.
 Comparação entre elemen-
 tos (vide gráfico 3.2)

onde: f_c = força de tração em cada cabo;

F = força total de tração em cada conjunto de cabos, verticais ou horizontais;

n = número de extremidades de cabos, tracionadas pela força F ; para a protensão vertical, $n = 48$ e, para a horizontal, $n = 8$.

Cada cabo, por sua vez, desenvolvendo-se sobre um semicírculo, no caso da protensão vertical, ou sobre um círculo, na protensão horizontal, aplica, sobre a superfície do modelo, uma carga distribuída p , linear, ao longo de seu desenvolvimento curvo, contida no plano por ele determinado, Figs. 3.12 e 3.13, com um valor constante igual à razão entre a força que o traciona f_c e seu raio de curvatura r , conforme eq. a.



$$N = 2 f_c \operatorname{sen} \frac{d\phi}{2}$$

$$\operatorname{sen} \frac{d\phi}{2} \cong \frac{d\phi}{2}$$

$$N = f_c d\phi$$

$$p = \frac{N}{r d\phi} = \frac{f_c}{r}$$

$$p = \frac{f_c}{r} \quad \text{eq. a}$$

Esta carga linear p , contida no plano determinado por um cabo, pode ser decomposta em duas outras, Fig. 3.14, uma tangente à superfície da esfera, p_t , e outra normal a ela, p_n , sendo que esta última é constante para todos os cabos, ou seja, seu valor não depende da posição ou do raio de curvatura do cabo, mas somente de sua tensão, conforme eq. b.

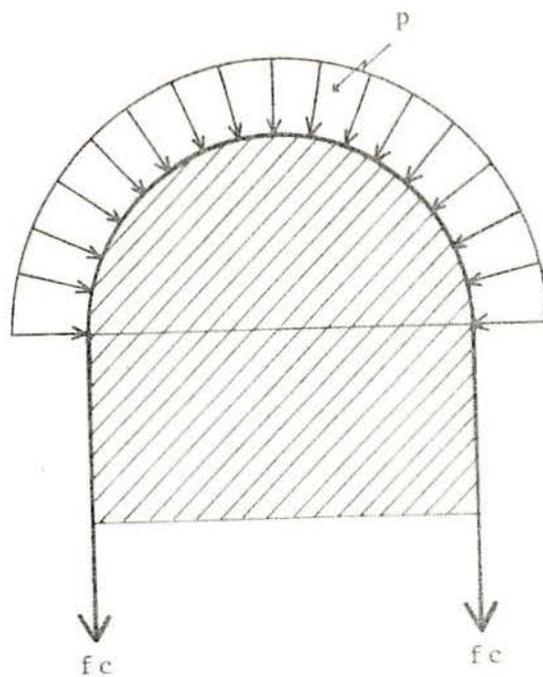


Fig. 3.12 - Protensão vertical, carga aplicada por um cabo

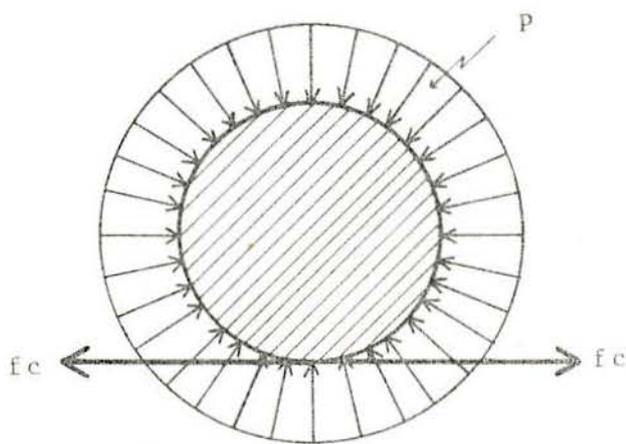


Fig. 3.13 - Protensão horizontal, carga aplicada por um cabo

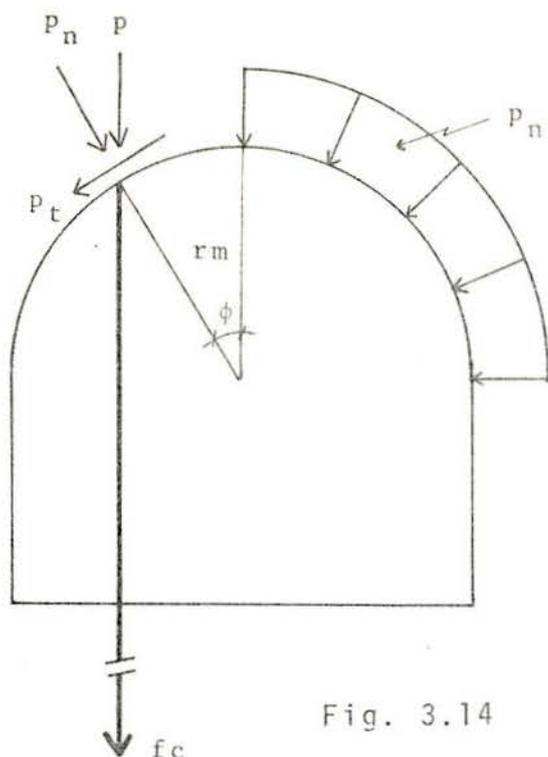


Fig. 3.14

r_m - raio médio da superfície esférica do modelo

$$p = \frac{f_c}{r}, \quad r = r_m \cos \phi$$

$$p = \frac{f_c}{r_m \cos \phi}$$

$$p_n = p \cos \phi = \frac{f_c}{r_m}$$

$$p_t = p \sin \phi = p_n \tan \phi$$

$$p_n = \frac{f_c}{r_m} \quad \text{eq. b}$$

Considerando-se, sobre estas cargas lineares, as perdas por atrito nos cabos, analisadas no item 5.1.8, estas terão sua forma alterada, ficando no caso da protensão vertical o esquema da Fig. 3.15 e no caso da protensão horizontal, conforme a Fig. 3.16, onde se consideram duas situações distintas:

a) Quando os cabos são tracionados simultaneamente pelas duas extremidades;

b) Quando são tracionados por somente uma das extremidades (a direita no caso da Fig. 3.16), sendo que a outra extremidade acha-se devidamente ancorada.

Para ser inserido em uma análise numérica, este carregamento, tanto considerando-se a carga linear p , contida no plano do cabo, como suas componentes p_n e p_t , pode ser aplicado a uma malha de elementos finitos, como uma carga distribuída, obedecendo-se as trajetórias dos respectivos cabos ou, mais simplificada, como cargas concentradas equivalentes.

Porém, em ambos os casos, os elementos finitos que compusessem esta malha deveriam ser ordenados de tal forma que as trajetórias de cada cabo fossem sempre cobertas pelos bordos dos elementos ou, pelo menos, no caso de serem aplicadas

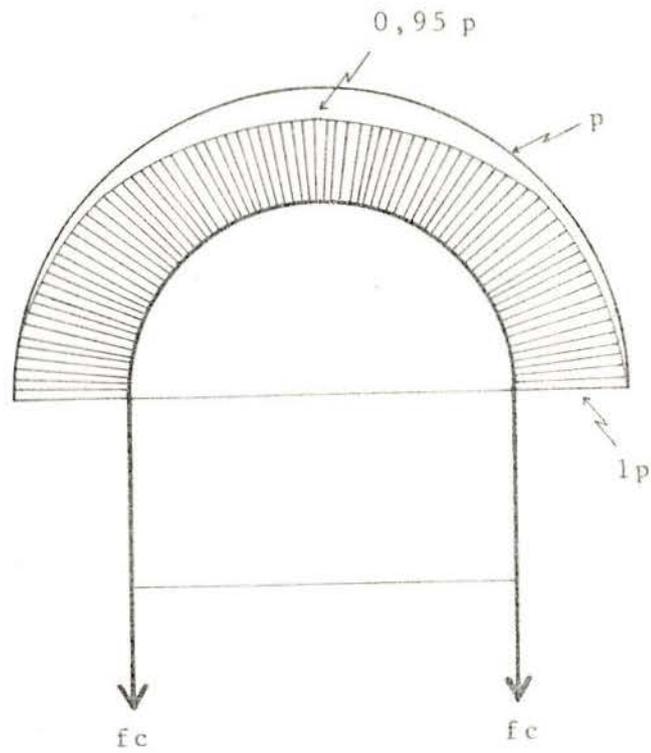


Fig. 3.15 - Carga equivalente à protensão vertical (perda exagerada no desenho)

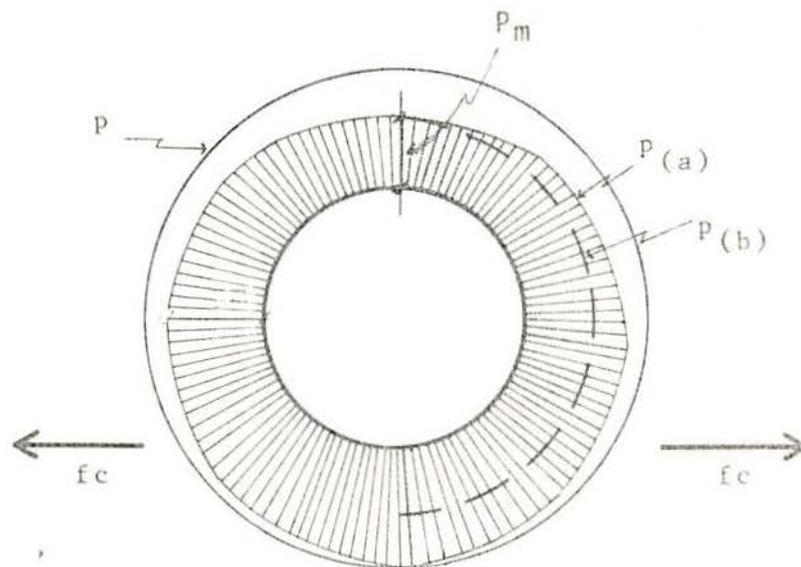


Fig. 3.16 - Carga equivalente à protensão horizontal

cargas concentradas equivalentes, que os nós dos elementos coincidissem com os pontos de aplicação destas cargas.

Tendo-se à vista a disposição dos cabos que compõem a protensão vertical, Fig. 2.3, observa-se que, para ser elaborada sobre este conjunto de cabos uma malha de elementos finitos que obedeça às condições acima citadas, necessitaríamos de um número muito grande de elementos, que deveriam ainda ser somados àqueles que abrangeriam a parte cilíndrica do modelo, onde se encontram tanto os cabos da protensão vertical como os da protensão horizontal.

Foi feito um estudo, utilizando-se o elemento CPTH1 (item 3.1), com o qual elaborou-se uma malha, que abrangendo 30° da superfície do modelo, contava com 177 elementos, 103 nós e 618 graus de liberdade. Aplicou-se, sobre os nós dos elementos, cargas concentradas equivalentes, conforme foi mencionado anteriormente.

Com este elemento fornecendo resultados de esforços em função de seus eixos locais, e tendo sido esta malha feita com os elementos não obedecendo qualquer ordenação quanto à direção destes eixos, mas sim simplesmente tentando-se cobrir toda a região, de modo a que seus nós coincidissem com as posições dos cabos, e considerando-se, também, que necessitavam-se esforços segundo as duas direções, meridional e circunferencial, os resultados obtidos foram de muito difícil interpretação, posto que cada um dos 177 elementos tinha seu sistema de eixos locais posicionado em uma direção diferente.

Para que fosse possível ordenar as direções dos eixos locais destes elementos, como foi feito para o carregamento de pressão interna, item 3.2, e também para que as cargas concentradas equivalentes não se apresentassem demasiado distanciadas, o que viria reduzir a precisão dos dados, seria necessário um número bastante maior de elementos e esta nova malha possivelmente contaria com cerca de 2000 graus de liberdade.

Utilizando-se os elementos CGIQ1 ou ETTIQQ⁷, que apresentam 8 nós, 48 graus de liberdade e 20 nós e 60 graus de

liberdade, respectivamente, uma malha nas condições citadas anteriormente contaria, por certo, com um número ainda bastante maior de graus de liberdade.

Considerando-se, então:

- que a distribuição dos cabos, tanto na protensão vertical como na horizontal, apresenta-se bastante regular, ou seja, cobre a superfície de uma forma razoavelmente homogênea;

- que estes cabos, como visto anteriormente, aplicam sobre a superfície do modelo uma carga linearmente distribuída e a menor das perdas por atrito, que não ultrapassam a 10%, constante, quando considerada a direção normal à superfície;

- e, também, observando-se a forma do modelo e a espessura de suas paredes, portanto sua grande rigidez, optou-se por considerar, de maneira simplificada, o carregamento das protensões como uma pressão externa distribuída superficialmente, sobre a qual são consideradas, de forma igualmente simplificada, as perdas por atrito dos cabos.

Tomou-se, então, como equivalendo à protensão vertical, uma carga externa distribuída superficialmente em toda a região esférica, conforme a Fig. 3.15, tendo como valores extremos 1 kg/cm^2 na zona de intersecção entre a parte esférica e a cilíndrica e de $0,95 \text{ kg/cm}^2$, portanto com 5% de perdas por atrito, conforme conclusões do item 5.1.8, gráfico 5.10, na parte superior da superfície esférica.

No caso da protensão horizontal, tomou-se uma pressão, também distribuída superficialmente, com um valor médio p_m , Fig. 3.16, arbitrando-se este valor em 1 kg/cm^2 , em concordância com o valor tomado para a protensão vertical.

Para que nos ensaios experimentais fosse possível simular esses valores de pressões externas, determinaram-se, a partir deles, quais as forças de protensão que deveriam ser imprimidas aos cabos, como pode ser visto nos itens 6.2 e 6.3.

Para a análise numérica, sendo estes carregamentos axissimétricos, escolheu-se o elemento CAXR1 (item 3.1) por sua facilidade de operação para carregamentos desta natureza e,

também, porque, como visto no item 3.2, apresentou, para o caso da pressão interna, caso bastante semelhante ao que se está estudando, resultados praticamente idênticos aos obtidos pelos demais elementos finitos utilizados.

A malha utilizada para esta análise numérica foi a mesma construída para o caso da pressão interna, item 3.2, Fig. 3.7, utilizando-se, também, as mesmas condições de contorno.

A esta malha foram aplicados, separadamente, o carregamento relativo à protensão vertical e o relativo à protensão horizontal e, também, um terceiro caso em que se superpõem os dois primeiros.

Como resultado destas três situações, obteve-se, novamente:

- Deslocamentos
- Momentos fletores na direção meridional
- Momentos fletores na direção circunferencial
- Esforços normais na direção meridional
- Esforços normais na direção circunferencial

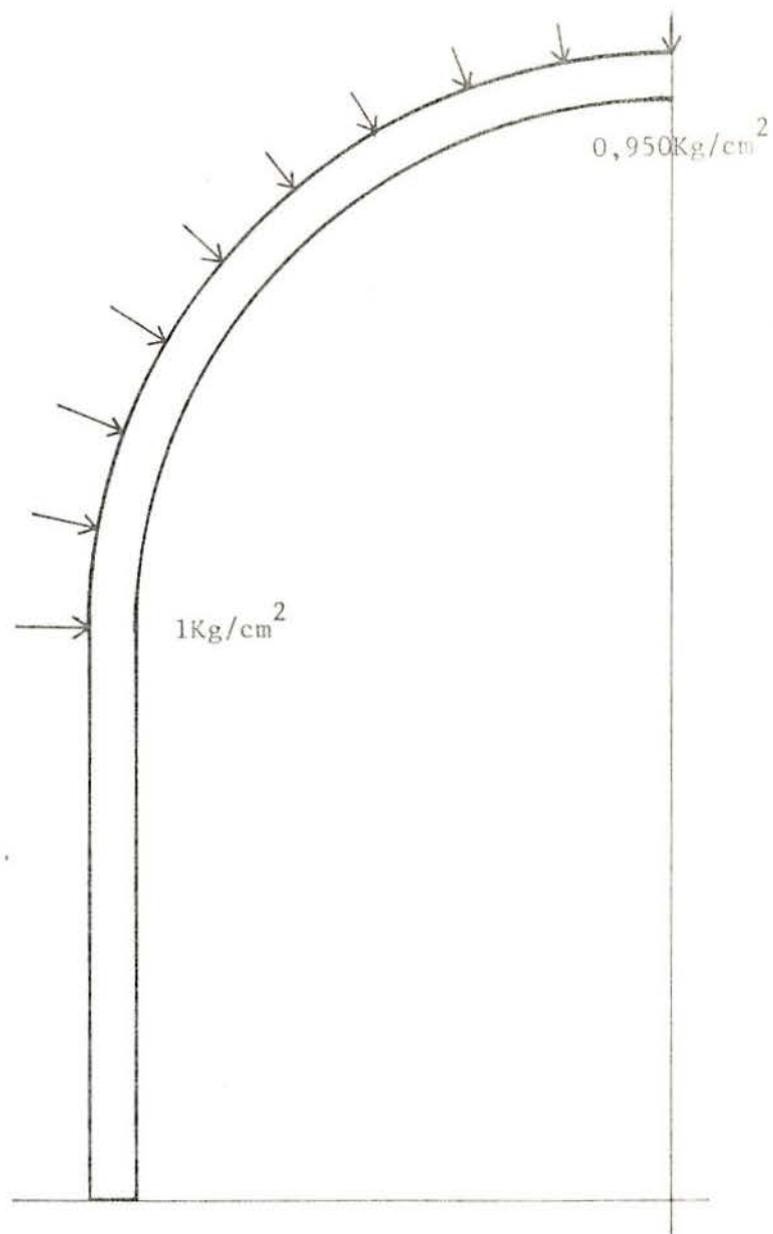
que se encontram representados nos gráficos 3.8 a 3.16 que se seguem.

3.4 - Análise da carga lateral

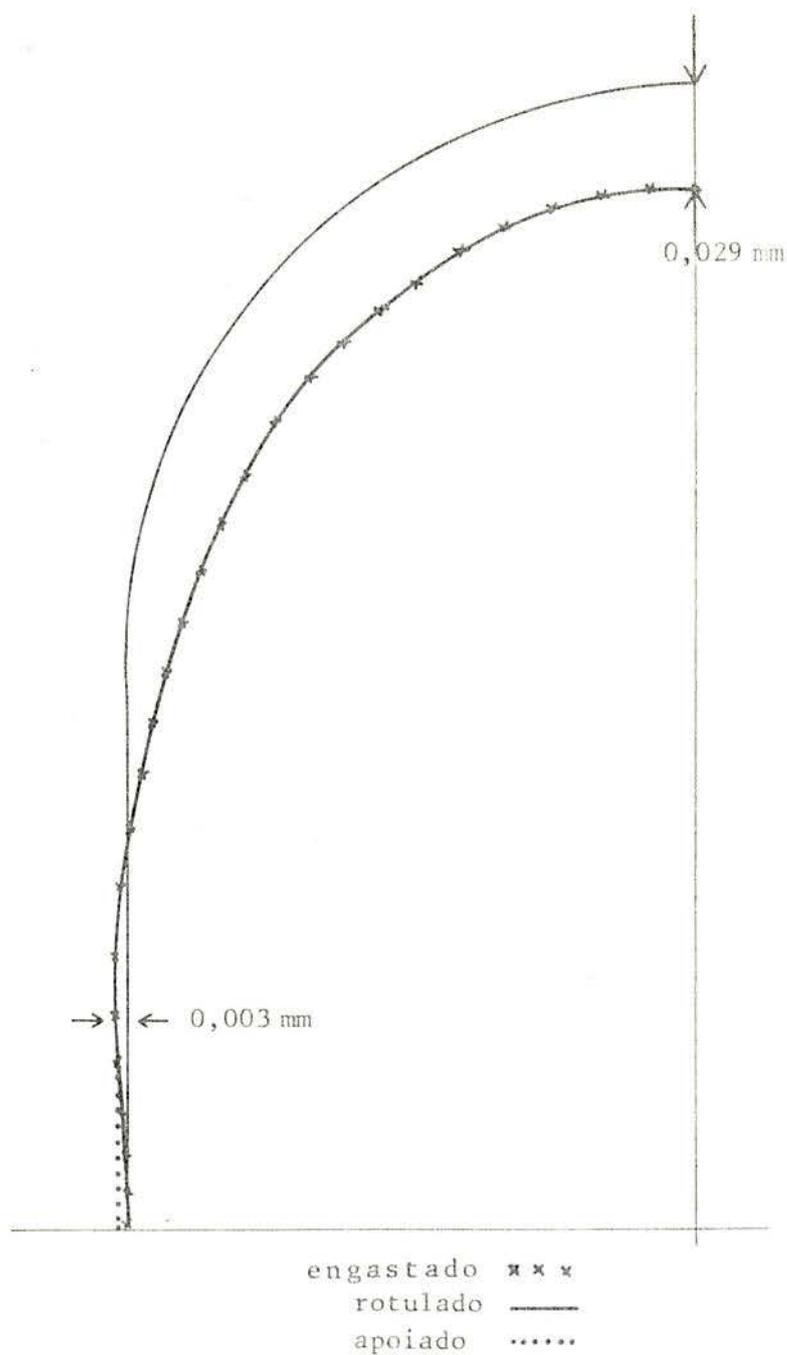
Como já visto no capítulo 2, o carregamento lateral externo foi considerado, não como uma carga única, atuando na região escolhida como de impacto, mas sim como um par de cargas simétricas e opostas que pretendem representar o efeito que seria produzido por essa carga única, em regiões vizinhas à área de carregamento.

Nesta análise numérica foram usados os elementos CPTH1 e CGIQ1 e para ela são válidas todas as considerações abordadas no item 3.1.

Um outro fator a ser considerado, tanto nesta análise como também no item 3.2, onde se estuda o carregamento de pressão interna, no qual se utilizam também estes dois elemen-



CARREGAMENTO EQUIVALENTE À PROTENSÃO VERTICAL
(Gráficos 3.8 a 3.10)



GRÁFICOS 3.8 - Deslocamentos em um meridiano

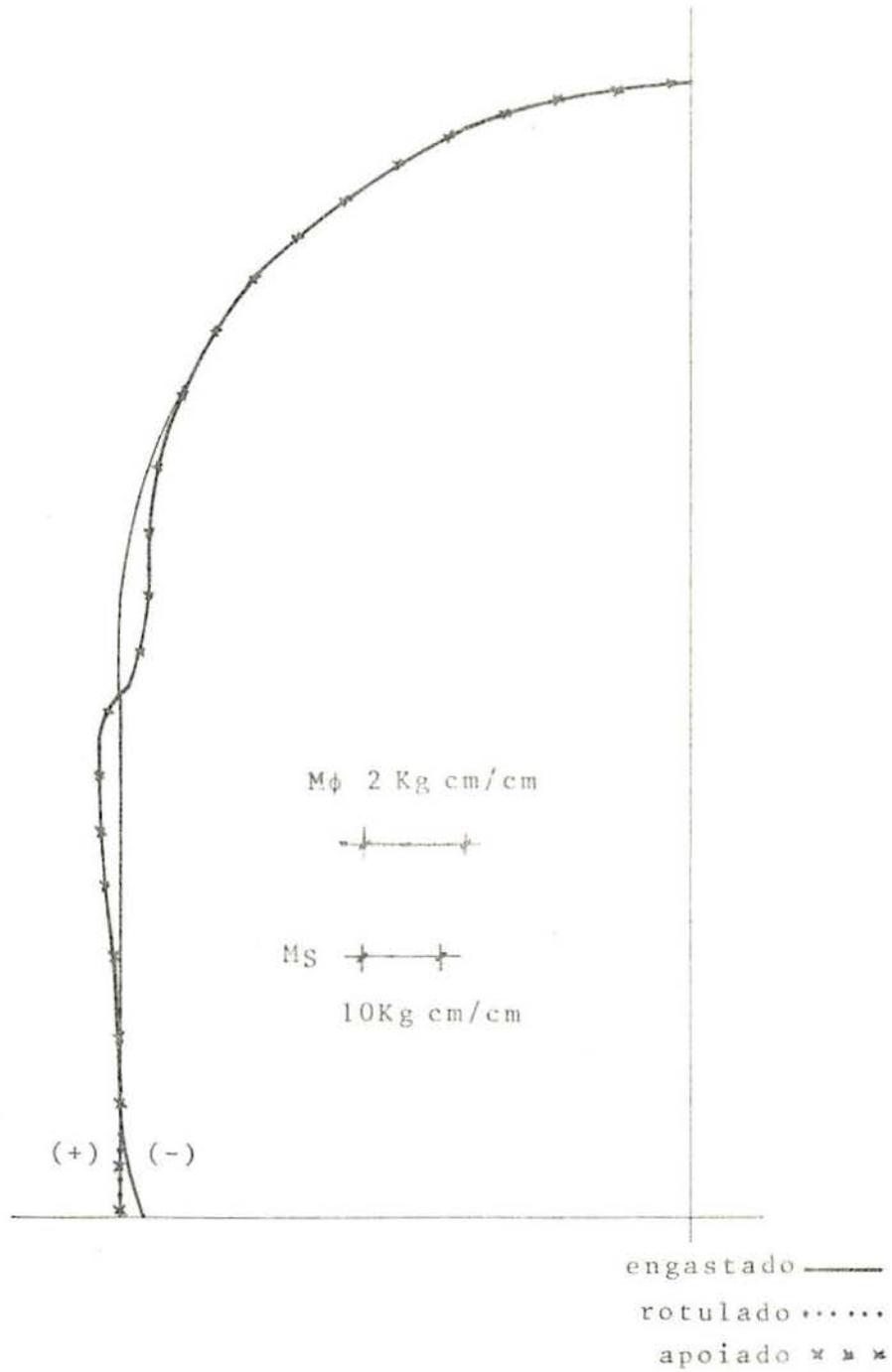


GRÁFICO 3.9 - Momentos fletores meridionais M_S e circunferenciais M_{ϕ}

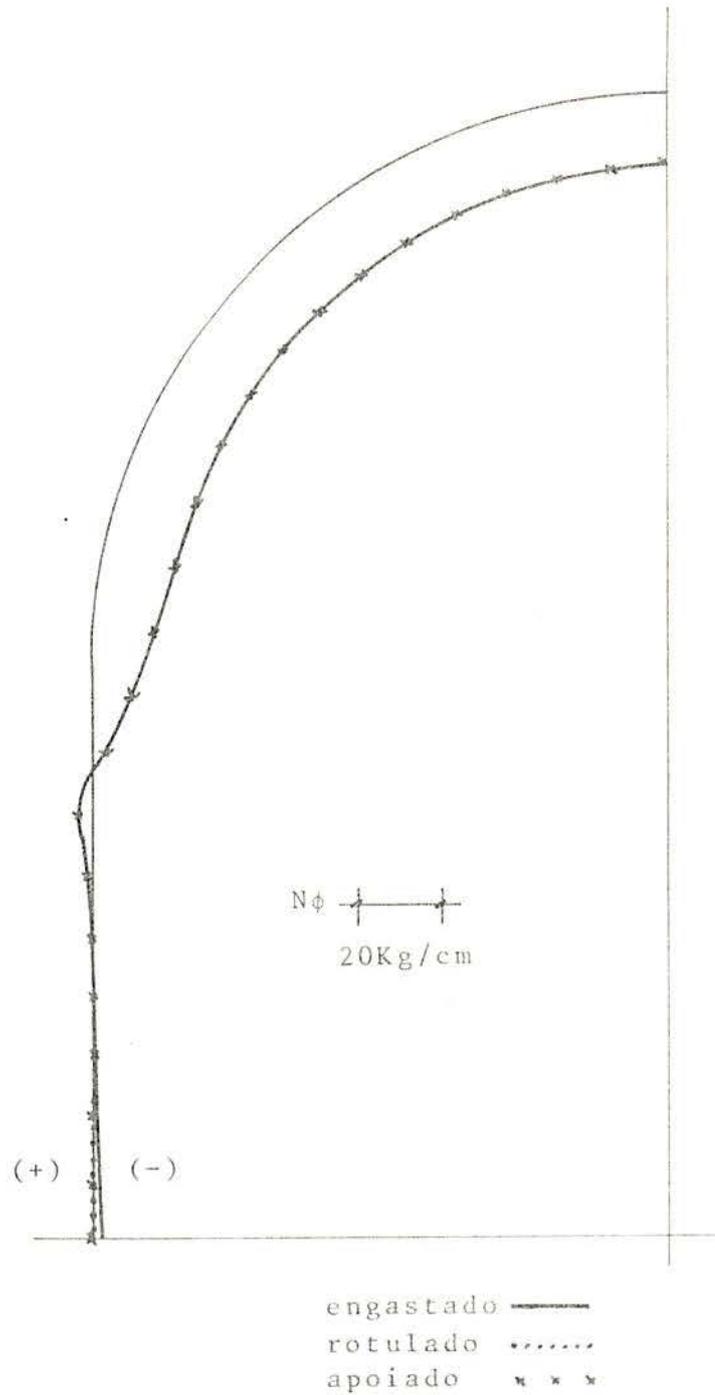
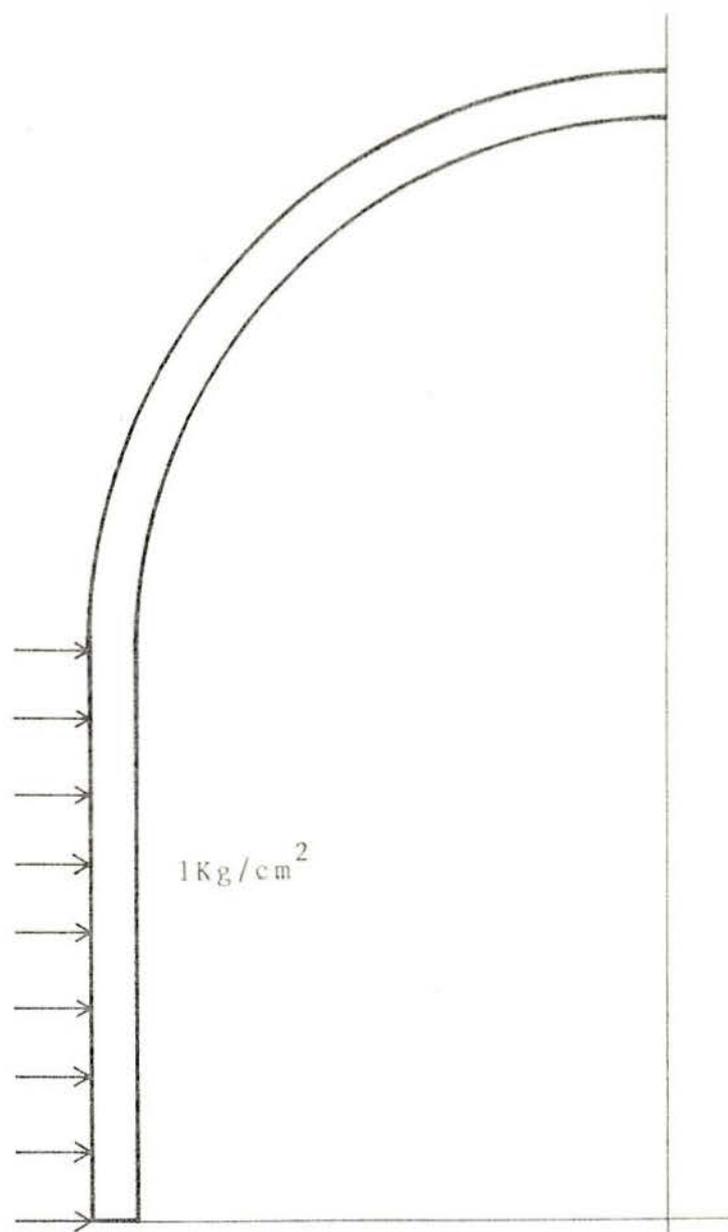


GRÁFICO 3.10 - Esforços normais circunferenciais $N\phi$ (N_s , constante e igual a -19Kg/cm)



CARREGAMENTO EQUIVALENTE À PROTENSÃO HORIZONTAL
(Gráficos 3.11 a 3.13)

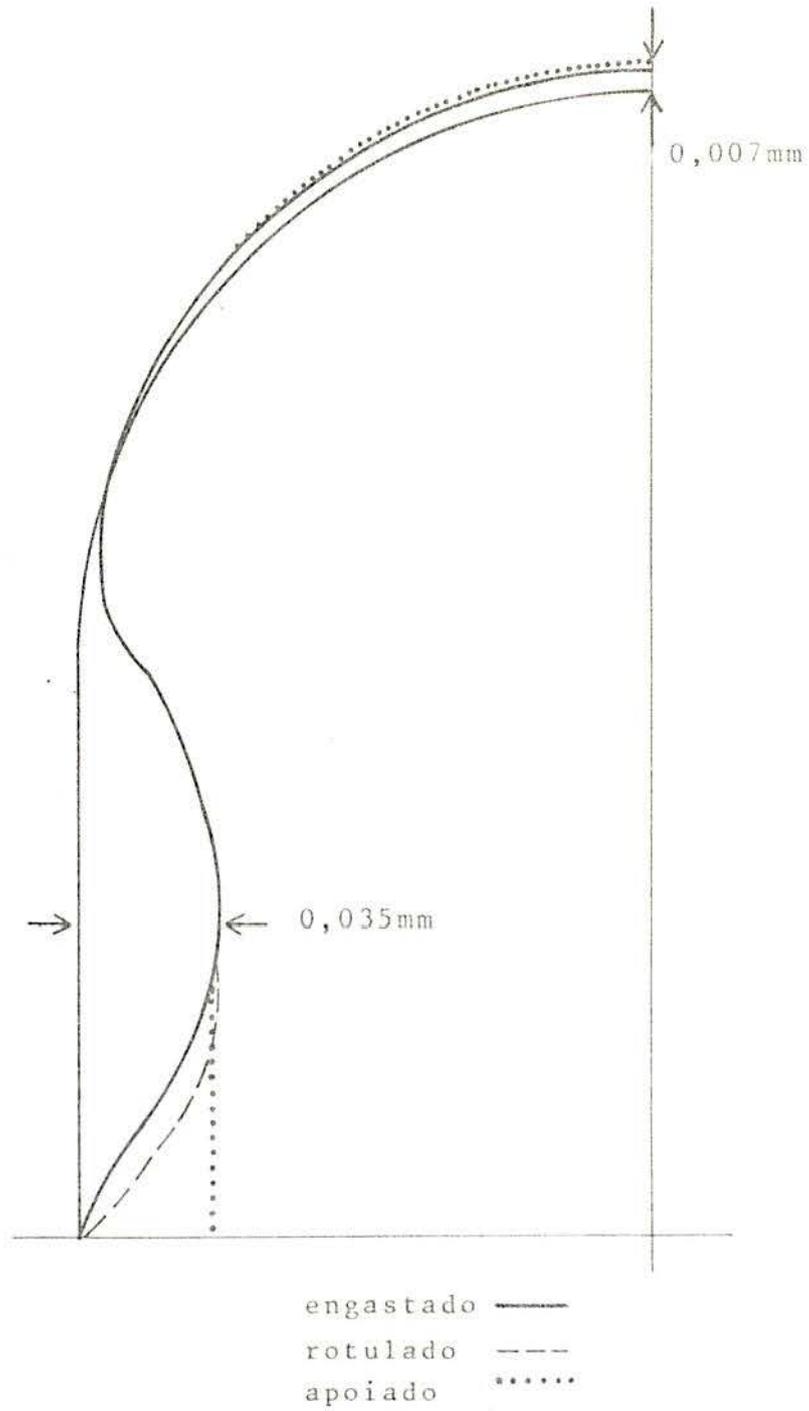


GRÁFICO 3.11 - Deslocamentos em um meridiano

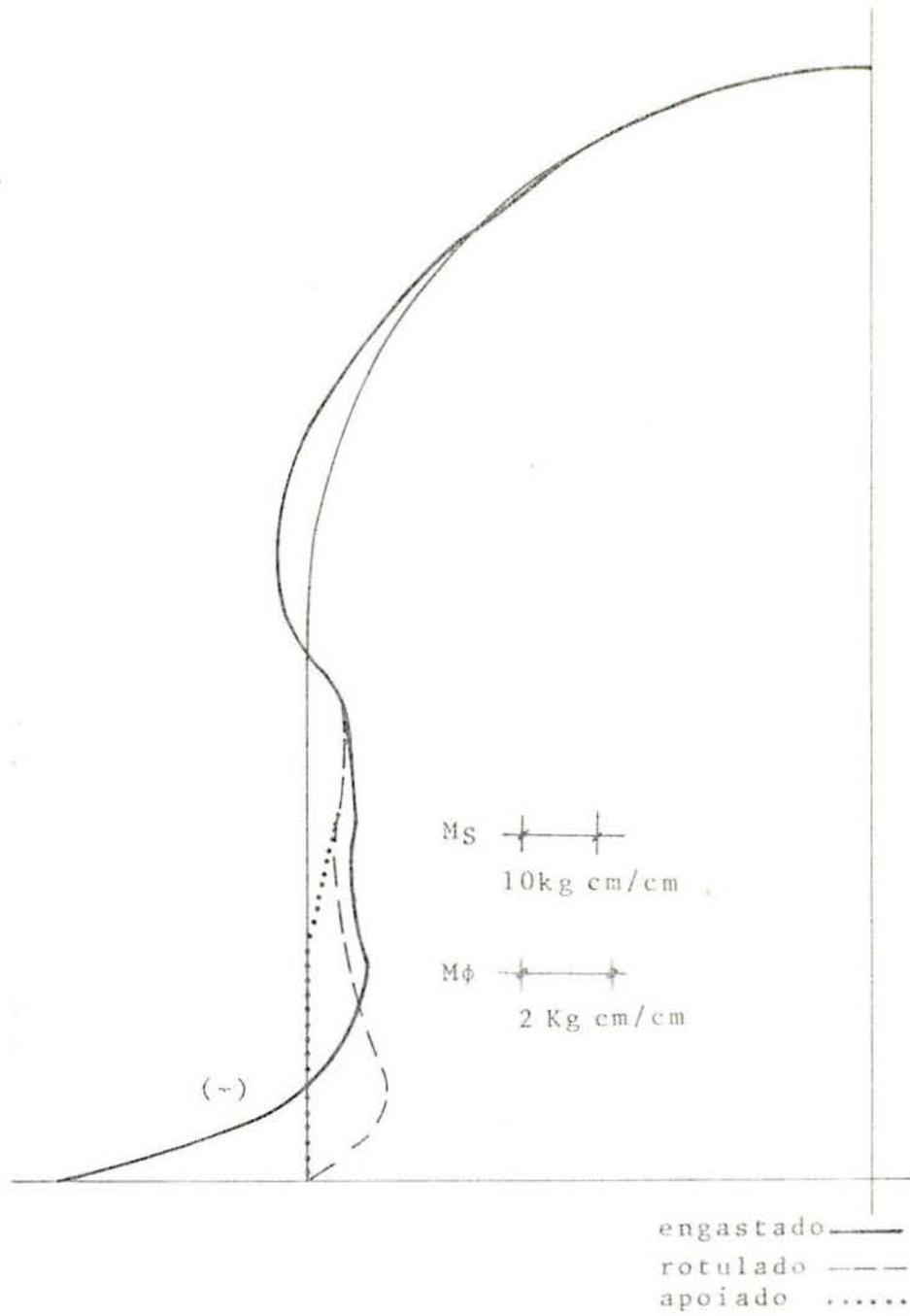


GRÁFICO 3.12 - Momentos fletores meridionais M_s e circunferenciais M_ϕ

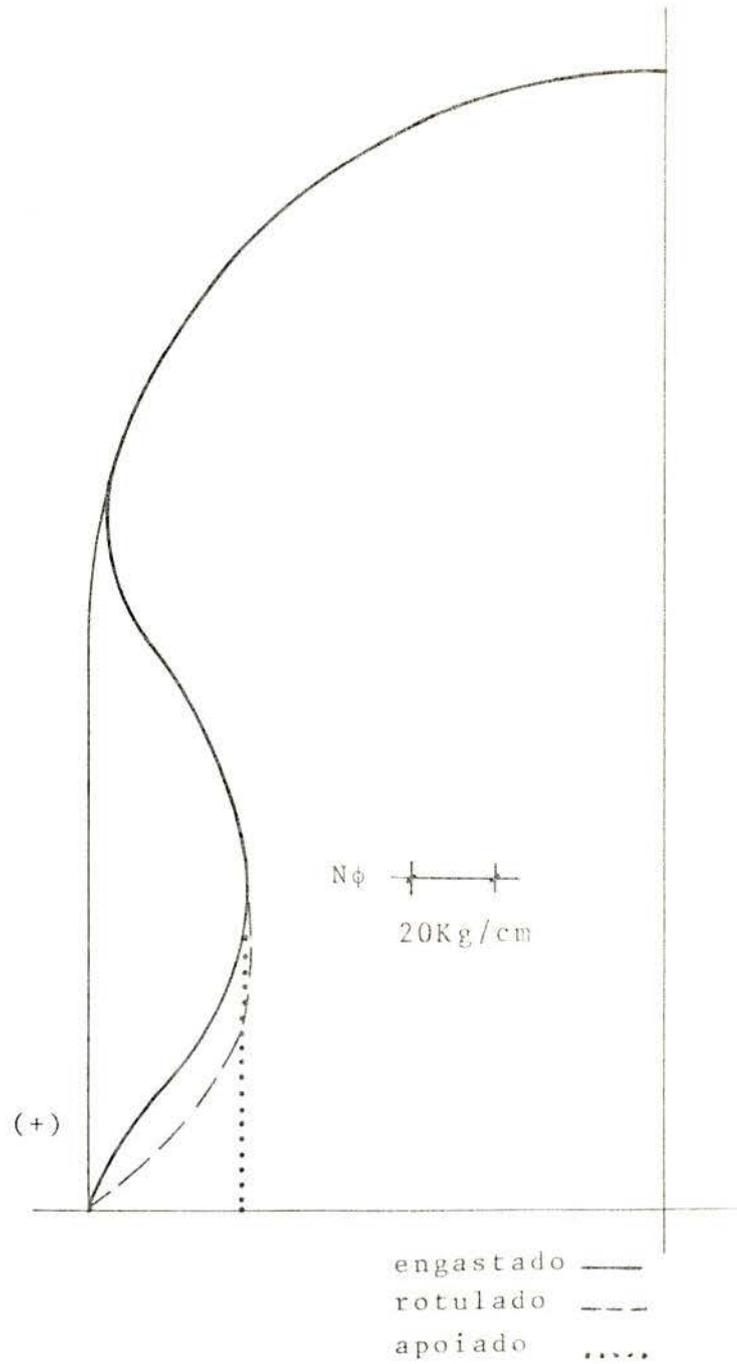
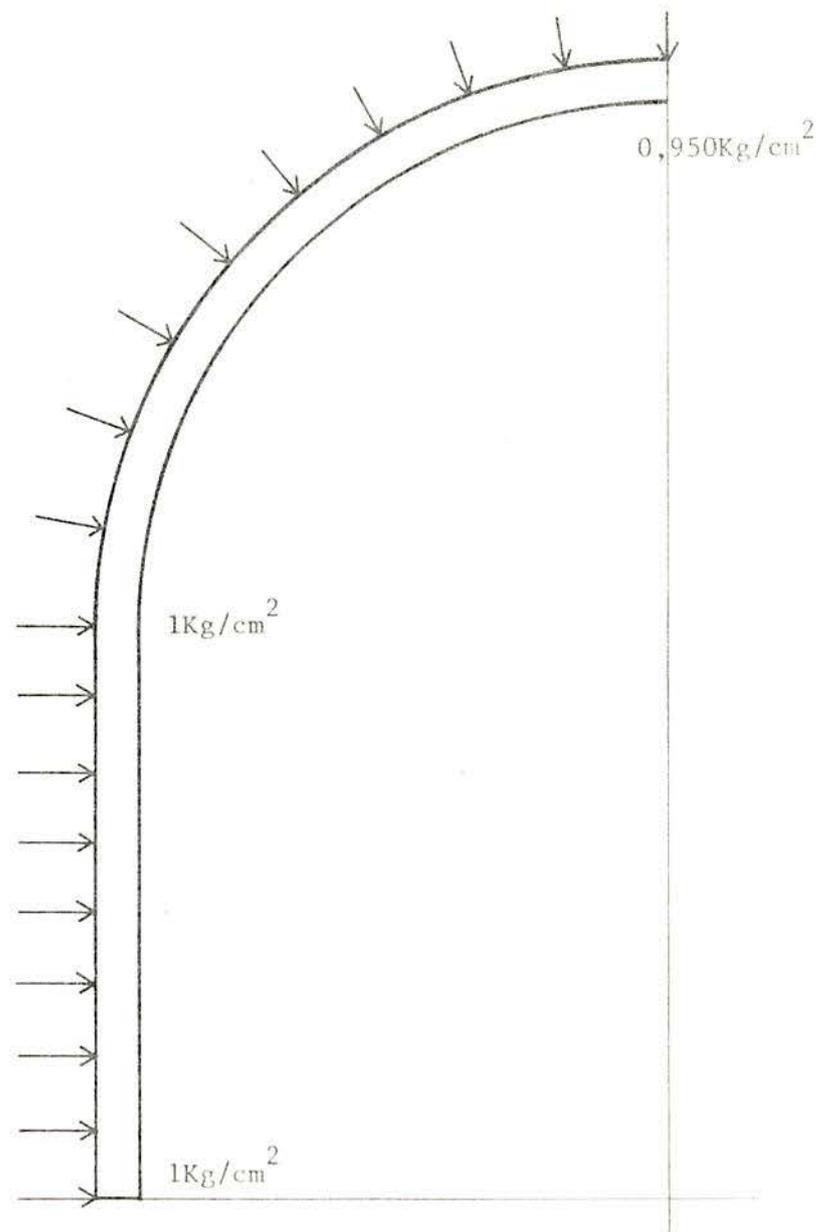


GRÁFICO 3.13 - Esforços normais meridionais $N\phi$
(N_s é nulo)



CARREGAMENTO EQUIVALENTE ÀS PROTENSÕES, VERTICAL E HORIZONTAL (Gráficos 3.14 a 3.16)

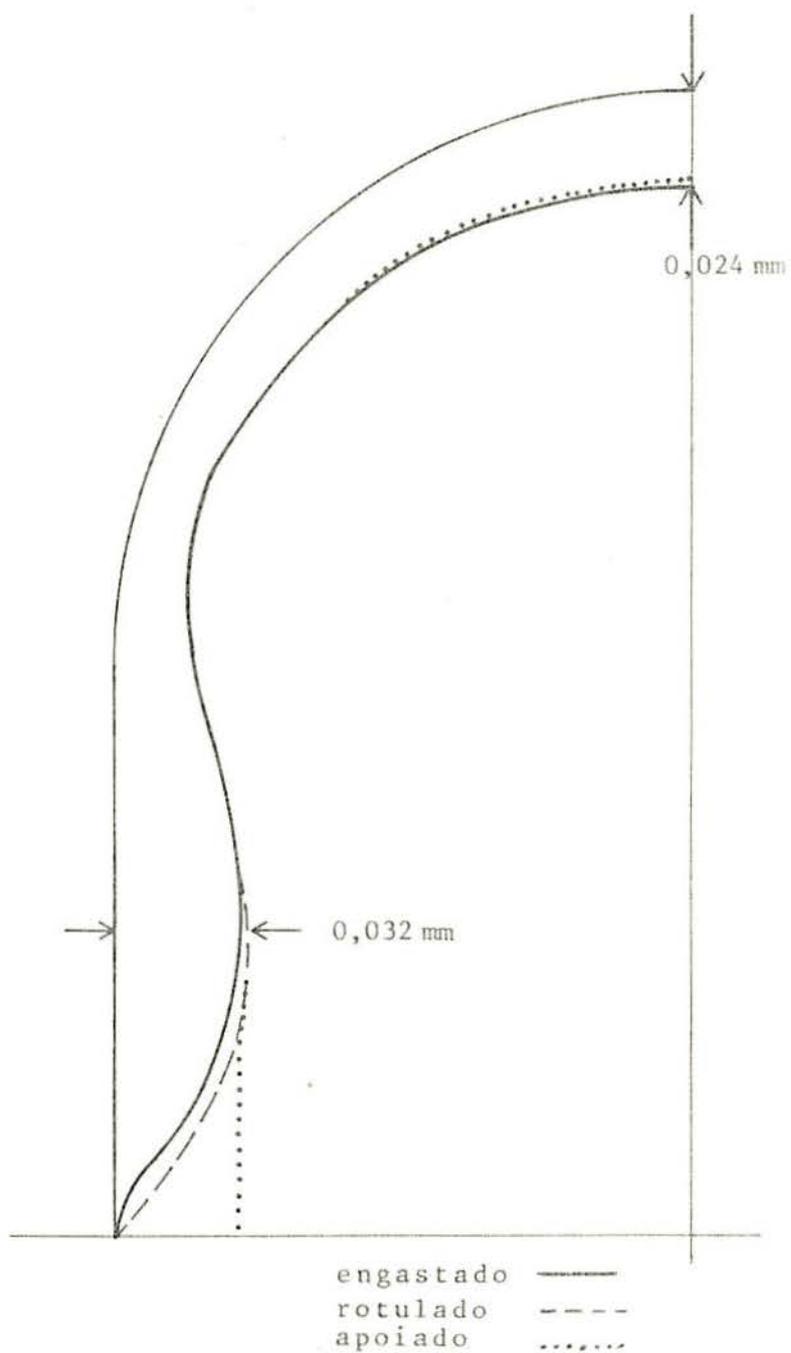


GRÁFICO 3.14 - Deslocamentos em um meridiano

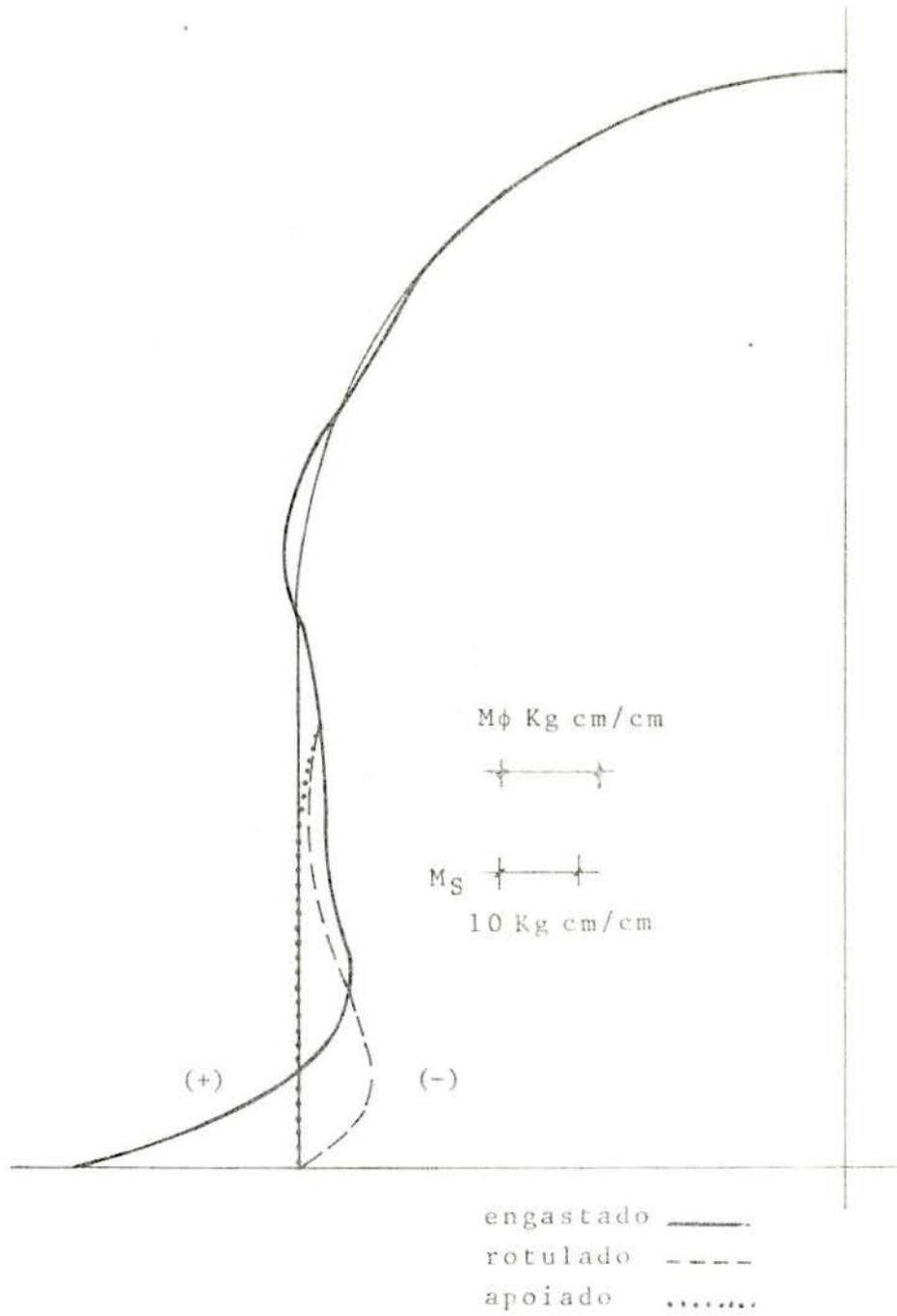


GRÁFICO 3.15 - Momentos fletores meridionais M_s e circunferenciais M_ϕ

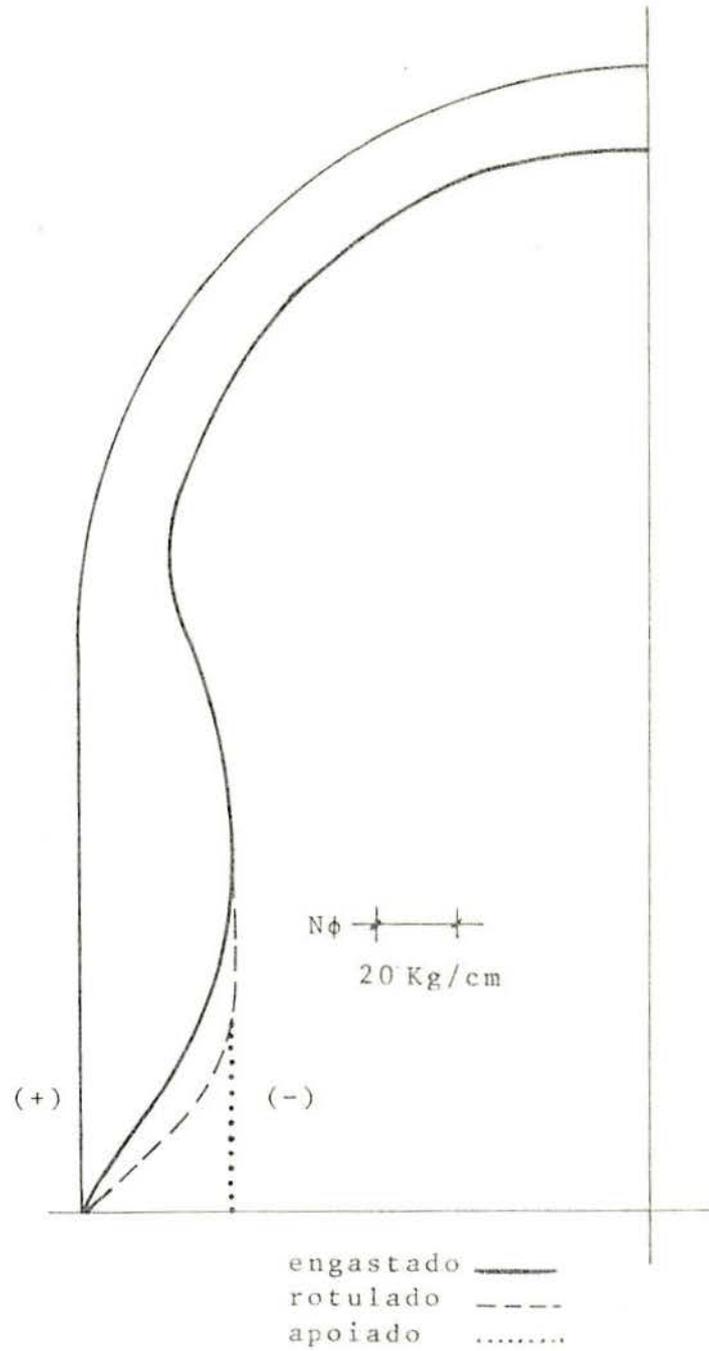


GRÁFICO 3.16 - Esforços normais circunferenciais $N\phi$ (N_s , constante igual a -19 Kg/cm)

tos, é o de que o primeiro deles, baseando-se na teoria de cascas delgadas, não leva em consideração as deformações provenientes dos esforços de corte, as tensões normais à superfície média da casca, nem tampouco os efeitos de torção nesta mesma superfície. Já o outro elemento, CGIQ1, considera as deformações provenientes do corte, seguramente o mais importante dos três efeitos mencionados.

Tendo sido este carregamento considerado no regime elástico, como o foram todos os demais, tomou-se também neste caso, um valor arbitrário de carga que, embora não seja de mesma grandeza daquele utilizado nos ensaios experimentais, tem seus efeitos semelhantes e proporcionais na razão entre ambos.

Esta carga foi arbitrada em 1000 kg, e distribuída igualmente em toda a região de 20 cm^2 , como mostra a Fig. 2.6.

Tendo sido escolhido, por razões puramente experimentais, duas cargas simétricas, Fig. 3.17, proporcionaram-se então para a análise numérica dois eixos de simetria na estrutura, o que permite que esta seja analisada em somente uma quarta parte de sua superfície total conforme mostra-se hachurado na Fig. 3.17.

Uma análise numérica que tentasse utilizar malhas abrangendo uma região com menos de 90° , como foi utilizado para os outros carregamentos, seria bastante difícil, posto que, não sendo este carregamento axissimétrico, não se saberia quais as condições de contorno a serem aplicadas a esta malha em um meridiano que não coincidissem com um dos eixos de simetria.

Foram, então, elaboradas duas malhas, ambas abrangendo 90° , uma para o elemento CPTH1, Fig. 3.18, e outra para o elemento CGIQ1, Fig. 3.19.

A primeira delas, Fig. 3.18, utilizando o elemento CPTH1, é composta por 110 elementos e possui 69 nós e 414 graus de liberdade.

Sobre esta malha foi aplicada a carga externa, na forma de cargas equivalentes nodais aplicadas nos vértices do retângulo, composto por dois elementos, conforme encontra-se hachurado na Fig. 3.18.

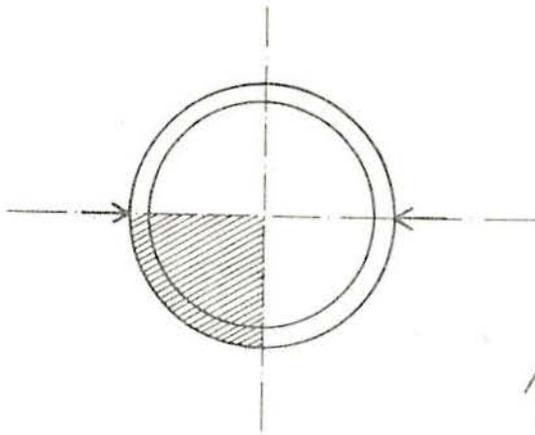


Fig. 3.17 - Simetria

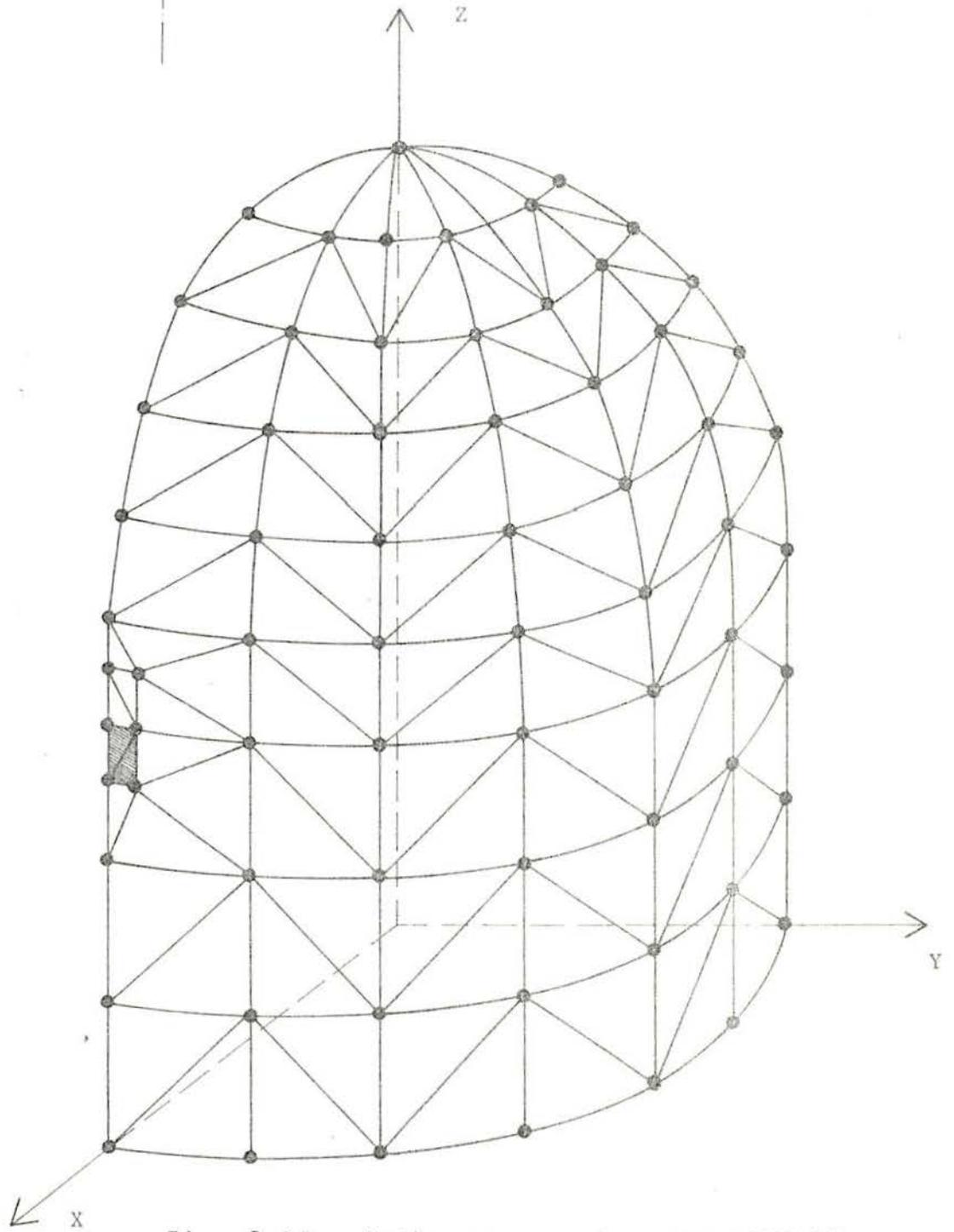


Fig. 3.18 - Malha para o elemento "CPTH1"

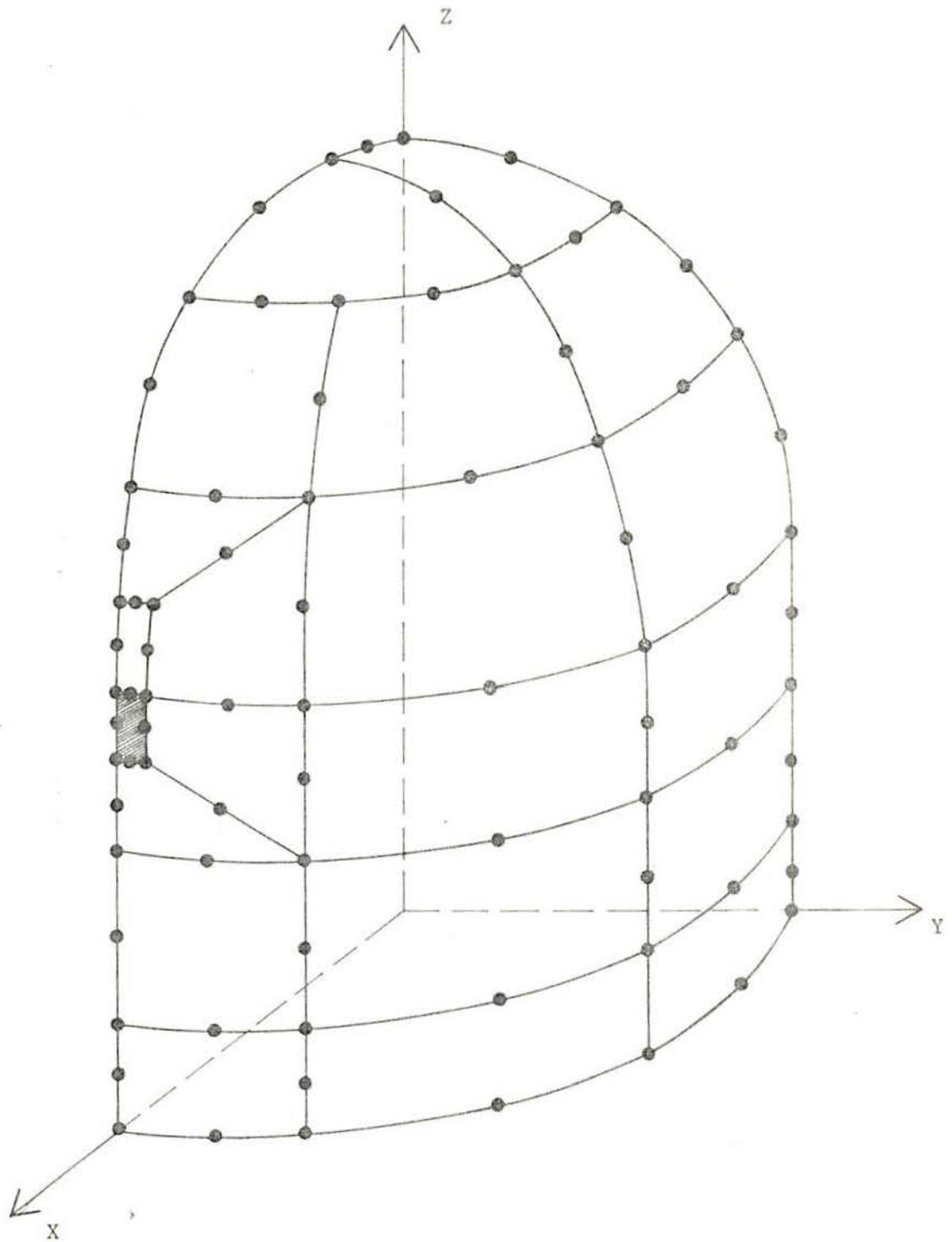


Fig. 3.19 - Malha para o elemento "CGIQ1"

As condições de contorno aplicadas a esta malha, relativas aos deslocamentos e rotações esquematizados na Fig. 3.5, estão contidas no quadro 3.2, onde novamente no bordo inferior foram aplicadas as três hipóteses mencionadas, de apoio simples, rótula e engaste.

Quadro 3.2

Condições de contorno para o carregamento lateral externo, utilizando os elementos CPTH1 e CGIQ1, onde
0 - restringido e 1 - permitido

nô superior		contorno no plano X-Z	contorno no plano Y-Z	nôs do bordo inferior		
u	0	1	0	1	0	0
v	0	0	1	1	0	0
w	1	1	1	0	0	0
Ru	0	0	1	1	1	0
Rv	0	1	0	1	1	0
Rw	0	0	0	0	0	0

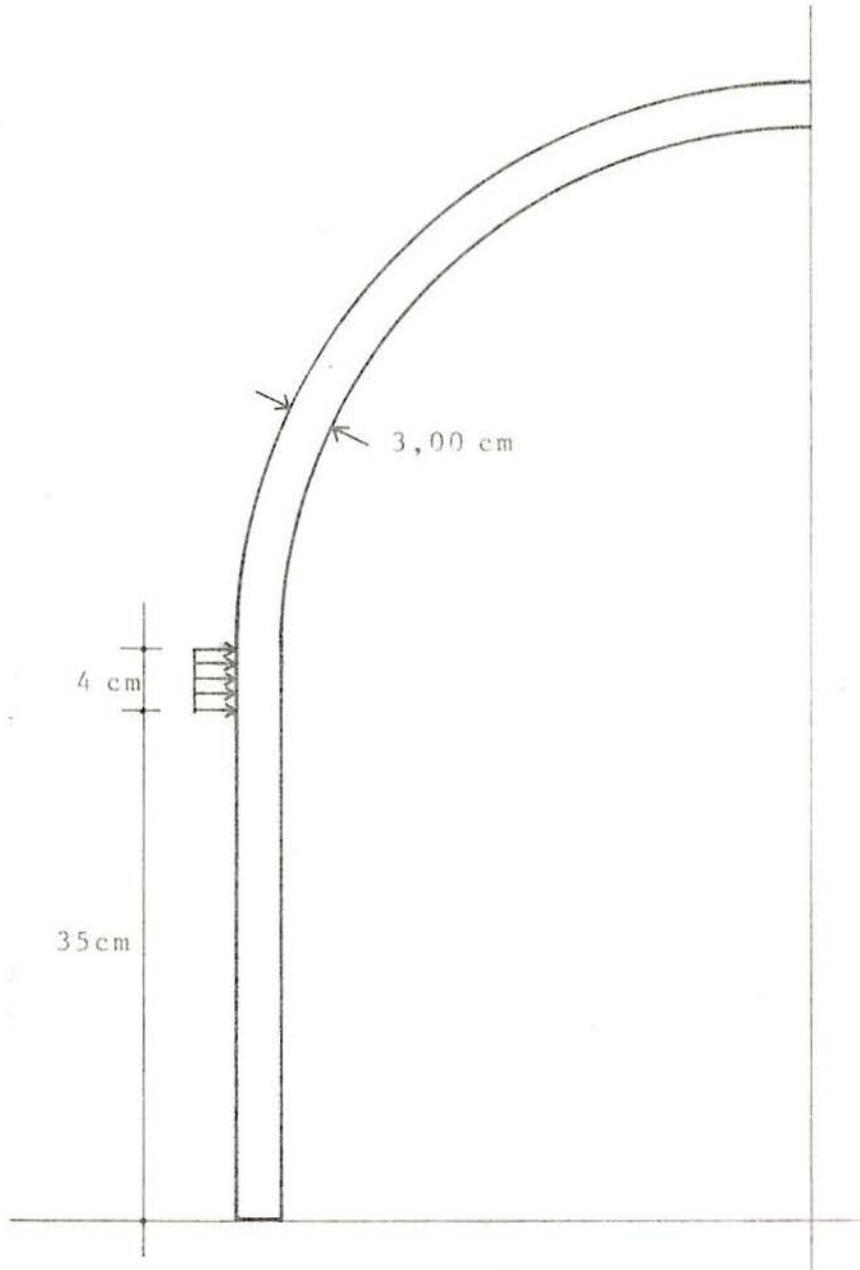
Esta análise forneceu os resultados de:

- Deslocamentos
- Momentos fletores na direção meridional
- Momentos fletores na direção circunferencial
- Esforços normais na direção meridional
- Esforços normais na direção circunferencial

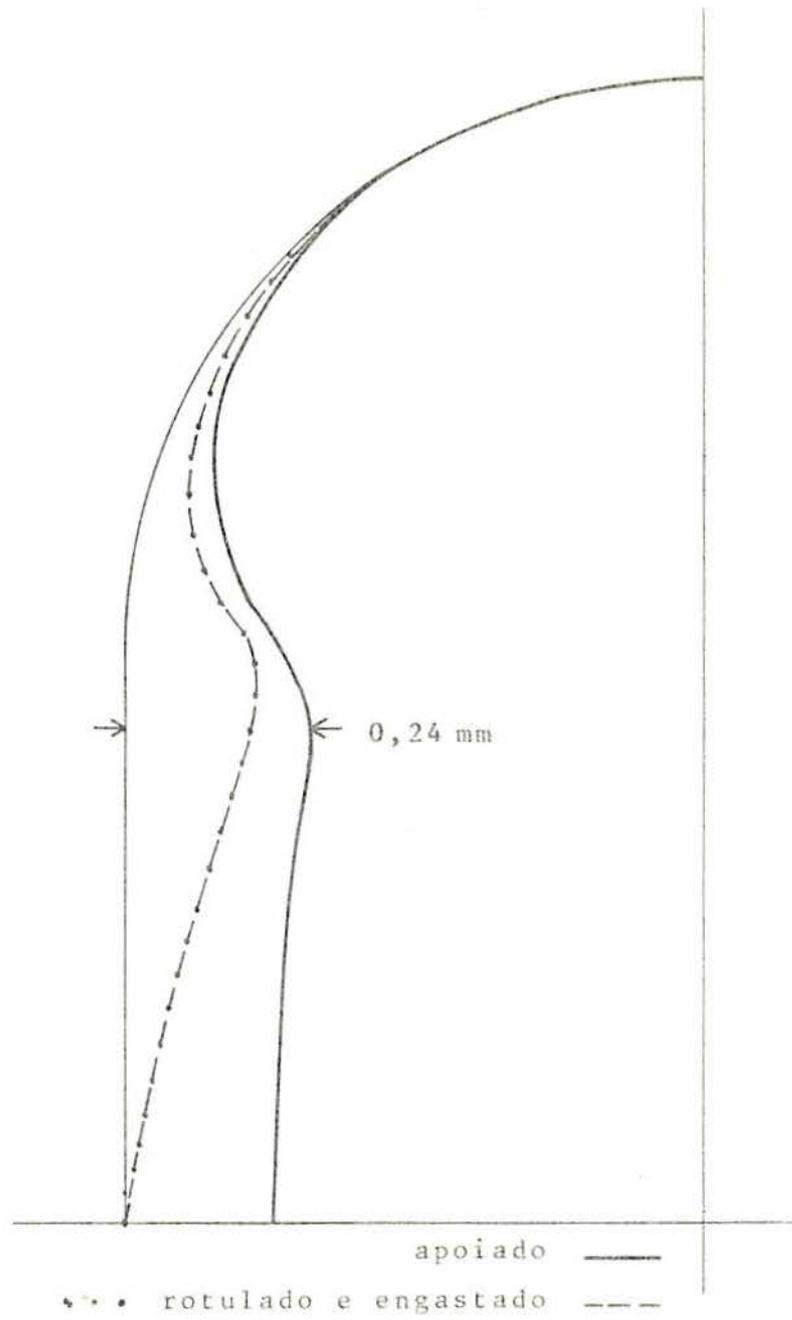
que se encontram representados nos gráficos 3.17a,b, 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21, respectivamente.

A segunda malha, utilizando o elemento CGIQ1, com posta por 21 elementos, possui 82 nós e 492 graus de liberdade. Sobre esta malha foi aplicada a carga lateral considerada como uma pressão uniformemente distribuída em toda a área de carregamento, a qual é abrangida por um só elemento, como pode ser visto na Fig. 3.19.

Como condições de contorno, foram aplicadas as mesmas que constam do quadro 3.2, utilizadas para o elemento CPTH1.



CARREGAMENTO LATERAL



,GRÁFICO 3.17a - Deslocamentos em um meridiano

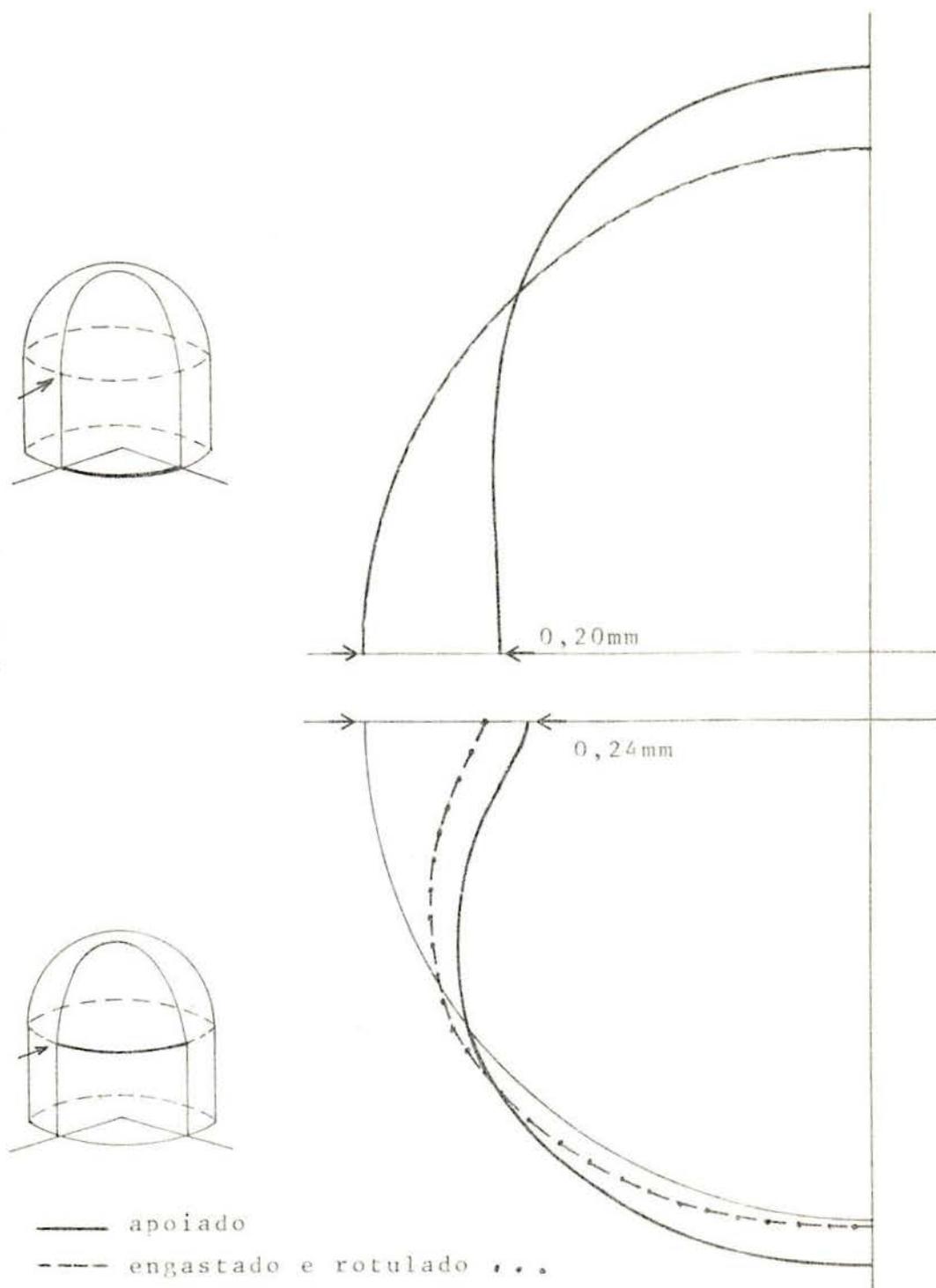


GRÁFICO 3.17b - Deslocamentos nos paralelos da carga e da base

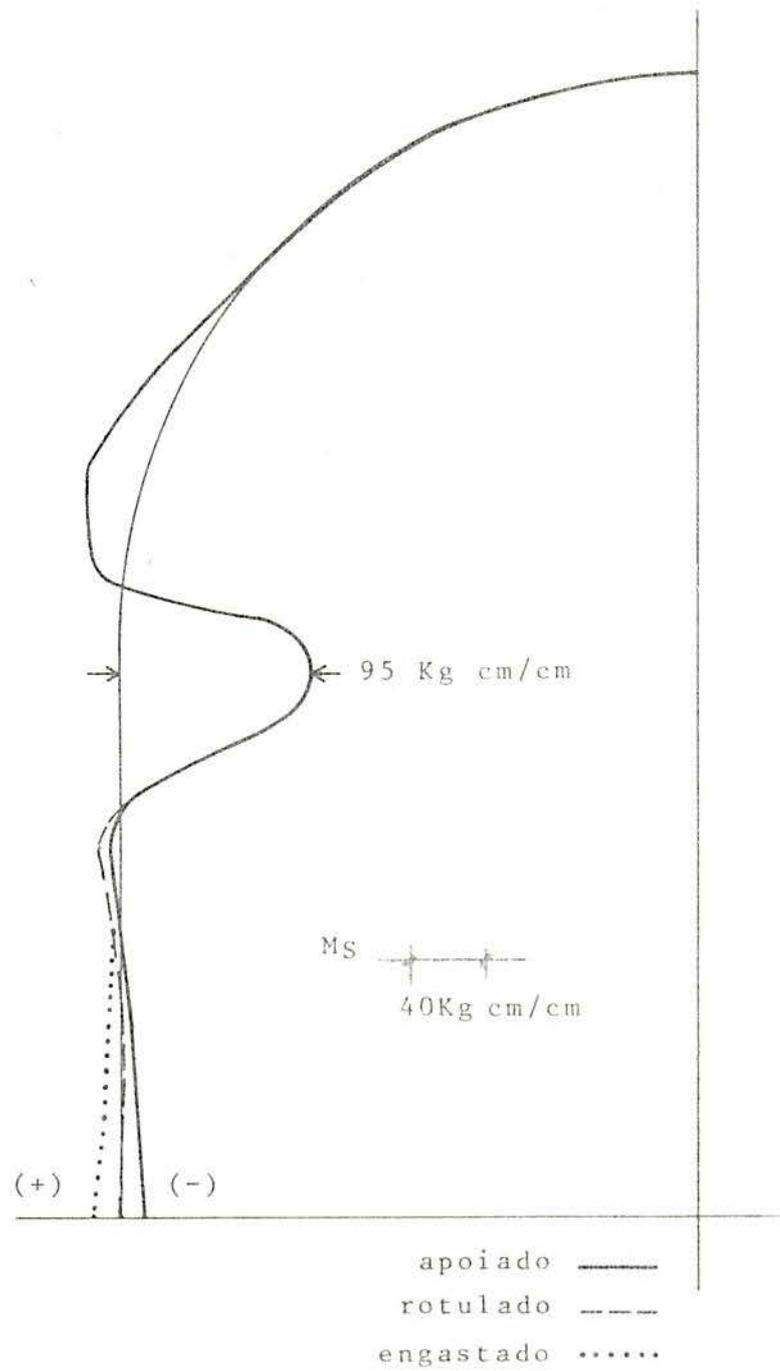


GRÁFICO 3.18 - Momentos fletores meri-
dionais

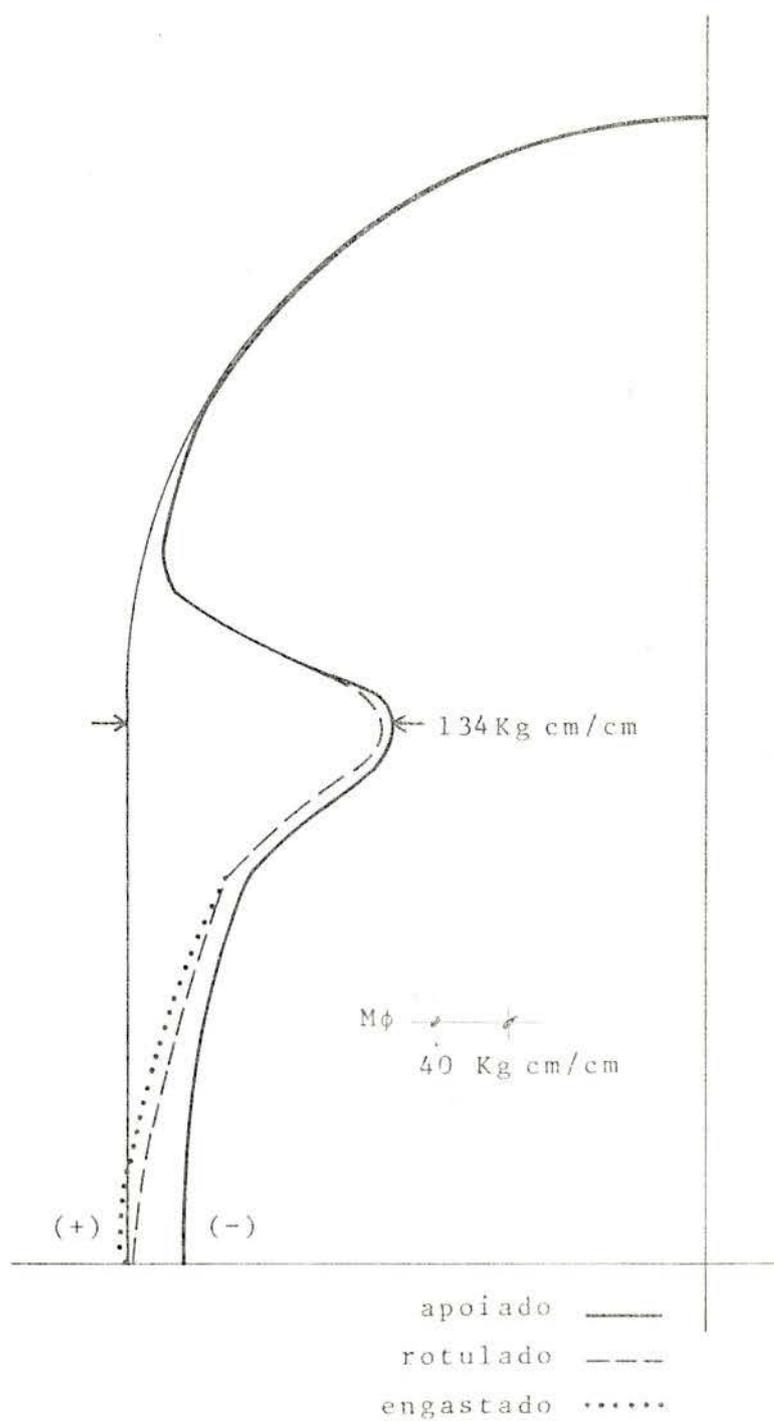


GRÁFICO 3.19 - Momentos fletores circunferenciais

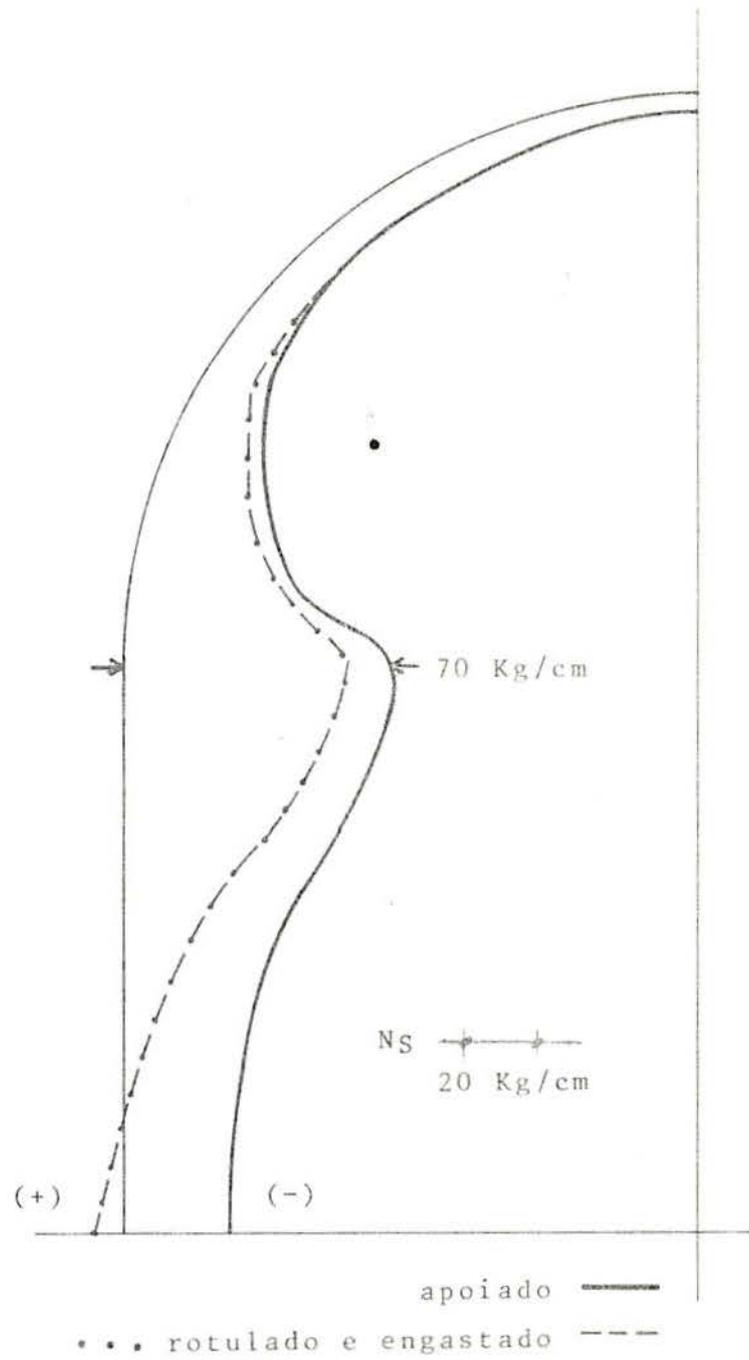


GRÁFICO 3.20 - Esforços normais meridionais

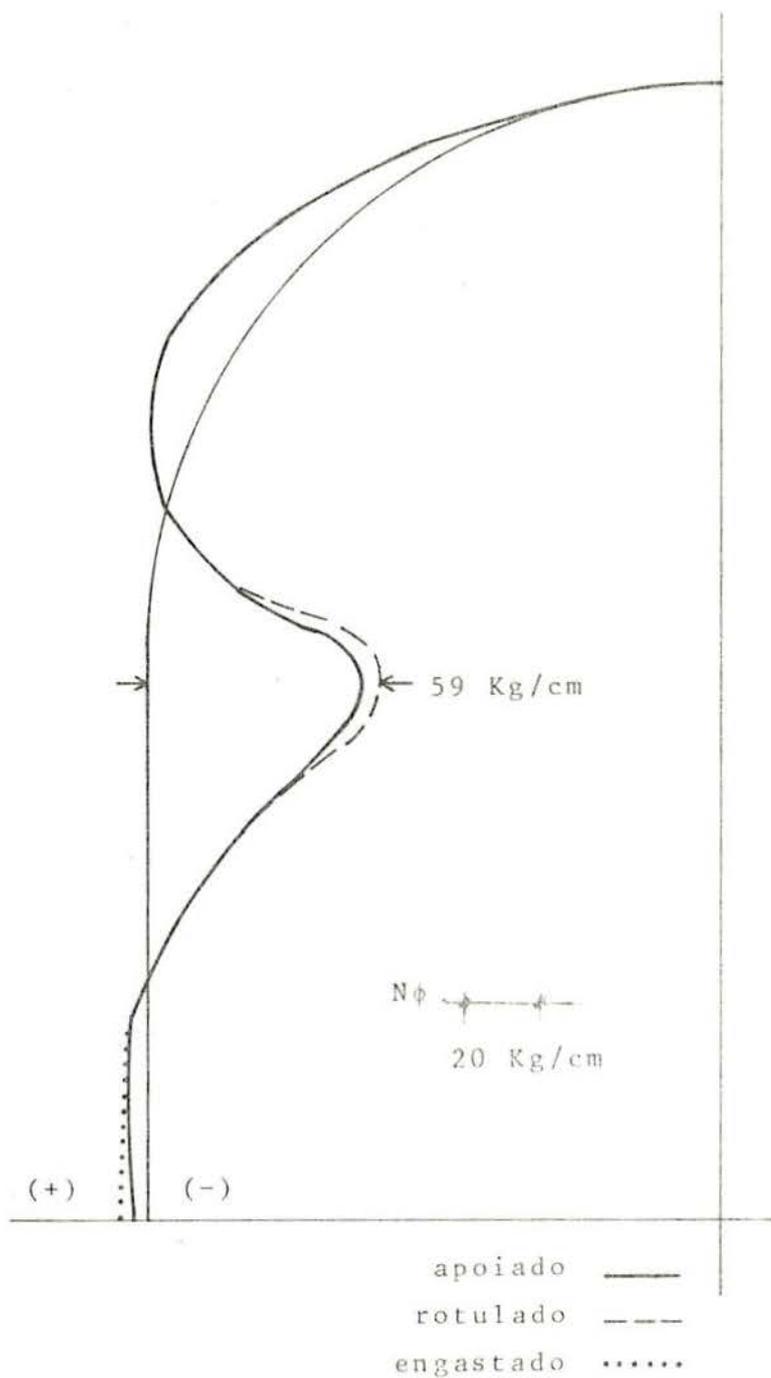


GRÁFICO 3.21 - Esforços normais circunferenciais

Desta segunda análise foram também obtidos os resultados de:

- Deslocamentos
- Momentos fletores na direção meridional
- Momentos fletores na direção circunferencial
- Esforços normais na direção meridional
- Esforços normais na direção circunferencial

que se encontram representados nos gráficos 3.22, 3.23, 3.24, 3.25 e 3.26, respectivamente, nos quais se faz uma comparação com aqueles obtidos através da análise que utilizou o elemento CP1H1.

Observa-se nestes gráficos que ambos elementos apresentam resultados bastante compatíveis, a menos de certas oscilações que podem ser fruto da diferença entre os tipos dos elementos, como também da malha e da forma de aplicação da carga, que em um dos casos foi considerada como equivalentes nodais e no outro como distribuída, ou ainda, como foi mencionado anteriormente, por somente um deles considerar deformações oriundas dos efeitos de corte.

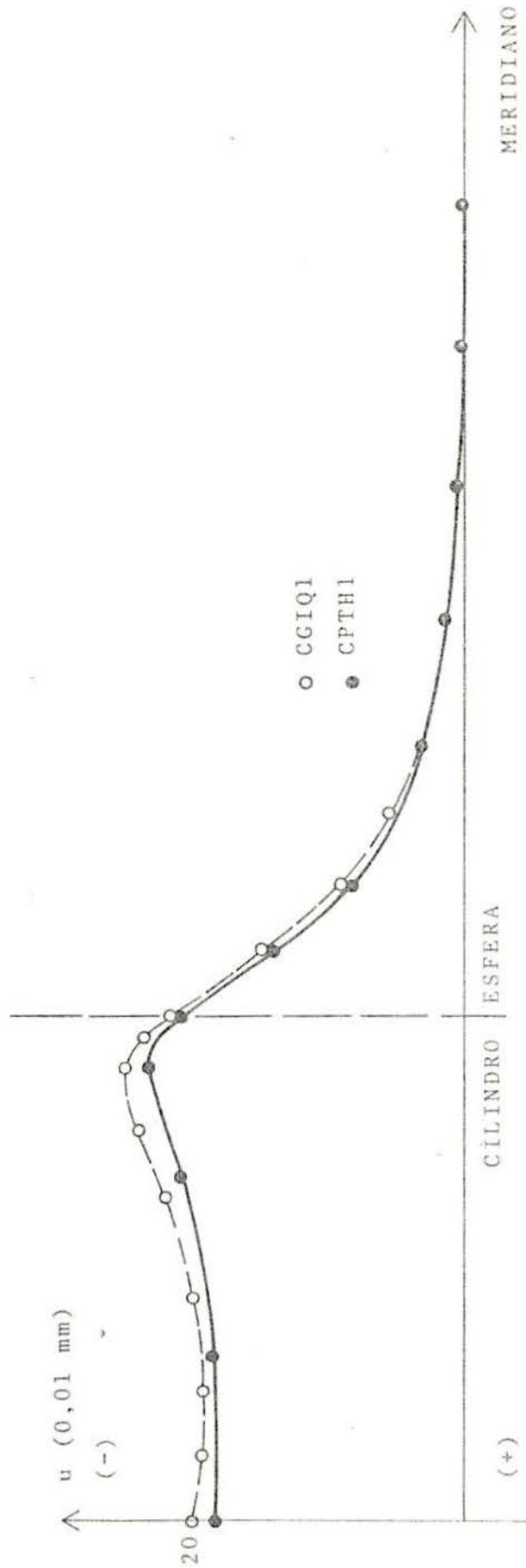
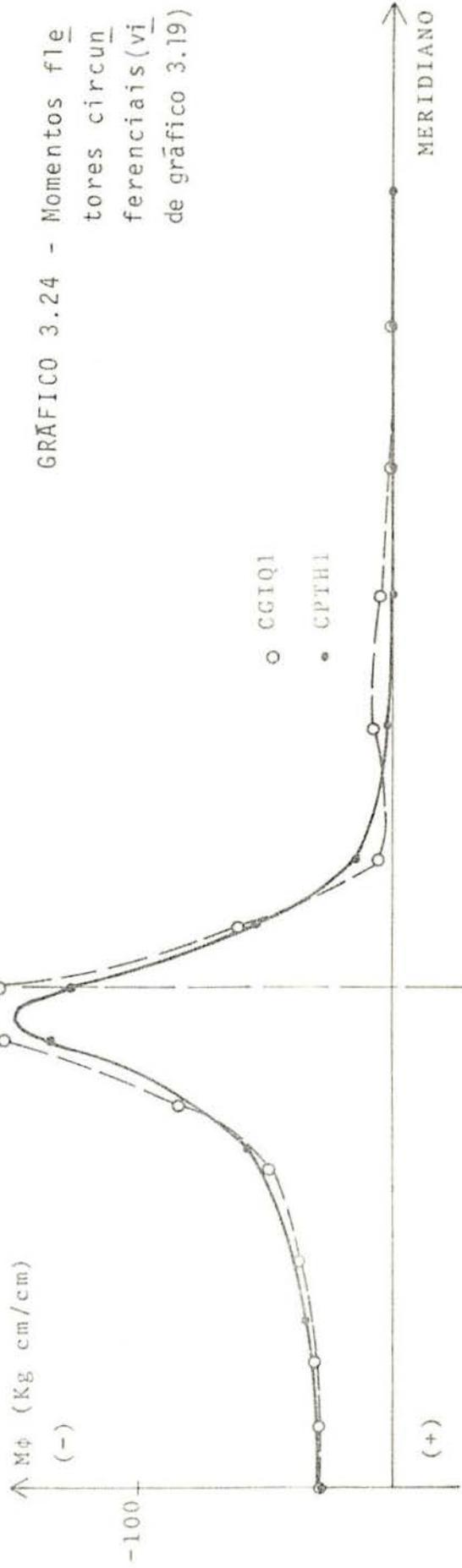
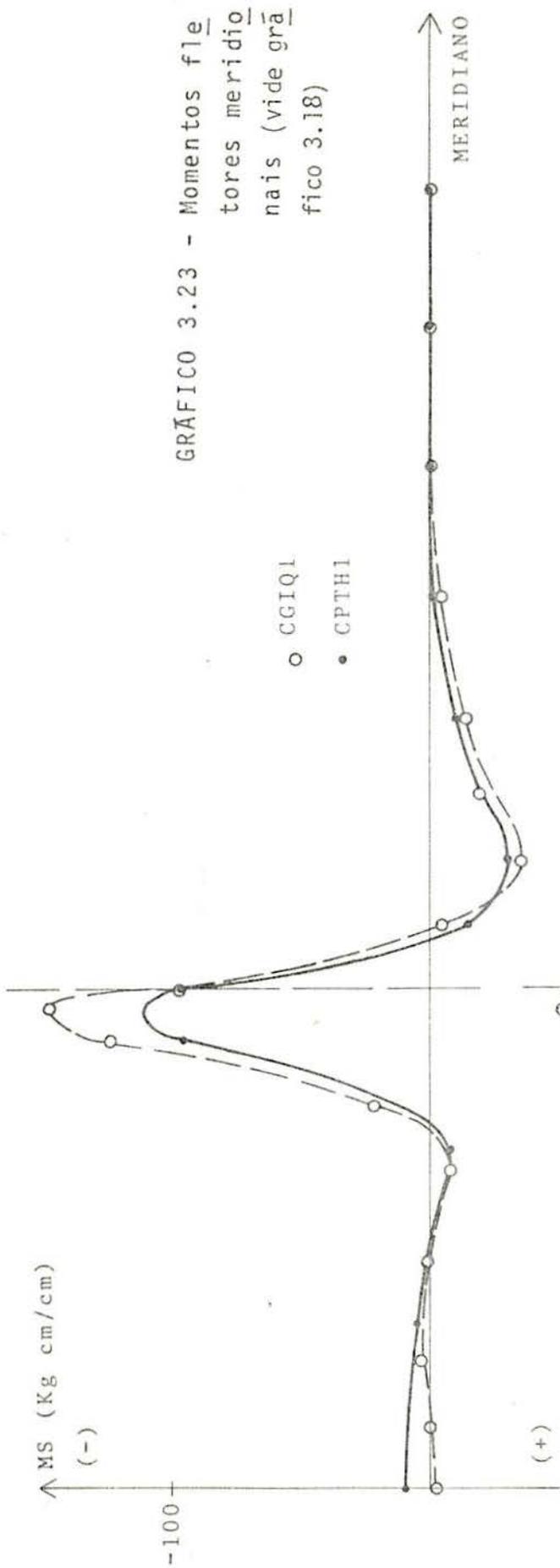
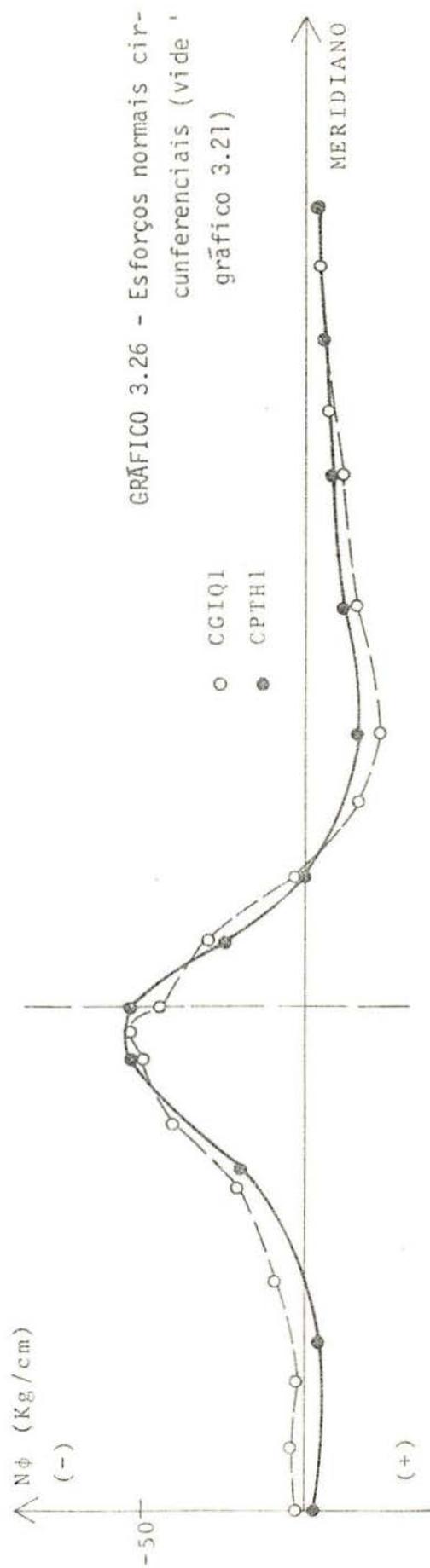
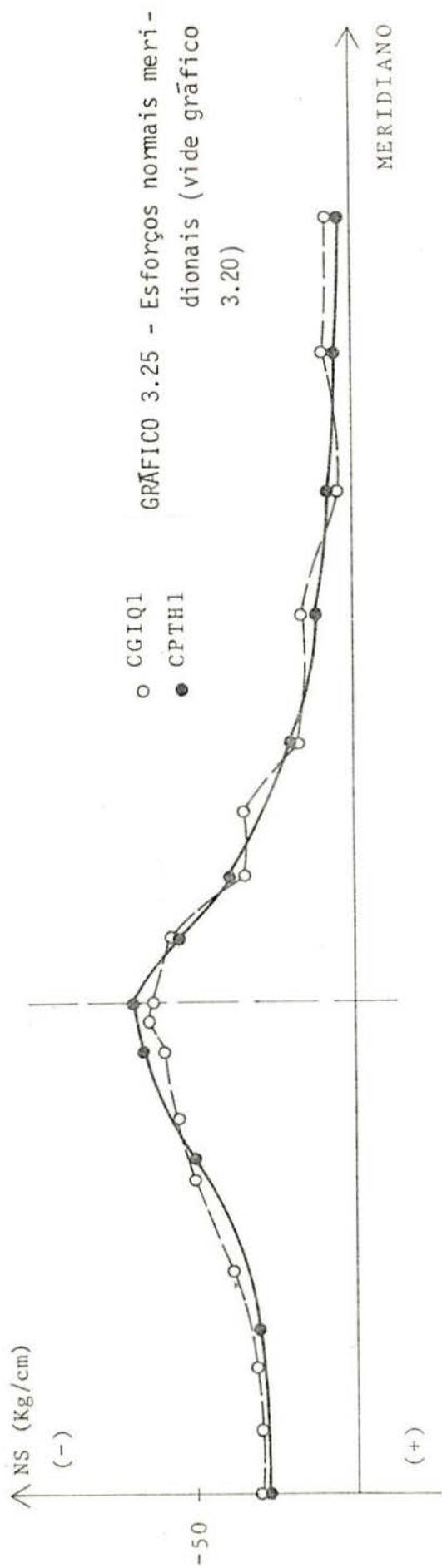


GRÁFICO 3.22 - Deslocamentos em um meridiano, comparação entre elementos
(vide gráfico 3.17a)





CAPÍTULO 4

MONTAGEM E PREPARAÇÃO DO MODELO

4.1 - Fôrmas

O modelo foi construído com o auxílio de três fôrmas distintas, uma interna e duas externas, colocadas sobre uma base de madeira.

A fôrma interna, construída em isopor (poliuretano expandido), consistiu em um cilindro superposto por uma semi-esfera, o primeiro com 39 cm de altura e 37,5 cm de raio e a semi-esfera formada pela superposição de 19 chapas com espessura de 2 cm que, cortadas em círculos de raios decrescentes e com inclinação variável no contorno, foram coladas entre si e sobre o cilindro (Fig. 4.1).

Foi escolhido o isopor como material de confecção das fôrmas, pelos seguintes motivos:

- por sua grande trabalhabilidade, permitindo fáceis operações de corte e colagem das chapas, como também fácil homogeneização e retirada das fôrmas depois de concretado o modelo;

- por seu baixo peso específico, proporcionando fácil manuseio e transporte das fôrmas;

- por sua pequena rigidez, admitindo as deformações provenientes da retração do microconcreto, sem provocar tensões de tração importantes.

Esta fôrma foi, então, revestida com um material plástico adesivo, tipo "contact", para eliminar a rugosidade do isopor e evitar que o microconcreto a ele aderisse, facilitando, então, deste modo, a desformagem do modelo, bem como, não permitindo, assim, que a água do microconcreto, durante a concretagem, percolasse pelas emendas das chapas (Fig. 4.2).

A fôrma externa da parte cilíndrica, foi construída

Fig 4.1 - Fôrma interna

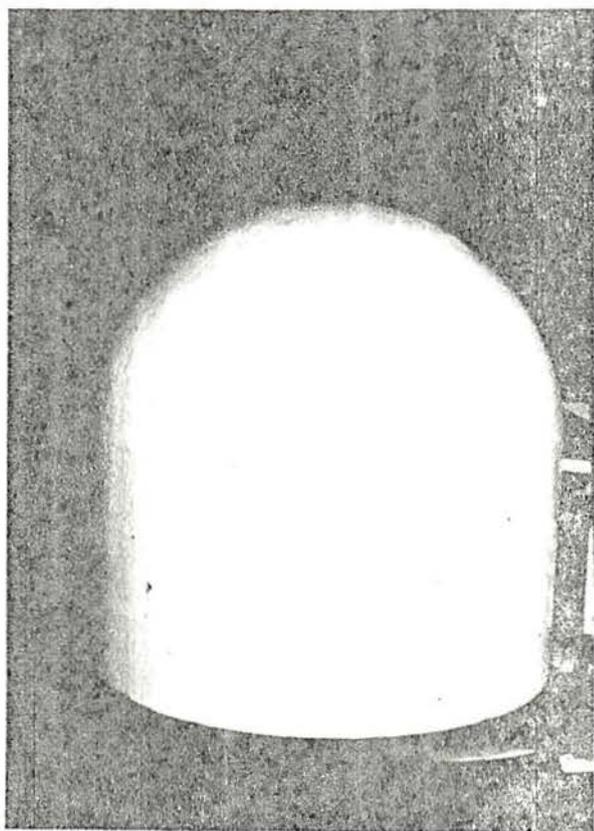
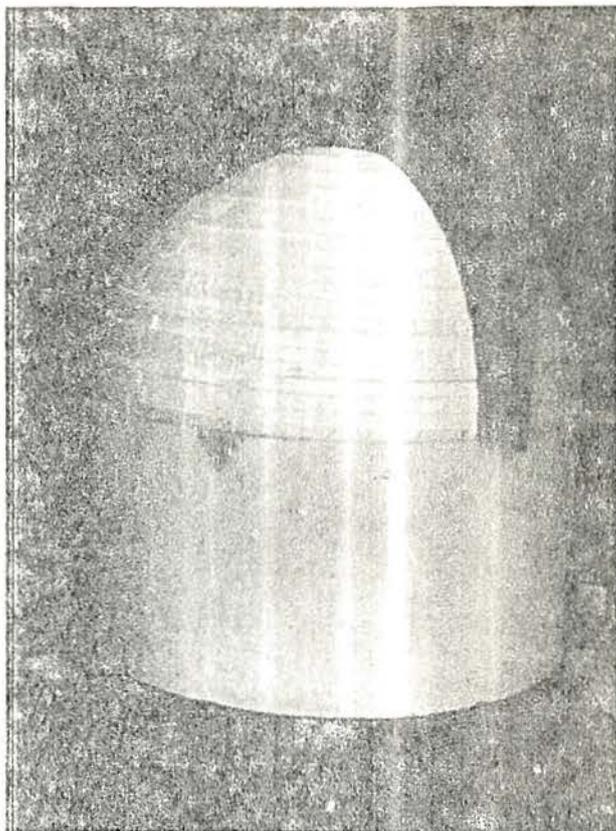


Fig.4.2 - Fôrma interna
revestida

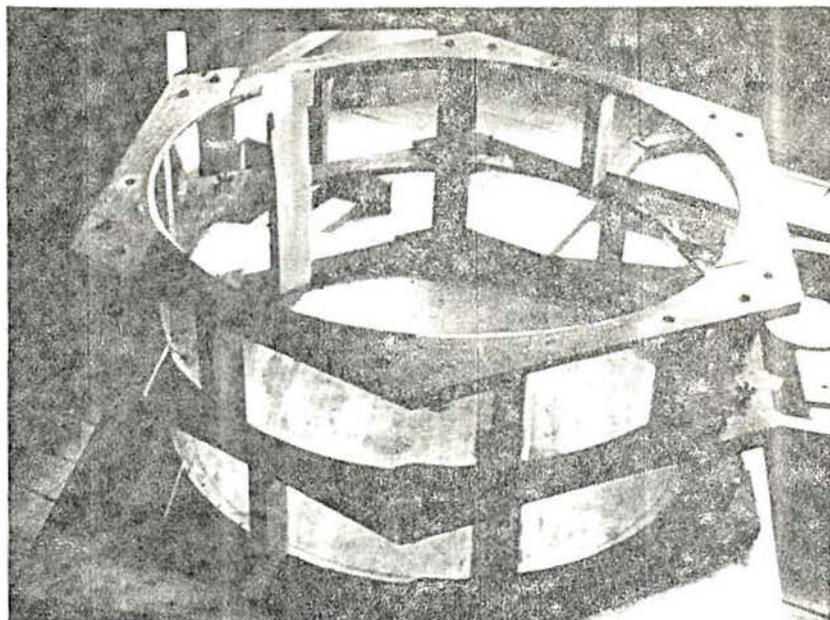


Fig. 4.3a - Fôrma externa inferior, de acrílico

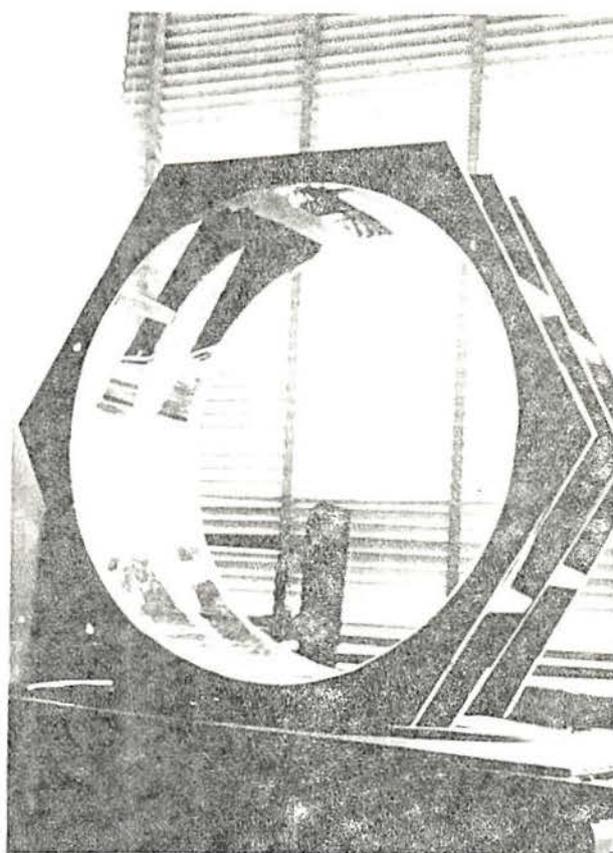


Fig. 4.3b - Fôrma externa inferior, de acrílico

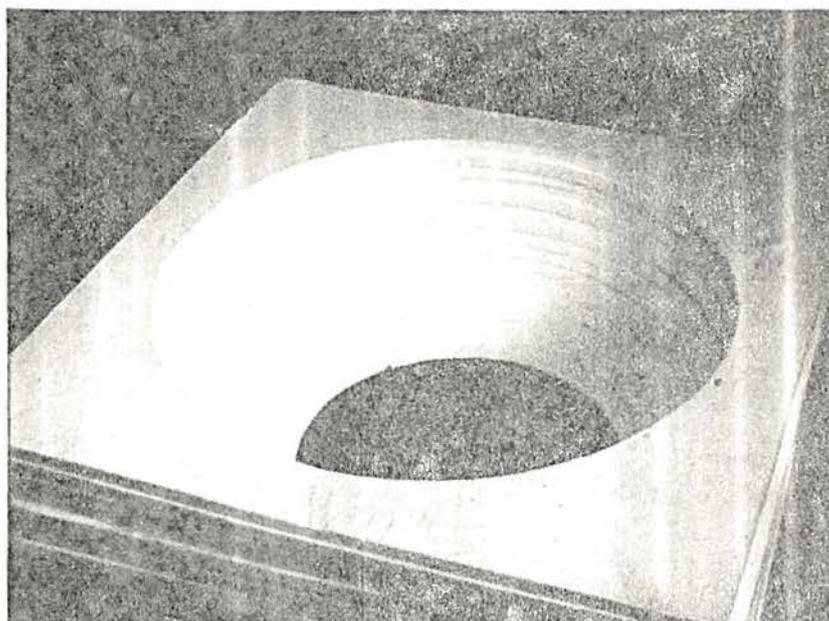


Fig. 4.4 - Chapas de isopor

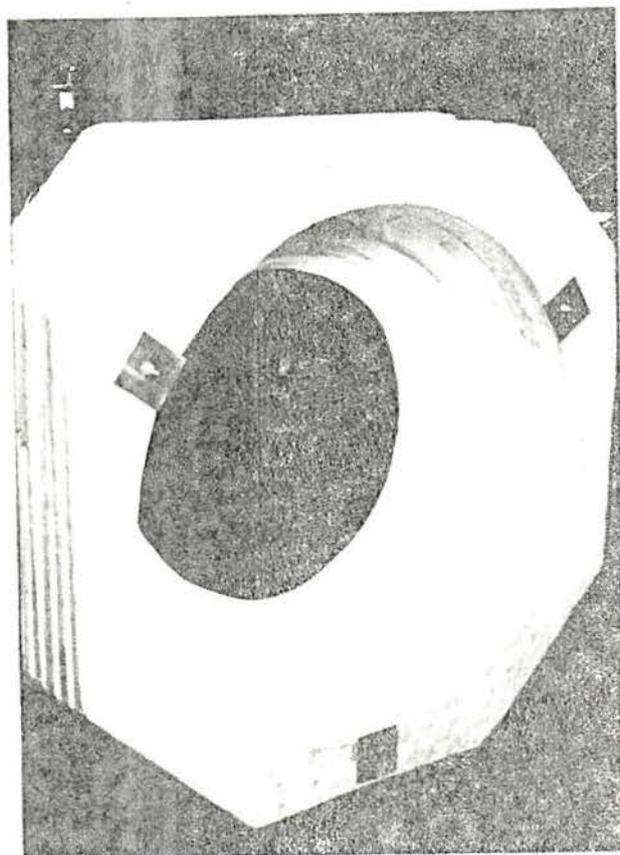


Fig. 4.5 - Fôrma externa superior

interna plastificada, a posição de todos os cabos que compunham a malha de protensão vertical (Fig. 4.6), foram introduzidos e colados a esta fôrma, ao longo das trajetórias de cada cabo, distantes de 5 cm, pequenos pedaços de arame, de aproximadamente 6 cm de comprimento, com os quais se fixavam os cabos em suas posições. As duas extremidades de cada um dos cabos, que circundavam toda a fôrma, eram introduzidas em orifícios feitos na base de madeira (Fig. 4.7a,b).

Estes cabos, assim como os da protensão horizontal, foram recobertos com fita de teflon e enfiados em bainhas de plástico, com a finalidade de diminuir as perdas por atrito, conforme conclusões dos ensaios relacionados no item 5.1.8, bem como a de evitar que o microconcreto a eles aderisse, o que não permitiria que a protensão fosse obtida da maneira idealizada.

4.3 - Concretagem

Foi utilizado um microconcreto classificado como $D = 2,4^1$, composto por: Cimento Portland 320 e areias retidas nas peneiras 0,15, 0,30, 0,60 e 1,20, com a seguinte dosagem:

- consumo de cimento	C	= 457 kg/m ³
- areias retidas nas peneiras	0,15	= 242 kg/m ³
	0,30	= 242 kg/m ³
	0,60	= 242 kg/m ³
	1,20	= 909 kg/m ³
- água		= 228 kg/m ³
- fator água-cimento	a/c	= 0,5

Como o volume total da mistura somava 0,075 m³ ou 174 kg e esta seria feita à mão, este total foi dividido em 12 partes iguais de 0,00625 m³ ou 14,5 kg, quantidade razoável para uma mistura manual.

O processo consistiu em separar 12 partes de cimento de 2,856 kg cada e 12 da mistura de agregados de 10,221 kg cada e então, durante a concretagem, misturar, periodicamente, u ma parte de cimento, uma de agregados e uma de água, de 1,425 l

Fig. 4.6 - Posicionamento dos cabos da protensão vertical

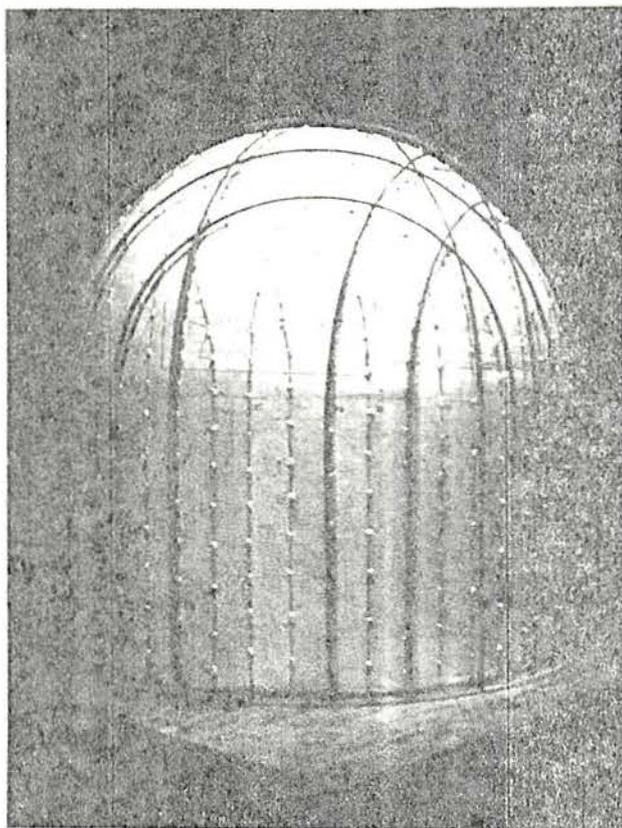
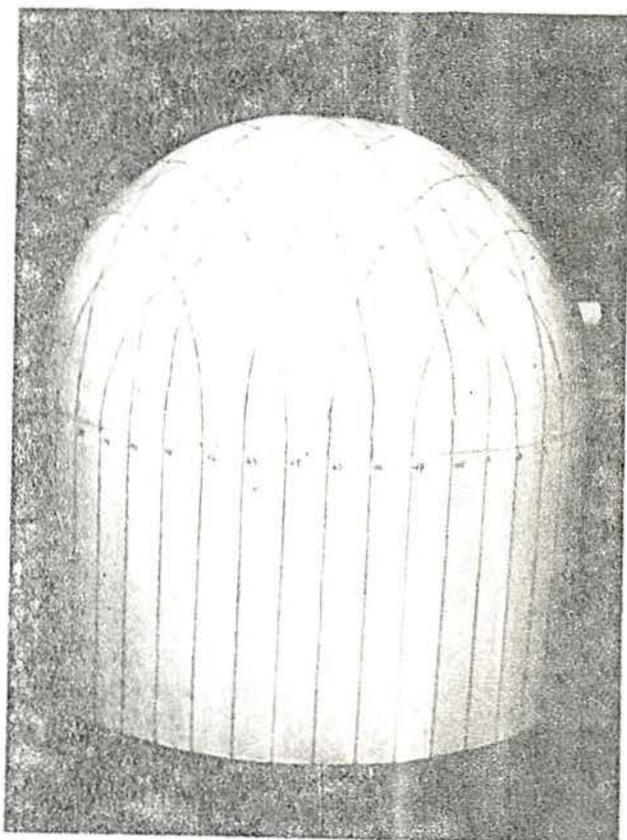


Fig. 4.7a - Cabos da protensão vertical

Fig. 4.7b - Cabos de protensão vertical

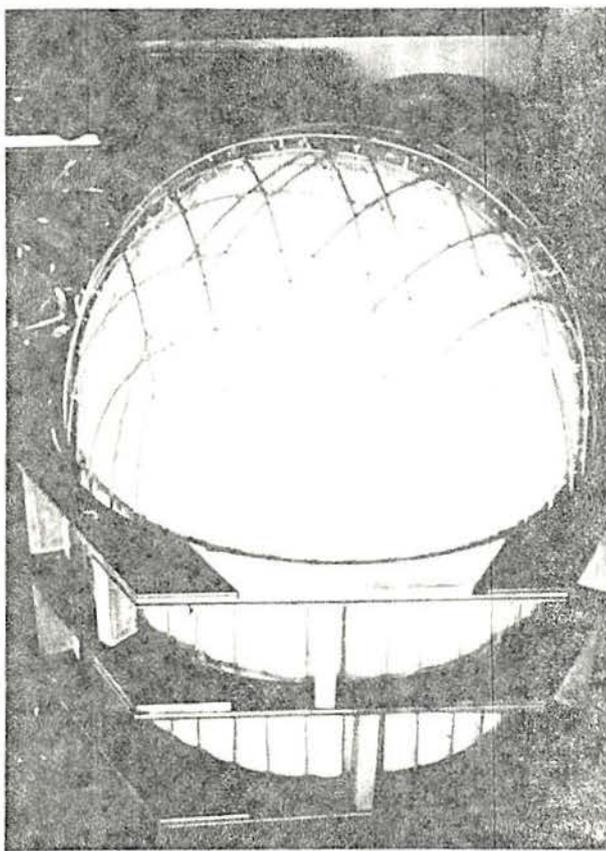
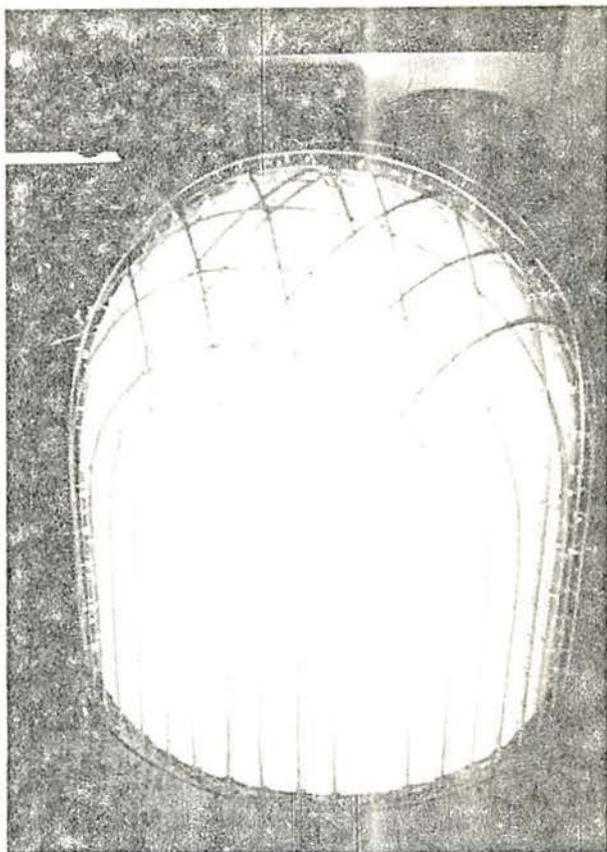


Fig. 4.8 - Fôrma interna, externa e cabos de protensão

que iam sendo processados por um dos participantes, enquanto cinco outros procediam à concretagem propriamente dita.

Colocadas as duas fôrmas, interna e externa inferior, sobre a base de madeira, e já com os cabos de protensão vertical em suas devidas posições, o microconcreto foi sendo lançado por cima da fôrma externa, portanto a 39 cm de altura, onde quatro pessoas o iam apiloando por intermédio de barras de 6 mm de diâmetro, de modo que todo o perímetro da parte cilíndrica obtivesse um adensamento homogêneo.

Concluída a concretagem desta parte, foi colocada a primeira parte da fôrma externa superior e assim, sucessivamente, a segunda e a terceira, enquanto se iam enchendo as fôrmas até o nível de cada parte. Finalmente, a calota superior, sem fôrma externa, foi cheia, homogeneizada e conformada em forma esférica, com o emprego do gabarito já mencionado no item 4.1.

Durante este processo, que durou aproximadamente cinco horas, de todas as doze partes misturadas, procedeu-se à feitura de um total de 30 corpos de prova cilíndricos, de 5,5 cm de diâmetro e 11 cm de altura, compactados do mesmo modo e com as mesmas barras utilizadas para o modelo (Fig. 4.10).

4.4 - Retirada das fôrmas externas

Vinte e quatro horas após o término da concretagem, como o microconcreto já apresentava uma boa consistência, retiraram-se as fôrmas externas superiores, mantendo-se a inferior de acrílico. Durante uma semana, mantiveram-se, tanto o modelo como os corpos de prova, úmidos, molhando-se diariamente sua superfície externa que, nos primeiros dias, absorvia bastante a água que, lhe era fornecida.

Após essa semana, foi, então, retirada a fôrma externa superior, uma vez que a água não era mais absorvida pelo microconcreto.

Como pode ser visto na Fig. 4.11, após serem retiradas as fôrmas externas o modelo apresentou, na parte cilíndri-

Fig. 4.9 - Conjunto completo de fôrmas

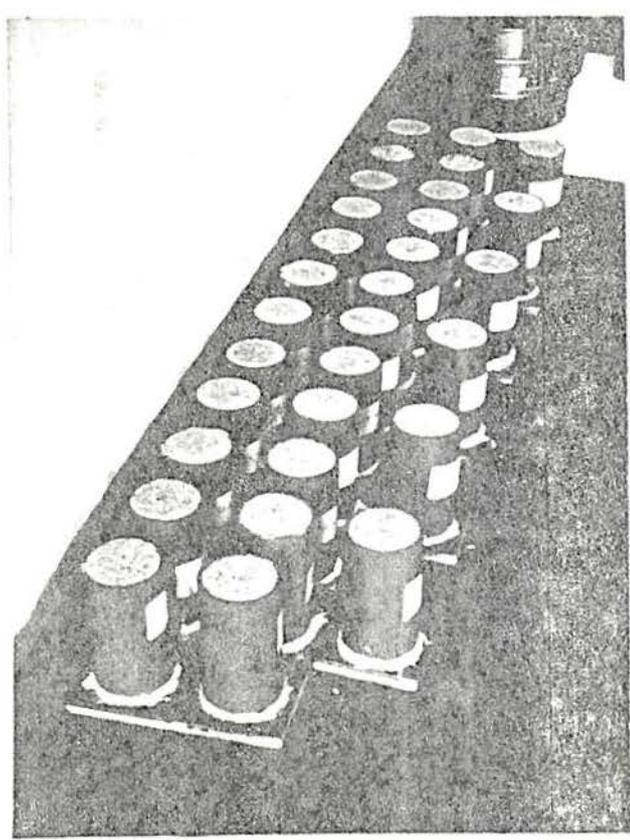
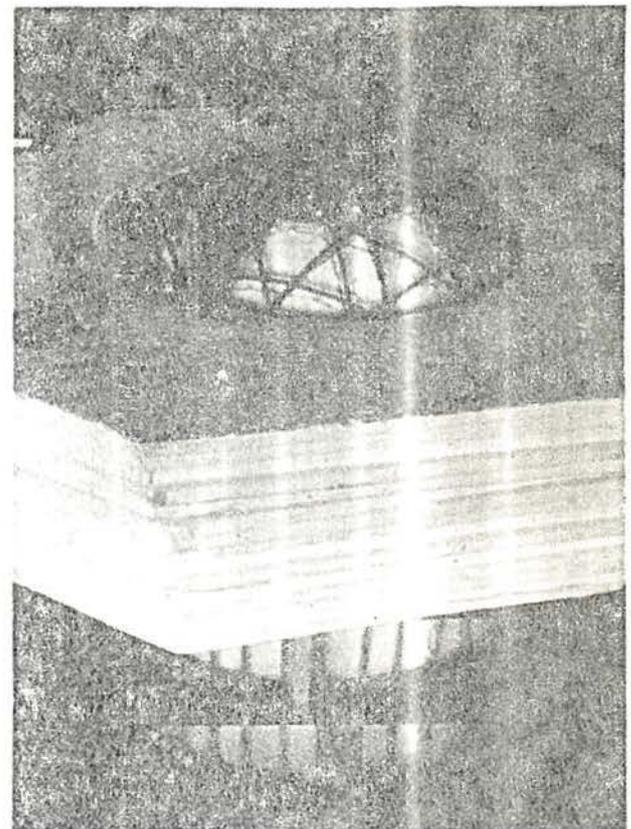


Fig. 4.10 - Corpos de prova

Fig. 4.11 - Modelo sem acabamento externo

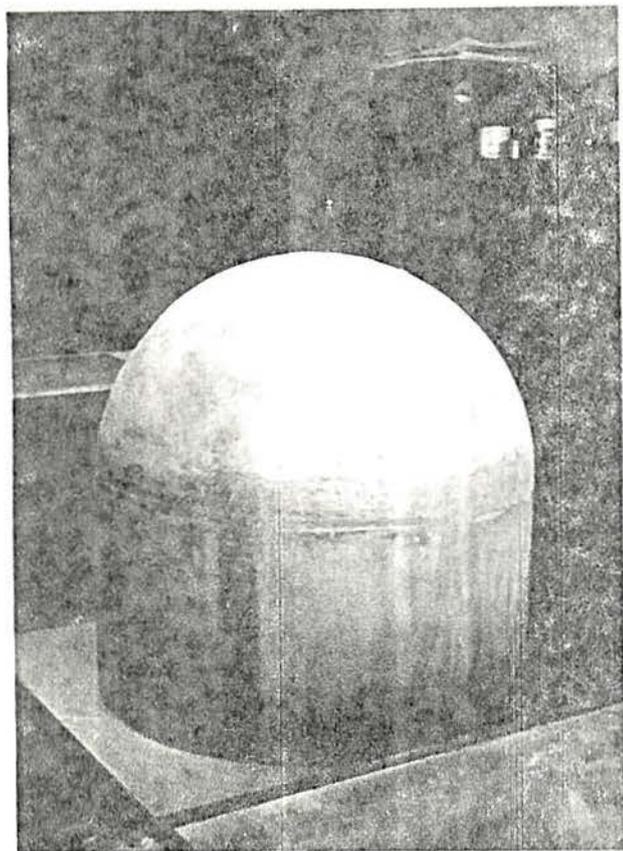
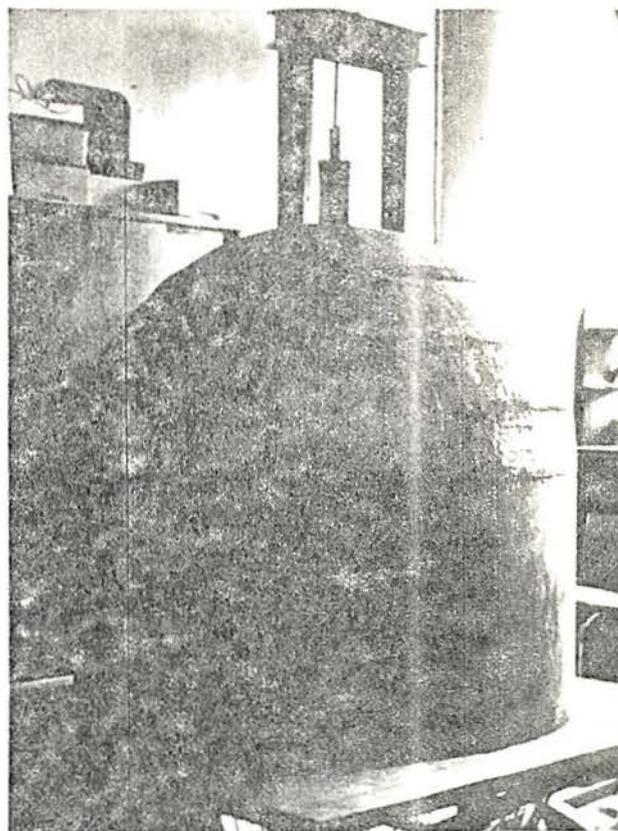


Fig. 4.12 - Modelo com acabamento externo

ca, uma superfície externa perfeitamente lisa e homogênea, devido à impermeabilidade do acrílico, porém na parte esférica isto não ocorreu, pois, apesar de homogênea, a superfície não ficou perfeitamente lisa, apresentando pequenos degraus nas posições intermediárias entre as partes da fôrma externa superior. Isto aconteceu porque, sendo estas fôrmas feitas de isopor, material pouco rígido, umas se deformaram de maneira diferente das outras sob a pressão exercida pelo apiloamento do microconcreto.

4.5 - Acabamento

A parte esférica superior, assim como a cilíndrica, deveriam apresentar um perfeito acabamento, qual seja, a mesma espessura em todos os pontos e uma continuidade de curvatura, ou um raio de curvatura constante.

Para corrigir a imperfeição constituída pelos pequenos degraus na parte esférica, mencionados no item 4.4, utilizaram-se dois processos distintos: onde a espessura restou maior do que a desejada, utilizou-se um esmeril para gastar o microconcreto externamente, e onde esta ficou menor do que a esperada, em cerca de 10% no máximo, fez-se um capeamento da superfície com uma mistura de massa plástica e a mesma areia do microconcreto. Esta mistura depois de estudada e testada, apresentou uma ótima aderência ao microconcreto e tensões de ruptura por tração e compressão bastante semelhantes às deste.

Com isto conseguiu-se que toda a superfície do modelo ficasse consideravelmente lisa e mantendo a espessura e a forma desejadas (Fig. 4.12).

4.6 - Retirada da base e fôrma interna

Depois de completada a cura do microconcreto e de seca a massa de homogeneização, o modelo, com sua fôrma interna e a base de madeira, foi deitado sobre uma mesa e escorado com

latas cheias de areia, para que se pudesse então retirar tanto a base como a fôrma interna de isopor (Fig.4.13).

A retirada da base de madeira foi relativamente simples, apenas sustentando-se o modelo e puxando-se a placa de madeira, que era sustentada pelo atrito com as bainhas das 48 extremidades dos cabos da protensão vertical (Fig.4.14).

Passada esta etapa, procedeu-se à retirada da fôrma interna. Havia, nesta ocasião, a intenção de retirar-se esta fôrma sem destruí-la, para que ela pudesse servir para a confecção de outros modelos iguais, porém havia um grande atrito entre a fôrma e o modelo, pois, além da compressão que o modelo tenha exercido sobre ela, durante sua cura, os quase 800 arames que sustentavam os cabos, fincados na fôrma, tornaram impossível retirá-la dessa maneira e teve-se, então, de escavar o isopor, destruindo-se totalmente a fôrma (Fig.4.15).

A seguir, foi necessário cortar as pontas de todos os arames que ficaram presos à superfície interna do modelo, de modo a deixá-la perfeitamente lisa, para que não houvesse o perigo de ferir a câmara de borracha que viria a dar pressão interna e também para que não causassem problemas com a colagem dos strain gages internos (Fig.4.16).

Apesar de ter sido em isopor, a forma interna não produziu, nas paredes do modelo, nenhuma irregularidade, deixando esta perfeitamente lisa e sem a necessidade de acabamentos finais.

4.7 - Colagem dos strain gages internos

Internamente, foram aplicados 21 extensômetros elétricos (strain gages), cujas posições podem ser vistas no item 4.11.

Estes strain gages, feitos em uma base de papel bastante fina, não poderiam ser colados diretamente sobre o micro concreto, por duas características próprias deste material:

- pela sua rugosidade, que poderia vir a prejudicar

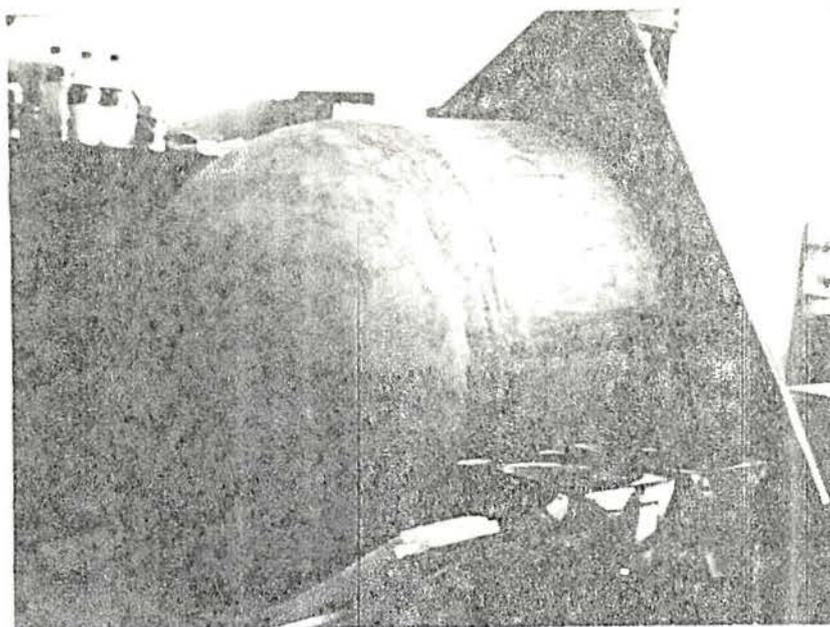


Fig. 4.13 - Modelo em execução

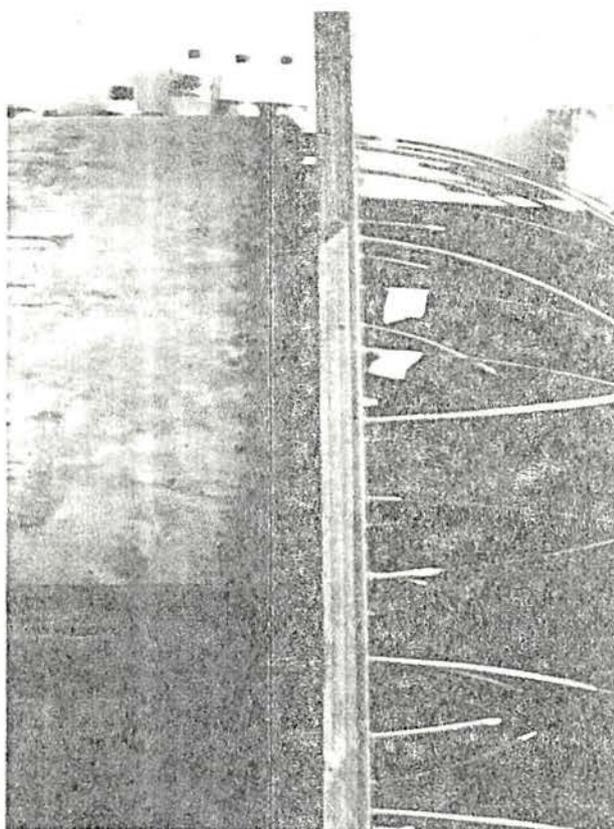


Fig. 4.14 - Retirada da base

Fig 4.15 - Retirada da
fôrma inter_
na

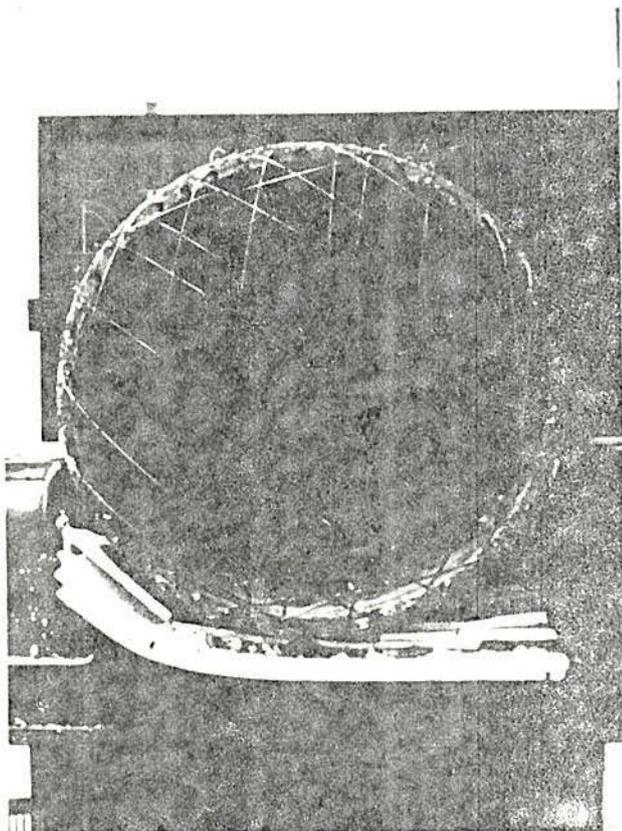
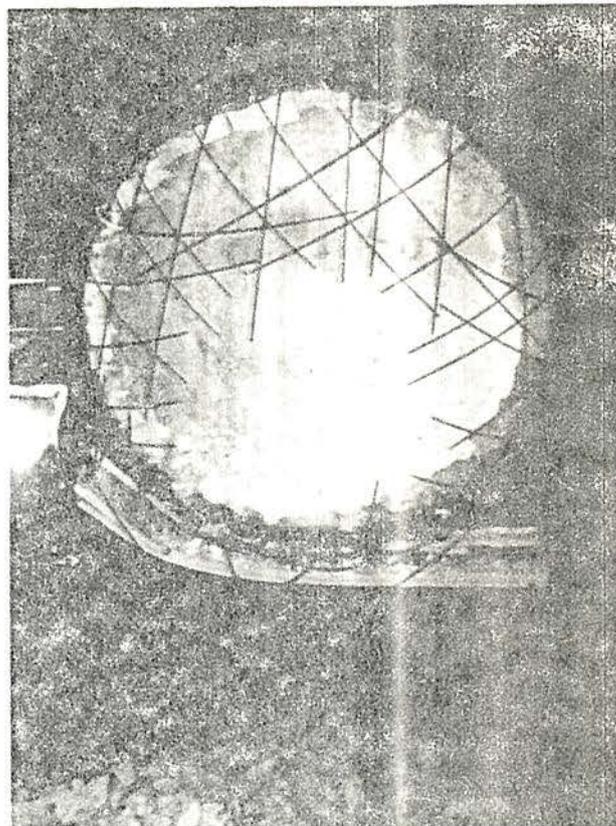


Fig. 4.16 - Modelo sem
fôrma inter_
na

não sã a colagem, como também o funcionamento destes sensores;

- pela sua umidade, que atingindo o strain gage, poderia, também, afetar seu funcionamento.

Aplicou-se, então, sobre o microconcreto e em cada ponto onde seriam colados os strain gages, uma fina camada de Araldite SW-417, de, aproximadamente, 1 mm de espessura que, aplicada com um pincel e depois de lixada, apresentou uma superfície extremamente lisa, sobre a qual os strain gages foram colados sem nenhum problema.

A colagem destes strain gages foi feita na maneira usual, encontrada na literatura^{15,18}:

- limpando-se a superfície;
- colocando-os, com o auxílio de uma fita adesiva;
- passando na superfície uma ligeira camada de cola LOCTITE (CIANOACRILATO IS-04E);
- pressionando-se o strain gage sobre a cola, o tempo necessário para sua polimerização;
- retirando-se a fita adesiva.

Após sua colagem, os strain gages eram testados, quanto a sua resistência elétrica e também quanto à colagem em si e, então, tinham seus terminais soldados a pares de fios, tipo 22 AWG que, coloridos e numerados de acordo com a posição do strain gage, eram colados com fita adesiva à parede interna do modelo, saindo, então, pela sua base e prolongando-se até aos aparelhos de leitura, onde seriam posteriormente ligados (Fig. 4.17).

Como medida de proteção aos strain gages, por ações externas ou por possível vazamento d'água, uma vez que a câmara de pressão interna atuaria diretamente sobre eles, estes foram cobertos por uma grossa camada de borracha de silicone (DOW CORNING) que, com consistência pastosa é de fácil aplicação e, rapidamente endurecendo, logo promove uma boa proteção aos strain gages (Fig.4.18).

Fig. 4.17 - "Strain gages
internos

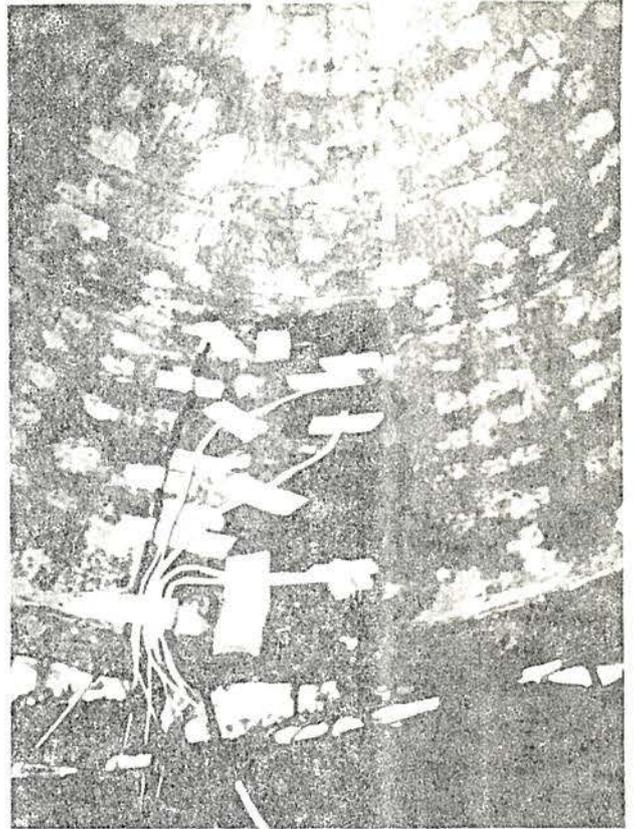


Fig. 4.18 - "Strain gages"
com revestimen
to de silicone

4.8 - Transporte do modelo à mesa de ensaios

O modelo, com sua parte interna totalmente pronta, e já colocada em seu interior a câmara de borracha que proporcionaria a pressão interna, Fig. 4.19, necessitava ser transportado até a mesa de ensaios e colocado sobre uma chapa de aço que o sustentaria durante as experiências.

Apresentando o modelo 160 kg de peso e uma forma bastante incômoda para ser segurado, mais a impossibilidade de ser apoiado sobre sua borda, tornou-se necessário, então, a confecção de um sistema, como uma gaiola, em torno do mesmo, feita de perfis metálicos, com o qual foi possível transportá-lo à mesa, seguindo os seguintes passos:

- transportou-se-o de sua posição inicial à mesa de ensaio, colocando-se-o sobre dois apoios, a cerca de 30 cm acima da chapa de aço (Fig. 4.20);

- nesta posição foram enfiados, em orifícios já feitos na chapa de apoio (Fig.4.25), todas as 48 extremidades dos cabos da protensão vertical e também os 42 fios que se ligavam aos strain gages internos;

- retirando-se os dois apoios, fez-se com que baixasse até encostar em cunhas de madeira, de aproximadamente 5 cm de altura, colocadas entre ele e a chapa de aço;

- desmontou-se, então, o sistema metálico usado para seu transporte e, lentamente, retiraram-se as cunhas, fazendo com que ele se apoiasse integralmente sobre a chapa de aço, de onde não mais foi retirado (Fig.4.21).

4.9 - Colocação de strain gages e cabos de protensão externos

Com o modelo já em sua posição definitiva, foram colados externamente 55 strain gages nas posições definidas pelo item 4.11 e seguindo o mesmo processo utilizado com os internos, como foi descrito no item 4.7.

Os cabos externos, que proporcionariam a protensão horizontal do modelo, foram colocados após a montagem do pórtico

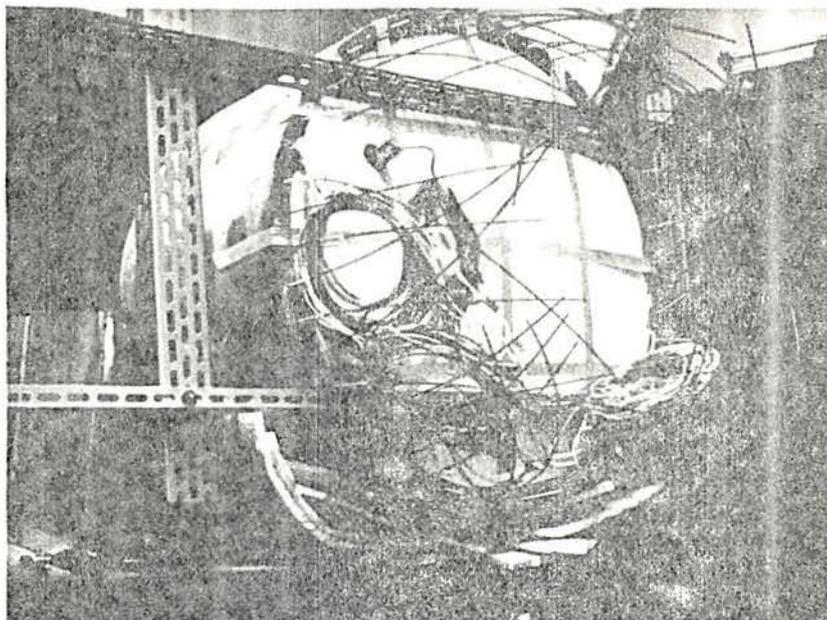


Fig. 4.19 - Modelo com a Câmara de pressão interna

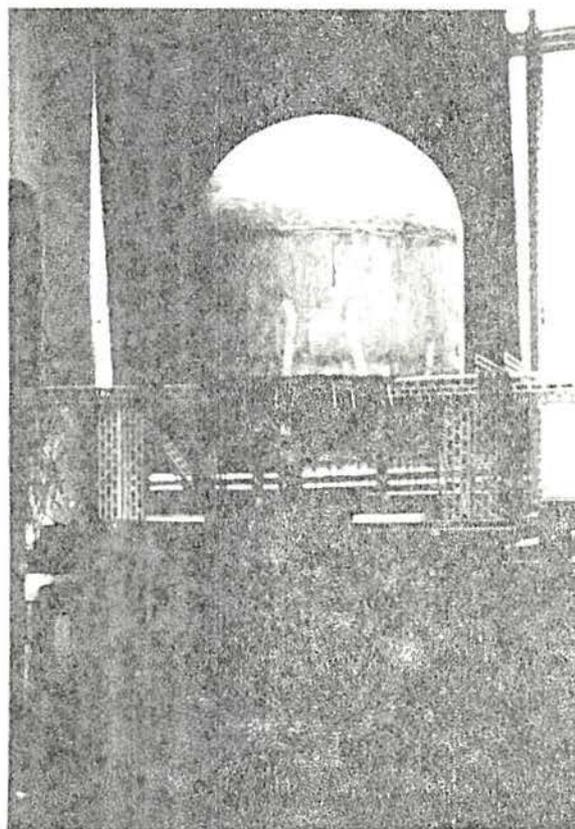


Fig. 4.20 - Modelo sobre a mesa de ensaios

Fig. 4.21 - Modelo colocado
à mesa
de ensaios

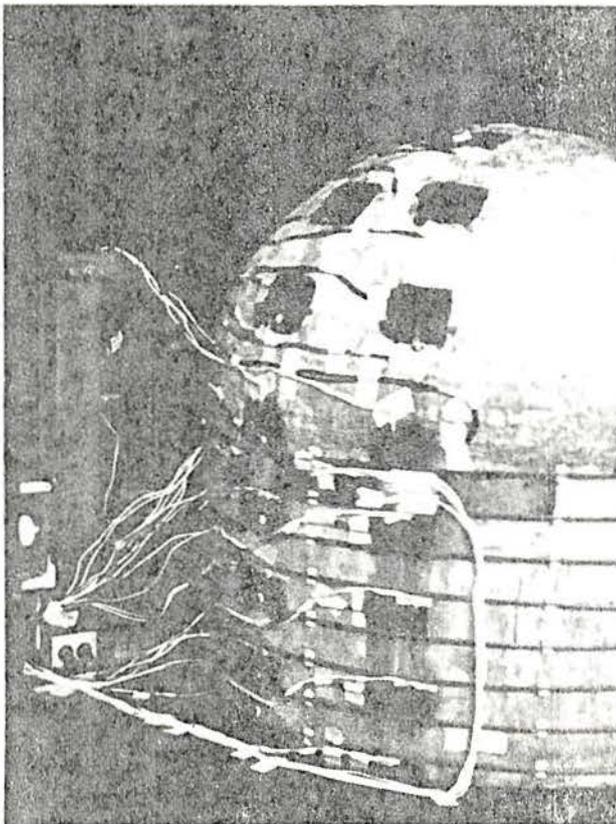


Fig. 4.22a - "Strain gages"
externos

da protensão horizontal descrito no item 4.10.6. Desenvolvendo-se ao redor do modelo, estes cabos, em número de 8, ancoravam-se em duas barras verticais do pórtico de protensão e eram mantidos em suas posições, ao redor da superfície cilíndrica, por meio de pequenos pedaços de plástico, colados à parte externa desta superfície, como pode ser observado na Fig. 4.22a,b.

4.10 - Sistema de carga

4.10.1 - Cabos de protensão

Foi escolhido como material para os cabos de protensão, tanto verticais como horizontais, o arame de AÇO CORDA DE PIANO, com um diâmetro de 2,8 mm, cujas características estão relacionadas no item 5.1.1.

Sendo este um arame de aço de alta resistência, justamente o que se necessitava para a utilização como cabo de protensão, foram inicialmente analisados três grupos de amostras distintas para a escolha do diâmetro a ser utilizado. Ensaia-ram-se amostras dos tipos 1, 2 e 3, conforme mostra o quadro 4.1, todas do mesmo material, apenas com diferentes diâmetros.

Tipo	ϕ (mm)	A (mm ²)	Carga média de rup.	Tensão média de rup.
1	1,40	1,54	338,5 kg	219,81 kg/mm ²
2	2,80	6,16	1211,5 kg	196,67 kg/mm ²
3	3,50	9,62	1825,0 kg	189,71 kg/mm ²

Quadro 4.1 - Amostras do arame de aço corda de piano

Dos resultados obtidos, concluiu-se que:

- o arame do tipo 1 não seria aconselhável, pois sua carga de ruptura é muito baixa e, possivelmente, estes cabos seriam utilizados com cargas de até 400 kg;

- que o arame de tipo 3, apesar de apresentar uma boa resistência à tração, devido a seu diâmetro de 3,5 mm, apresen

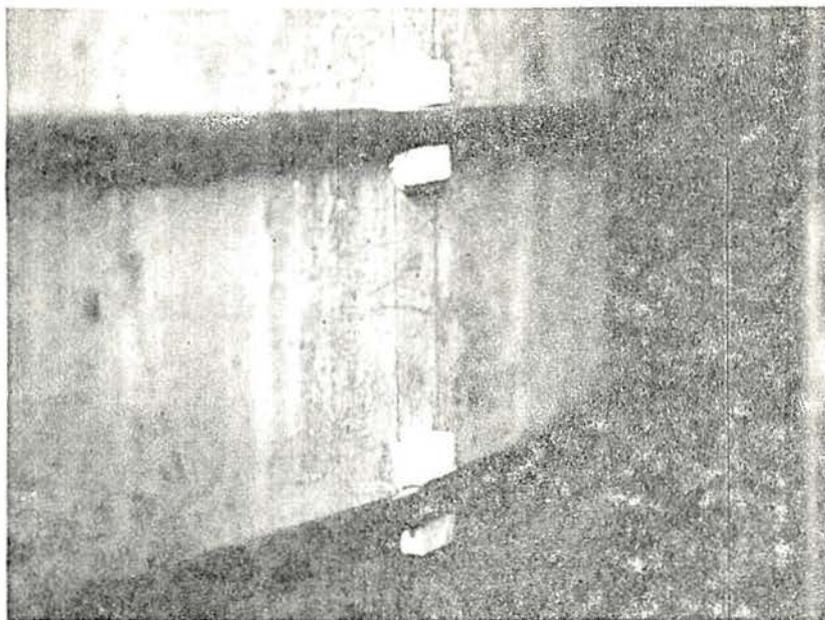


Fig. 4.22b - Cabos da protensão horizontal

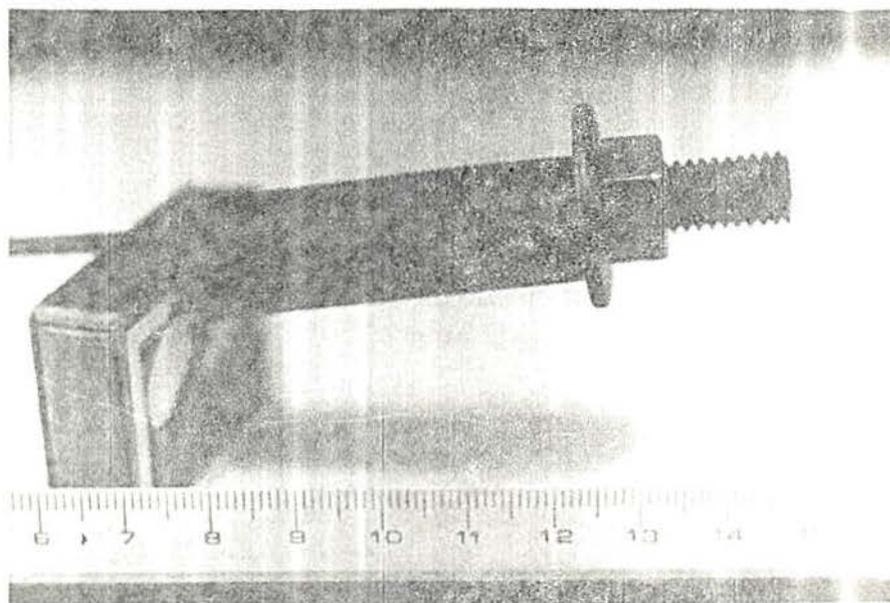


Fig. 4.23 - Ancoragem completa

taria uma grande rigidez à flexão, o que dificultaria bastante sua fixação à fôrma interna.

Optou-se, então, pelo arame do tipo 2 que, apresentando uma melhor trabalhabilidade, possui uma carga de ruptura à tração de, aproximadamente, três vezes a necessária, o que proporcionaria um bom coeficiente de segurança.

4.10.2 - Ancoragens

Os cabos de protensão, devido ao tipo de protensão idealizada, deveriam ser ancorados não no microconcreto, mas sim no próprio sistema de protensão, o que levou, então, a ser estudado um tipo de ancoragem que tivesse as seguintes características:

- a) execução simples e baixo custo;
- b) passíveis de serem colocadas depois de os cabos estarem em suas posições definitivas;
- c) passíveis de serem retiradas, se necessário, e re colocadas sem nenhum problema e com relativa facilidade;
- d) capazes de proporcionar uma ancoragem garantida e suportar uma carga próxima à de ruptura dos cabos;
- e) passíveis de um ajuste de comprimento, ou da tensão inicial, em todos os cabos.

Inicialmente, foi tentado um tipo de ancoragem colando-se as extremidades dos cabos em pequenos cilindros de aço, vazados, porém, isto não atendeu às exigências dos itens c, d, e; posteriormente, tentou-se encunhar as extremidades dos cabos nesses cilindros, simulando, a grosso modo, os cones de protensão, mas, apesar de resistirem a uma carga um pouco mais elevada, ainda não atendeu aos itens c,d,e.

Finalmente, tentou-se um tipo de ancoragem distinto, rosqueando-se as extremidades dos cabos e nelas enroscando-se um tubo cilíndrico, com rosca interna e externa, como pode ser visto na Fig. 4.23.

Foram feitos, então, vários exemplares destas ancoragens que, testados à tração simples, como iriam realmente funcionar na protensão do modelo, apresentaram ótimos resultados,

pois nestes testes os cabos romperam sem que as ancoragens na da sofressem. A ruptura destes cabos deu-se exatamente na rosca feita em suas extremidades e fora da ancoragem (item 5.1.2). Os resultados destes mesmos testes mostraram que esta rosca reduziu em cerca de 6% a carga de ruptura dos cabos, o que, no entanto, não poderia causar nenhum problema, já que havia um coeficiente de segurança da ordem de 3.

Estas ancoragens atenderam a todas as exigências mencionadas anteriormente e foram então utilizadas para todos os cabos, nas duas protensões, horizontal e vertical.

A Fig. 4.24 mostra todas as peças que compõem a ancoragem completa, a saber:

- uma barra roscada interna e externamente, de 5 cm de comprimento (ancoragem propriamente dita);
- um tubo cilíndrico de comprimento variável;
- uma arruela;
- uma porca de ajuste.

Como foi visto no Cap. 2, a malha de cabos que produz a protensão vertical é composta de 24 cabos, dos quais apenas 4 são distintos e repetem-se por 6 vezes, formando o conjunto completo.

Estes quatro tipos de cabos, que se desenvolvem na superfície média da casca, formam, na parte esférica, semicirculos de diferentes raios, o que lhes dá comprimentos totais diferentes.

Sendo a protensão vertical promovida por um igual alongamento de todos os cabos, conforme Cap. 2, e tendo estes mesmos cabos diferentes comprimentos, isto acarretaria diferentes tensões, tensões estas proporcionais a seus comprimentos. Não sendo este o resultado desejado, mas sim o de que todos os cabos apresentassem a mesma tensão, foi necessário aumentar os comprimentos dos cabos menores, fazendo com que todos ficassem igualmente tensos.

Este aumento foi, então, conseguido, colocando-se nas extremidades dos cabos, junto às ancoragens, tubos de prolonga

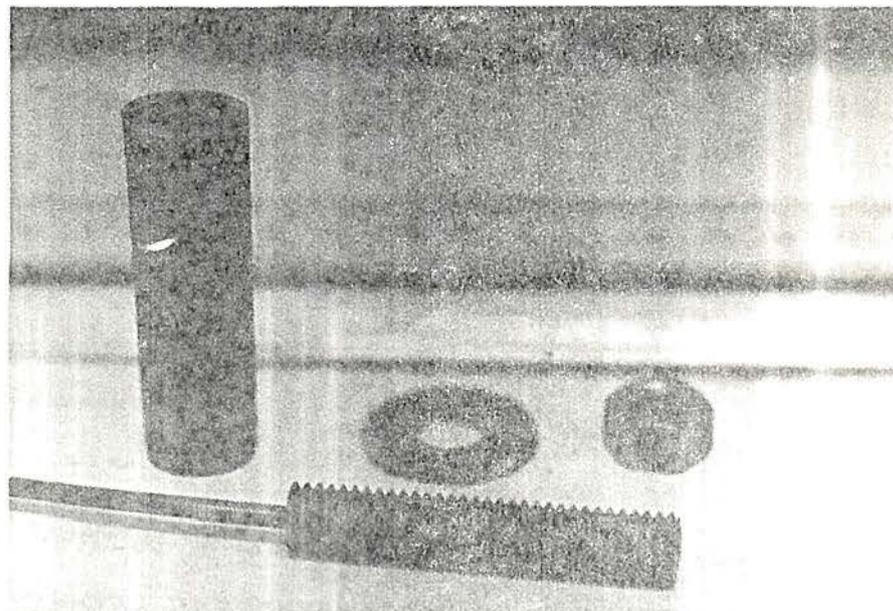


Fig. 4.24 - Componentes da ancoragem:
- barra roscada
- tubo de prolongamento
- arruela
- porca de ajuste

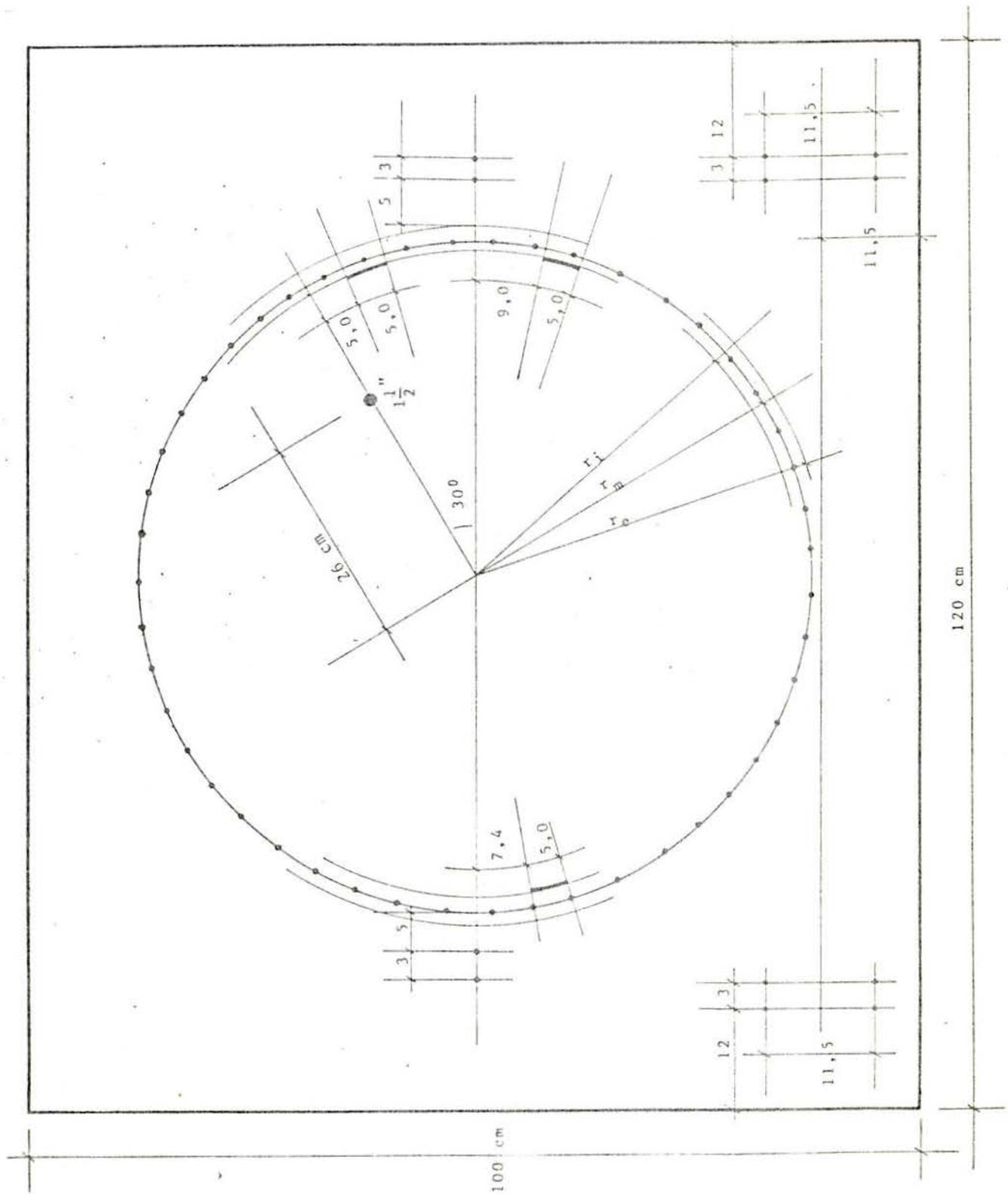


Fig. 4.25 - Posicionamento dos furos da chapa de apoio do modelo

mento, de comprimentos diferentes, de acordo com o tipo de cabo:

Quadro 4.2
Determinação do comprimento dos
prolongamentos dos cabos

CABOS TIPO ¹	raio ²	l _r ³	Diferença ⁴ entre comp.	δ para ⁵ F=100 kg	F para ⁶ δ_{\max}	comp.do pro longamento ⁷
1 nºs 1,6,10	38,92	122,27	-	0,1549	100,00	5,000
2 nºs 2,9,5	36,93	116,02	6,250	0,1500	103,24	8,125
3 nºs 4,8	32,43	101,88	20,390	0,1391	111,35	15,195
4 nºs 3,7	25,71	80,77	41,500	0,1228	126,16	25,750

No quadro 4.2 pode-se observar (colunas 6) que, se dêssemos em todos os cabos um alongamento igual ao necessário para produzir uma carga de 100 kg no cabo de maior comprimento, (coluna 3), isto produziria no cabo mais curto uma carga de 126,16 kg (26% maior), o que demonstra a necessidade dos prolongamentos mencionados. Na coluna 7 lê-se, então, os comprimentos necessários destes prolongamentos, todos acrescidos de 5 cm, para que todos os cabos tenham o mesmo sistema de tubo-ancoragem, uma vez que este tubo tem, também, a finalidade de permitir que a ancoragem, passando por seu interior, aceite, através de porca externa, um ajuste inicial do comprimento e da tensão nos referidos cabos.

4.10.3 - Mesa e chapa de apoio do modelo

Como mostram as Figs. 4.20 e 4.21, o modelo foi colocado sobre uma chapa de aço reforçada, de dimensões 120x100x1,5cm, a qual repousa sobre uma mesa, feita com perfis metálicos, de 1,20 m de altura.

Essa chapa de aço contém em sua face inferior perfis metálicos soldados, como um reforço, com a mesma forma da peça onde se ancoram os cabos de protensão vertical, que será descrita no item seguinte e que pode ser vista na Fig. 4.26.a e b. Estes perfis servem não só de reforço para a chapa como, também, de apoio para a carga de protensão através das barras de sus-

Fig. 4.26a - peça de ancoragem dos cabos verticais

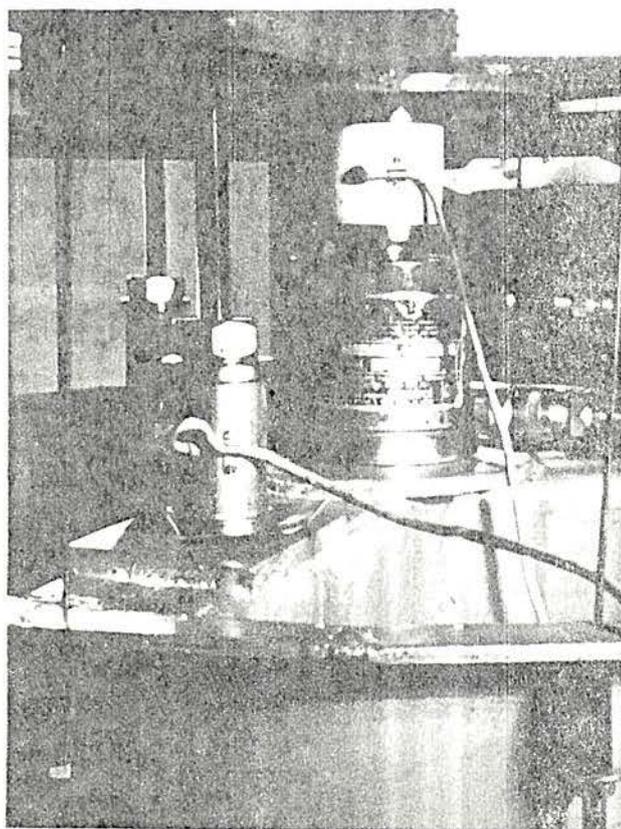
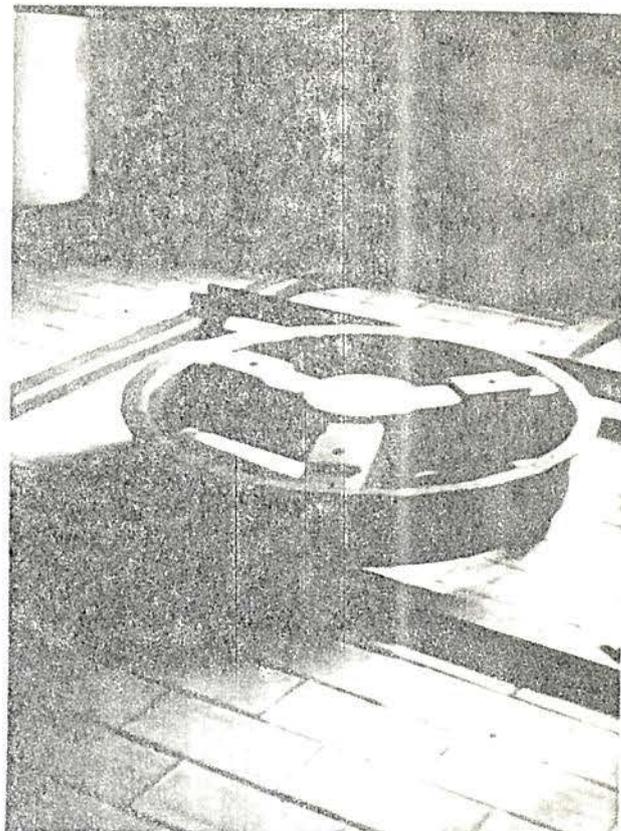


Fig. 4.26b - Sistema de pro_tensão vertical

tentação, como será visto nos itens seguintes.

A Fig. 4.25 mostra um esquema do posicionamento dos furos feitos nesta chapa de aço, os quais têm a finalidade de permitir a passagem dos cabos de protensão, dos fios ligados aos strain gages, da entrada do sistema de pressão interna e, tam**ê**m, para a fixação do pórtico da protensão horizontal e do suporte de fixação dos deflectômetros.

4.10.4 - Peça de ancoragem dos cabos verticais

Os cabos de protensão vertical, como já foi visto em itens anteriores, saem da borda inferior da parte cilíndrica do modelo, passando através de orifícios feitos na chapa de sustentação e deixando um certo comprimento livre para serem ancorados em uma peça circular de aço, posicionada logo abaixo da chapa de sustentação, que tem seu centro no eixo de simetria vertical do modelo.

Esta peça, feita com perfis de aço não convencionais, obtidos pela dobragem de chapas de 1/4", soldadas e furadas, pode ser vista nas Figs. 4.26a,b. Também um esquema de sua forma, dimensões e posicionamento dos furos, pode ser encontrado na Fig. 4.27a.

Esta peça de ancoragem é composta por três partes fundamentais:

1) um contorno circular, feito pela união em suas extremidades de três perfis em forma de cantoneiras de duas abas, curvadas e soldadas, nas quais encontram-se os furos por onde passam e são ancorados os cabos verticais.

2) três raios, dispostos um a cada 120° , feitos também com os mesmos perfis metálicos, porém em forma de um U invertido, da mesma forma daqueles que reforçam a chapa de apoio do modelo, soldados no contorno circular e entre si, no meio do círculo; sobre os quais encontram-se soldadas chapas de reforço que recebem diretamente a carga de protensão, através das células de carga.

3) a parte central, onde se encontram os três raios já mencionados, superpostos por uma chapa circular de 3/8", onde é colocado o macaco hidráulico para a aplicação da carga to

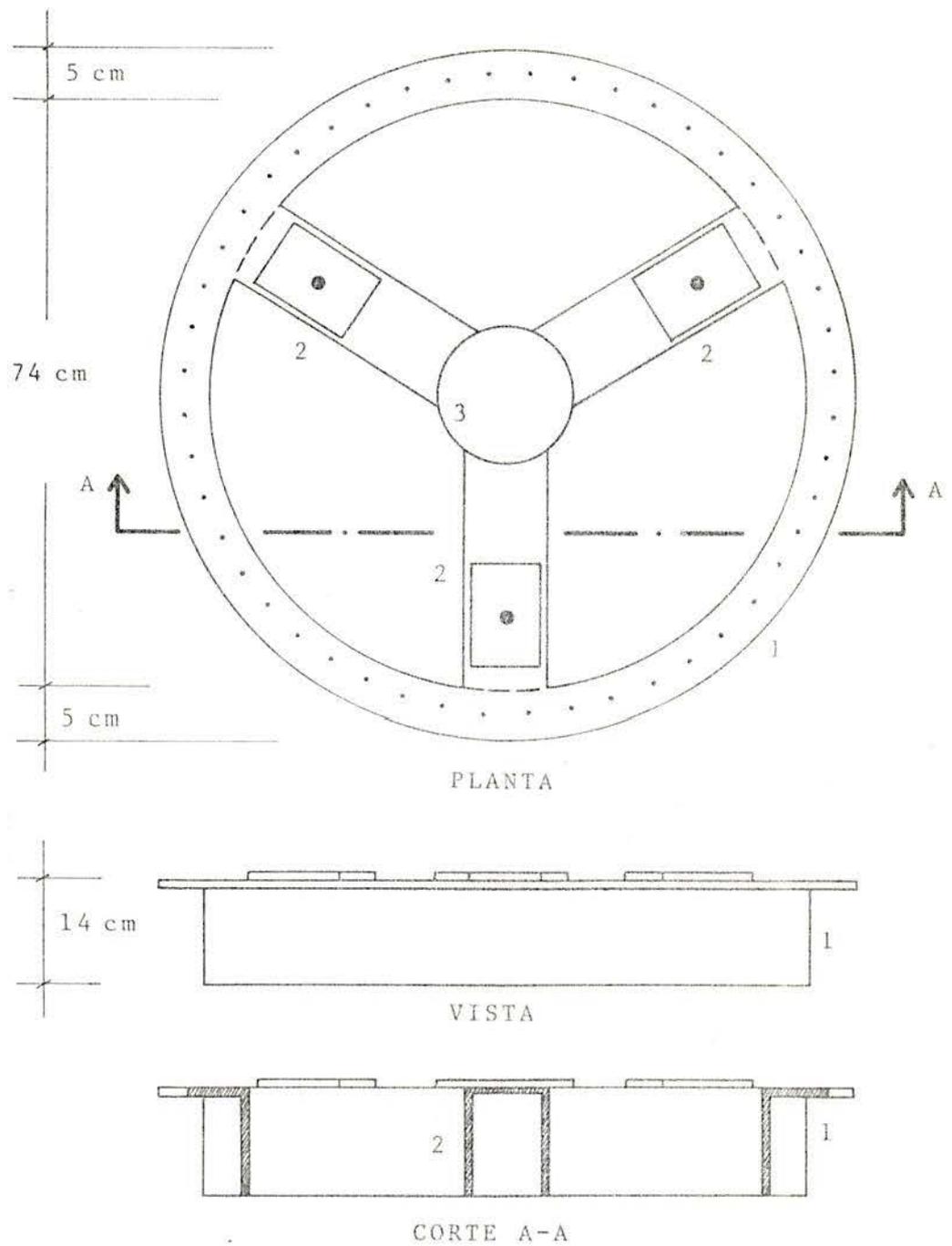


Fig. 4.27a - Peça de ancoragem dos cabos de protenção vertical

tal de protensão vertical.

4.10.5 - Barras de sustentação

Interligando a peça de reforço da chapa de sustentação do modelo e a peça onde se ancoram os cabos verticais, encontram-se as três barras de sustentação que, com 5/8" de diâmetro e roscadas, transmitem, por intermédio de porcas, a carga de protensão para as três células de carga já mencionadas anteriormente.

Como se pode observar nas Figs. 4.27b,c, estas três barras trabalham à compressão e recebem, cada uma, um terço da carga total de protensão, promovendo, assim, uma igual distribuição desta carga ao longo de todos os cabos.

4.10.6 - Pórtico de protensão horizontal

A protensão horizontal, como explica o Cap. 2, é promovida através de um pórtico de reação, fixado à chapa de sustentação do modelo.

Este pórtico, também em aço, que pode ser visto nas Figs. 4.28a,b,c, está colocado em um plano tangente à superfície externa da parte cilíndrica do modelo e é composto por cinco partes principais:

1 - duas peças laterais, dispostas verticalmente, cada uma composta por duas barras chatas de 1,5 x 70 x 59 cm, colocadas paralelamente, ligadas à parte superior e à chapa de sustentação, nas quais é soldada uma peça em forma de um A deitado, onde são colocados o macaco hidráulico e uma célula de carga e por onde passa uma barra roscada que traciona os cabos horizontais;

2 - a parte superior horizontal, constituída simplesmente por um perfil metálico em forma de U invertido, com um metro de comprimento;

3 - duas partes móveis, verticais, cada uma composta por um perfil em forma de U, tendo em suas extremidades uma pequena chapa com quatro roletes, como um carrinho, que permite que estas peças se transladem, quando puxadas pelas barras roscadas, tracionando, então, os oito cabos horizontais que nelas se ancoram.

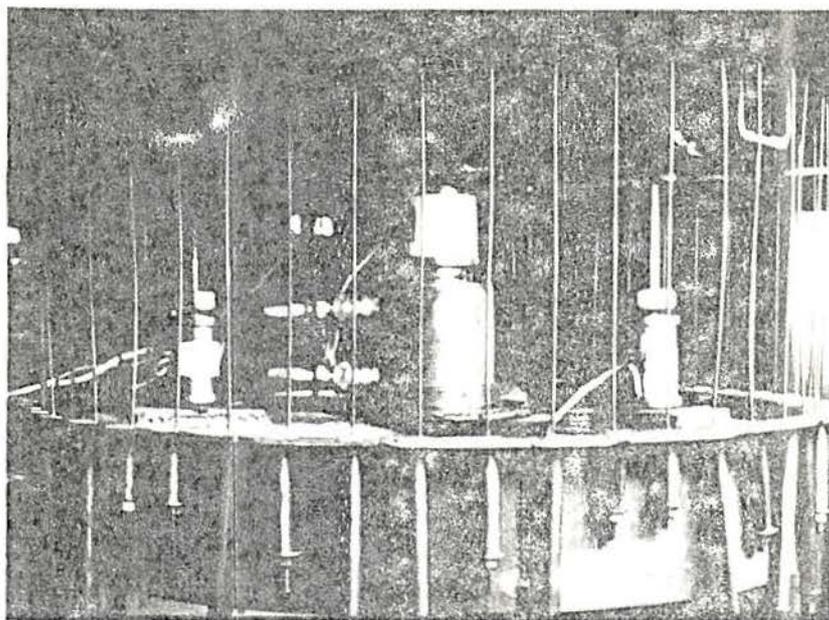


Fig. 4.27b - Sistema de protensão vertical

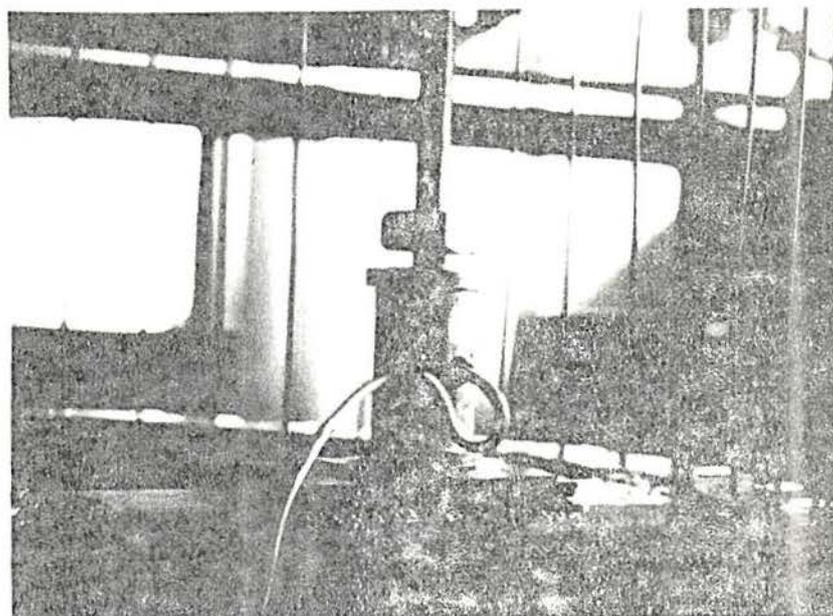


Fig. 4.27c - Célula de carga e barra de sustentação

Fig. 4.28a - Pórtico da
protensão
horizontal

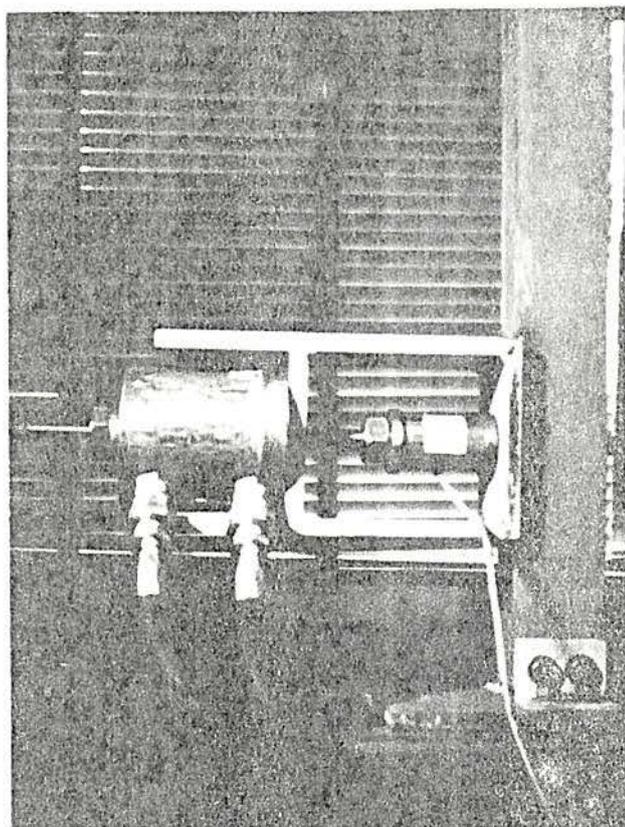
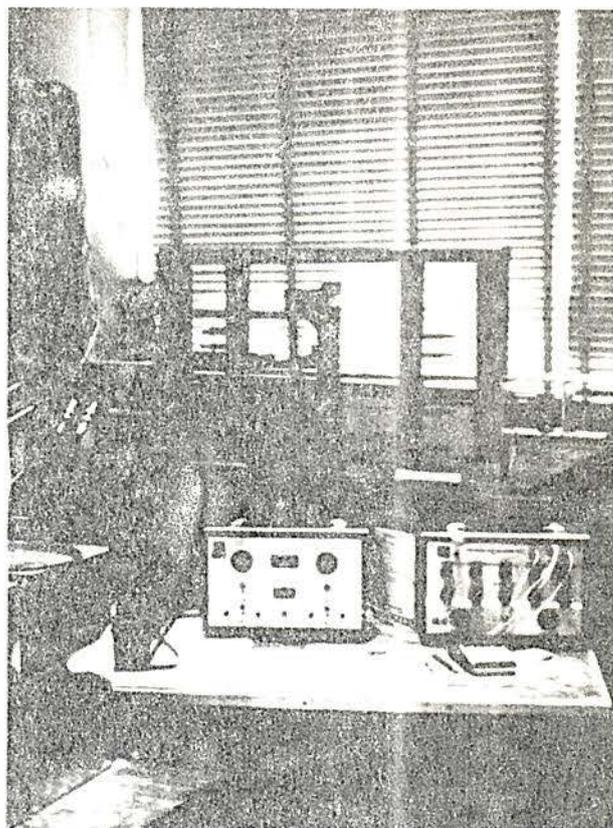


Fig. 4.28b - Sistema de tra-
ção dos cabos
horizontais

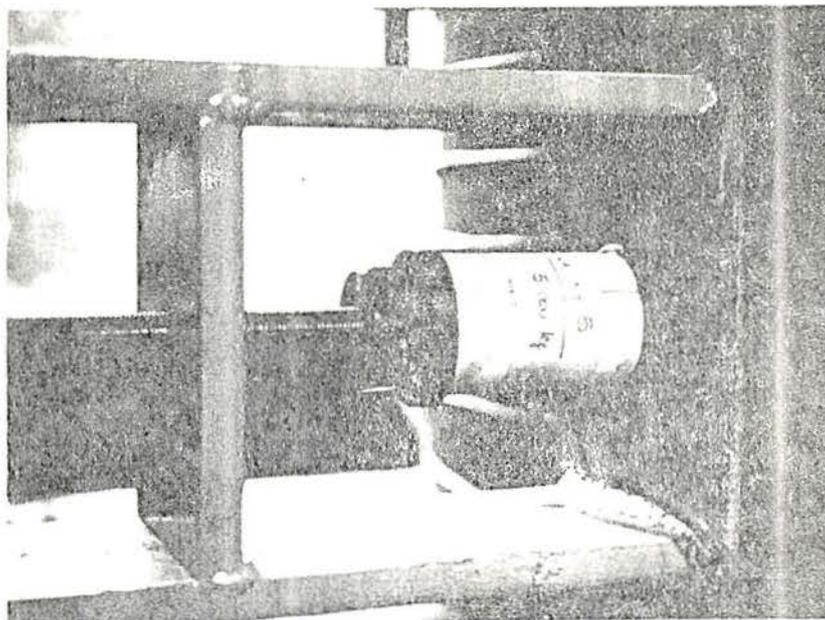
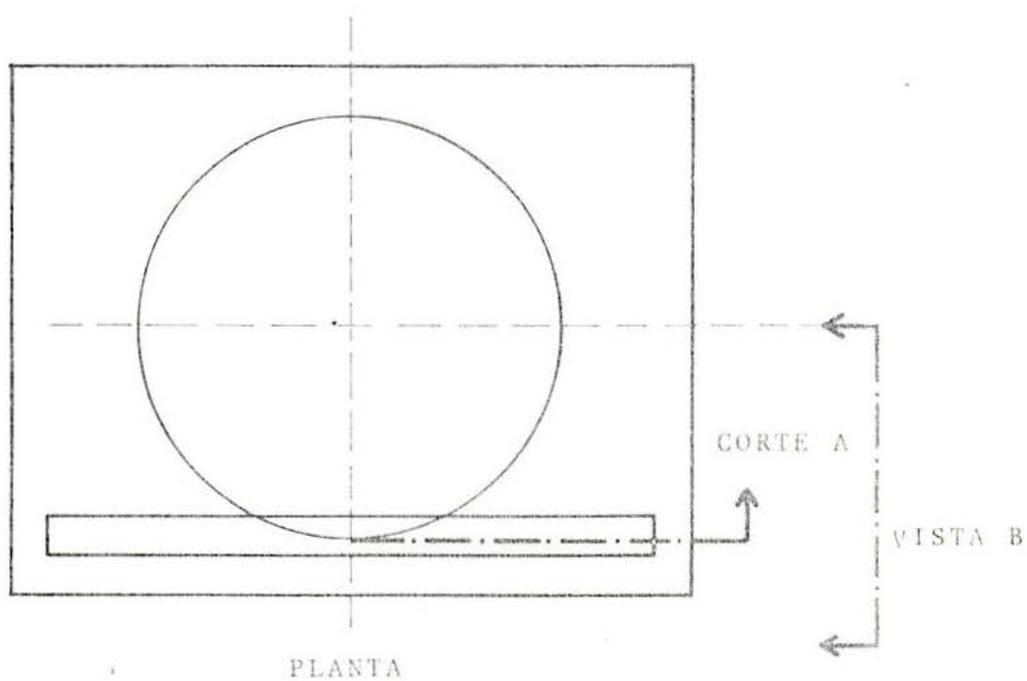


Fig. 4.28c - Célula de controle da carga da protensão horizontal



Referente a PLANTA 1 - Pórtico da protensão horizontal

4.10.7 - Sistema de pressão interna

Com a finalidade de promover um carregamento na forma de pressão interna, igualmente distribuída em toda a superfície interna do modelo, foi construído um sistema, como mostra a Fig. 4.29, composto pelas seguintes partes:

1- Uma câmara de borracha, com a mesma forma e dimensões do modelo, feita com pedaços de uma lâmina de borracha de 2,5 mm de espessura, colados e recauchutados, tendo em sua parte inferior um tubo para a entrada do líquido que promoveria a pressão interna.

Esta câmara tinha a finalidade de conter o líquido sob pressão, transmitindo-a homogênea e integralmente às paredes do modelo, sem permitir que este líquido viesse a danificar os strain gages internos, nem tampouco percolar através do microconcreto ou dos furos feitos na chapa de sustentação (Fig. 4.30).

2- Uma tubulação com dois ramos, um horizontal e um vertical. O primeiro, ligado à entrada da câmara (1) e à extremidade de uma mangueira (4); o segundo, ligado ao horizontal, estendia-se até uma altura pouco superior à do modelo, por onde era colocado o líquido, sem pressão, simplesmente por gravidade, que enchia a câmara de borracha (1). Em sua extremidade superior havia uma tampa que não permitia escapamentos de pressão.

3- No interior desta tubulação (2) havia um tubinho de borracha que se estendia desde o interior da câmara (1) até a saída superior do tubo vertical (2). Na primeira extremidade deste tubinho havia uma bôia de cortiça, com uma parte metálica, para mantê-la sempre flutuando sobre o líquido que fosse sendo depositado, permitindo, assim, a saída do ar contido na câmara, o que promovia uma melhor entrada desse líquido.

4- Ligada à tubulação horizontal, passando por um ponto mais alto do que a extremidade superior do modelo, e novamente ligando-se ao resto do sistema, havia uma mangueira plástica transparente, especial para fluidos sob pressão, a qual, em um de seus ramos, continha água até o nível mostrado na Fig. 4.29 e, no outro, ar.

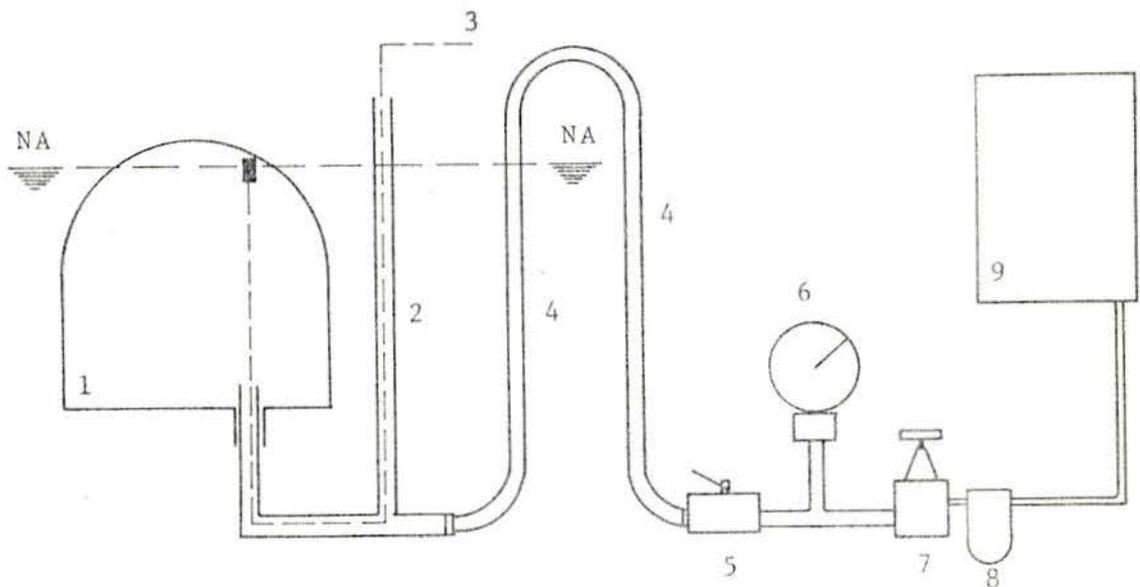


Fig. 4.29 - Sistema de aplicação da pressão interna



Fig. 4.30 - Câmara de borracha

A finalidade desta era de transmitir a pressão do ar à água e de não permitir que esta mesma água passasse para o outro ramo, o que poderia vir a danificar a aparelhagem que ali se localizava.

5 a 9- Um sistema composto por: uma válvula de retenção (5), um manômetro (6), uma válvula de estabilização de pressão (7), que mantinha a pressão em um nível desejado, apesar de perdas que porventura existissem no resto do sistema, um filtro de ar (8) e, finalmente, um compressor de ar (9).

Todo este sistema poderia produzir uma pressão desejada, entre 0 e 10 atmosferas, variá-la com a velocidade que fosse necessária, ou mantê-la fixa, apesar de perdas, em qualquer valor dentro desta faixa.

4.10.8 - Sistema de carga lateral

Com o intuito de aplicar uma carga lateral, horizontal, em uma região próxima à linha de transição entre a zona cilíndrica e a esférica, mas ainda na parte do cilindro, como pode ser visto na Fig. 4.32, foi montado um sistema isostático, composto por duas vigas à flexão e dois tirantes, que se rá detalhado a seguir, e que se encontra esquematizado na Fig. 4.33.

Este sistema é composto pelas seguintes partes:

1- Duas vigas de aço, cada uma composta por duas barras chatas de 1,9 x 10 x 105 cm, colocadas paralelamente e fixadas entre si por quatro tacos soldados, com a finalidade de prevenir a flambagem e de dar espaçamentos para a passagem de duas barras (4) que transmitem a carga.

2- Duas barras de aço de 5/8" de diâmetro, roscadas nas suas extremidades que, trabalhando à tração, ligam-se às duas vigas (1) por intermédio de porcas, formando, assim, um quadro.

3- Uma peça em forma de U, feita com uma chapa de aço de 1/4" que, dobrada e soldada a uma das vigas (1), suporta o macaco hidráulico e a célula de carga.

4- Duas barras roscadas de 5/8" de diâmetro, em cujas extremidades encontram-se chapas de aço de 1/2", chapas

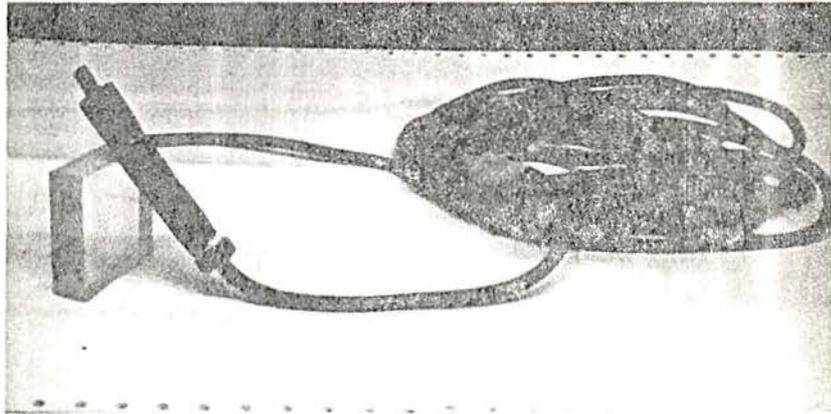


Fig. 4.31 - Tubo de borracha (3)
(vide fig. 4.29)

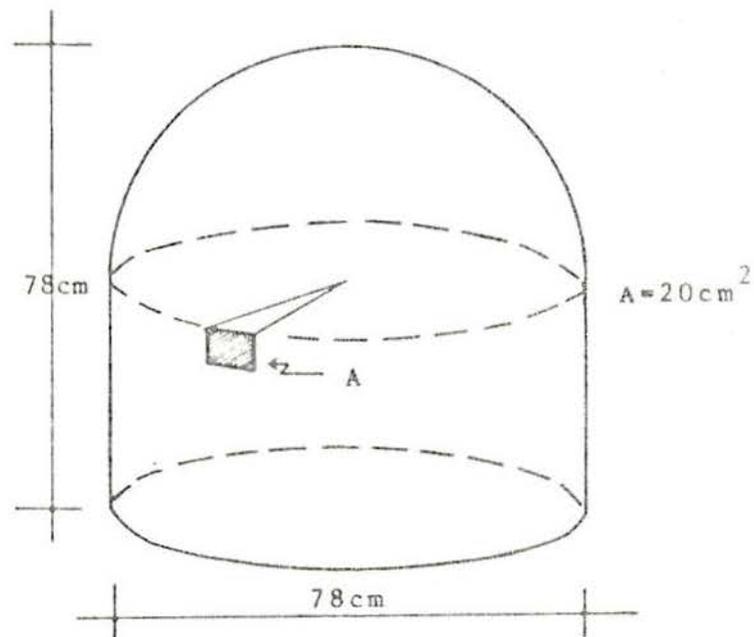


Fig. 4.32 - Área de atuação da carga lateral

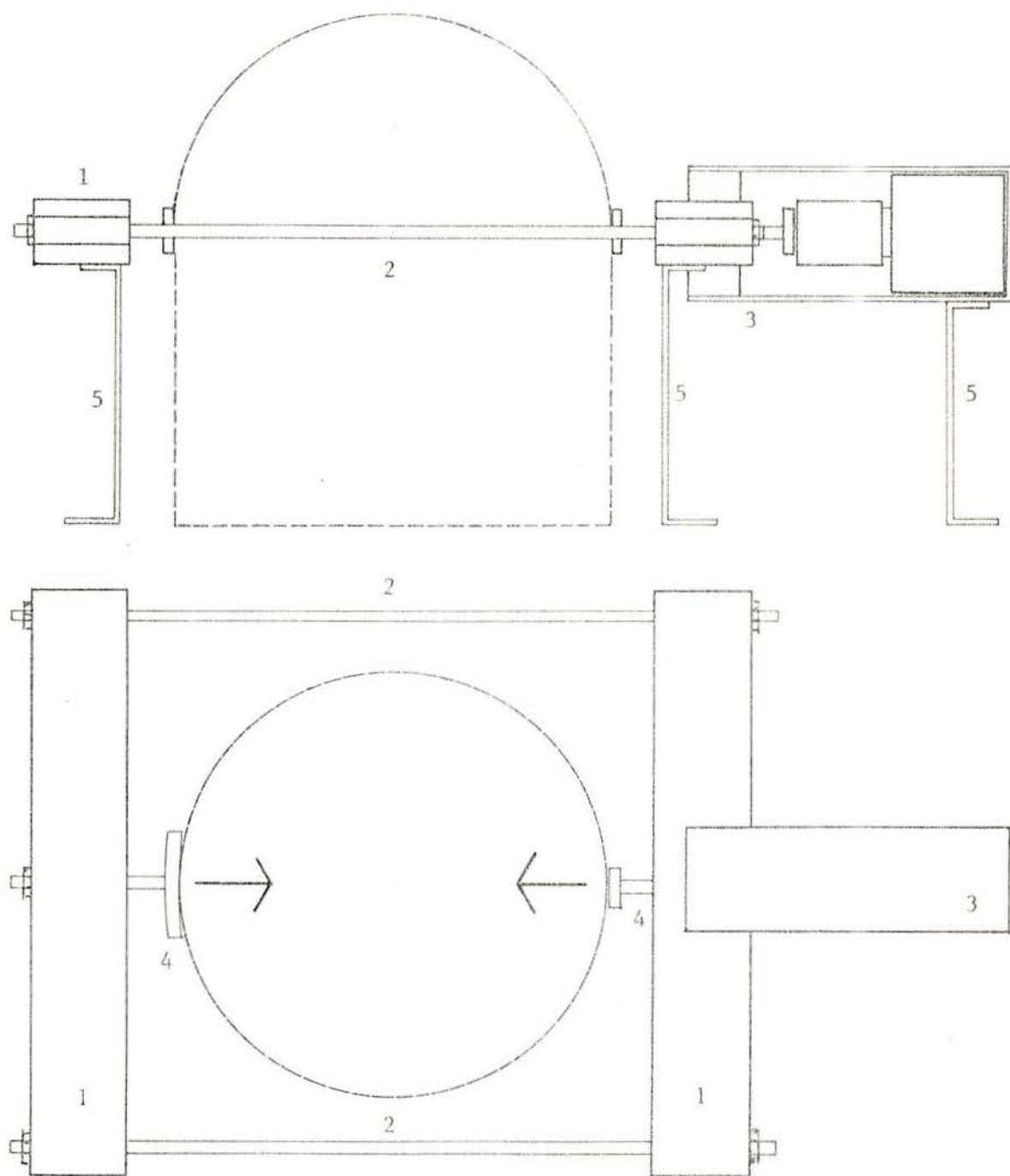


Fig. 4.33 - Sistema de aplicação da carga lateral

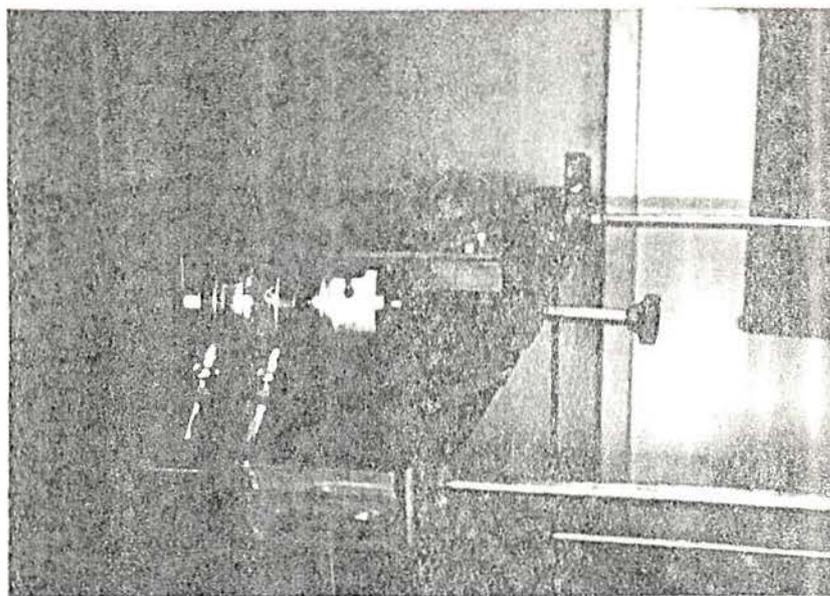


Fig. 4.34 - Sistema de carregamento lateral

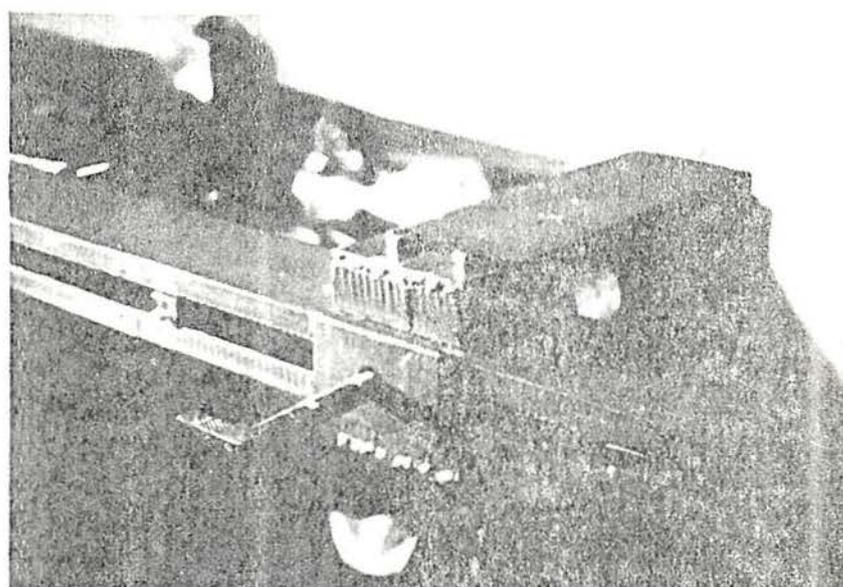


Fig. 4.35 - Barra de aplicação da carga lateral

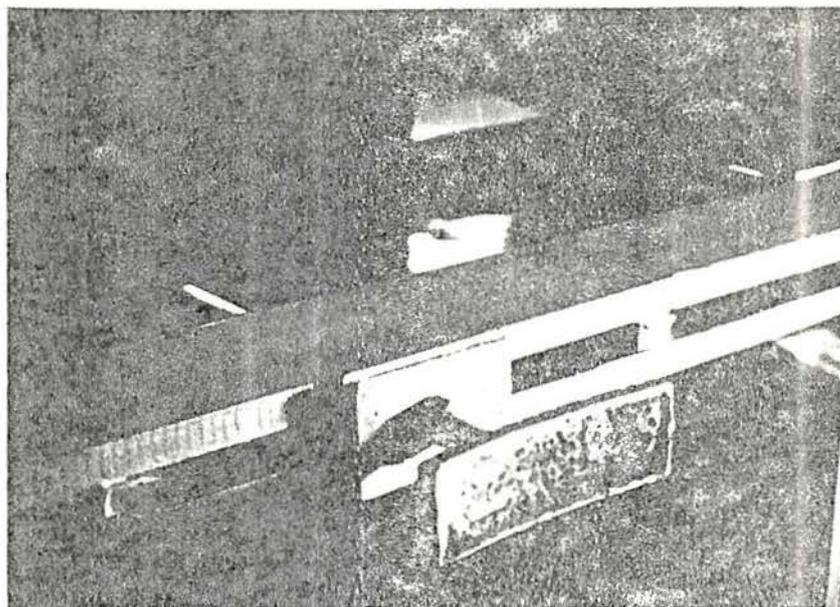


Fig. 4.36 - Chapa de aplicação da reação à carga lateral



Fig. 4.37 - "Strain gages" externos

de transmissão, que diretamente transmitem a carga às paredes do modelo, em pontos diametralmente opostos.

Tendo-se como objetivo principal o estudo dos efeitos causados pela atuação de uma carga, aplicada em uma pequena região, como mostra a Fig. 4.32, pensou-se inicialmente em um sistema que realmente aplicasse uma só carga, porém isto traria como consequência um deslocamento do modelo, já que ele se encontra simplesmente apoiado sobre a chapa de sustentação.

Com o sistema descrito neste item, aplica-se, então, duas cargas iguais e diametralmente opostas que devem reproduzir os mesmos efeitos de uma só carga, já que o modelo apresenta uma simetria e também porque os efeitos de uma das cargas não chegam a influenciar as regiões próximas à outra.

Tendo a região de aplicação da carga uma área de 20 cm^2 , utilizou-se uma chapa de transmissão de carga de $5 \times 4 \text{ cm}$ e, na região oposta, onde atua a reação desta carga, uma chapa com área 3 vezes maior, com $15 \times 4 \text{ cm}$, o que reduz ainda mais os efeitos desta segunda carga em regiões próximas à da primeira.

Todo este sistema encontra-se envolvendo o modelo e suspenso por cinco barras finas (5) ligadas à chapa de sustentação, o que lhe permite um livre movimento de translação no plano horizontal quando da aplicação da carga, e fazendo, assim, com que ação e reação sejam de mesma magnitude, não havendo reações de fixação e imprimindo tão somente uma compressão diametral.

4.11 - Posicionamento dos strain gages

Em 29 pontos, distribuídos pela superfície do modelo, foram colados 76 strain gages, cujas concentrações variaram de 1 a 4 strain gages por ponto.

Foram demarcadas, interseccionando-se em cada um dos referidos pontos, duas linhas, uma sempre na direção do meridiano que passa pelo ponto e a outra ortogonal à primeira, segundo as quais eram alinhados os strain gages, que, logicamen-

te, não ficavam sobre o ponto, mas dele a uma distância mínima necessária. Eram colados então, conforme o ponto em questão, de 1 a 4 strain gages, segundo as referidas direções, sendo, no máximo, 2 na face externa e 2 na face interna, o que proporcionaria a determinação de esforços em ambas as direções.

Um exemplo de dois strain gages externos pode ser visto na Fig. 4.37.

A Fig. 4.38a,b mostra a posição de todos os 29 pontos, alinhados segundo três meridianos, M_1 , M_2 e M_3 e um paralelo P_1 (que passa pelo ponto onde está o centro de aplicação da carga externa horizontal).

O ponto I, como exceção, tem os strain gages externos alinhados segundo os dois meridianos M_1 e M_3 , e não ortogonais entre si como os demais.

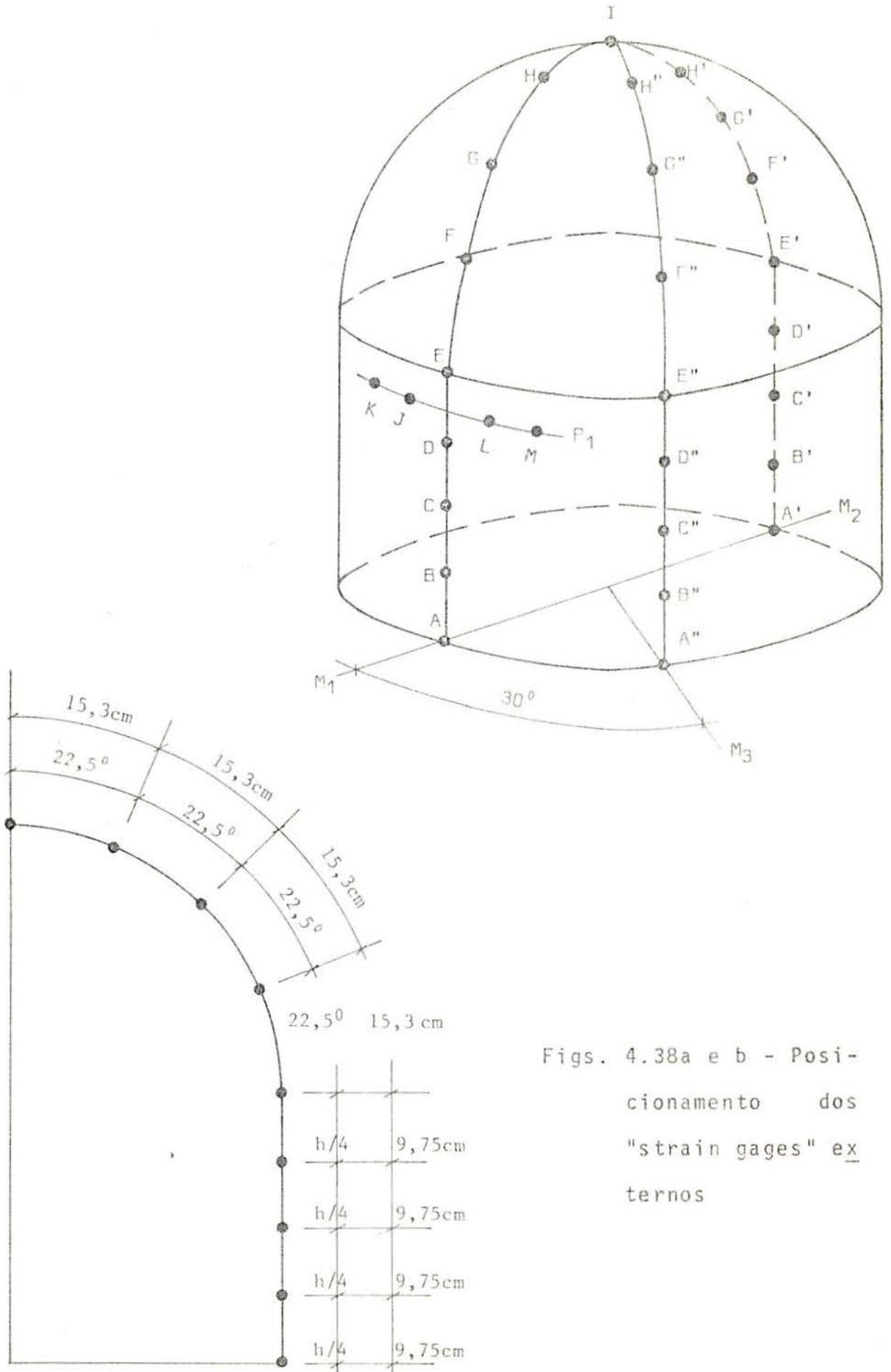
O quadro 4.3 discrimina cada ponto analisado, relacionando quantos e quais as direções dos strain gages, que somam um total de 21 internos e 55 externos.

4.12 - Posicionamento dos deflectômetros

Em 21 pontos, dos 29 analisados, os quais estão destacados por um asterisco (*) no quadro 4.3, foram colocados deflectômetros (relógios comparadores) com a finalidade de avaliar, nestes pontos, os deslocamentos do modelo, sempre na direção normal à superfície.

Para a sustentação destes deflectômetros, foi confeccionado um arco metálico, curvando-se uma cantoneira de abas iguais, como pode ser visto na Fig. 4.39, que, circundando o modelo segundo os meridianos M_1 e M_2 , fixava-se à chapa de sustentação, Fig. 4.40. Este arco proporcionou, então, o posicionamento dos deflectômetros sobre os referidos pontos, com seus eixos nas direções das normais à superfície. Preso a ele, e acompanhando o paralelo P_1 , Fig. 4.40, havia um outro pequeno arco metálico, onde se fixavam os 4 deflectômetros dos pontos K, J, L e M.

A fixação dos deflectômetros aos arcos, dava-se por



Figs. 4.38a e b - Posi-
 cionamento dos
 "strain gages" ex-
 ternos

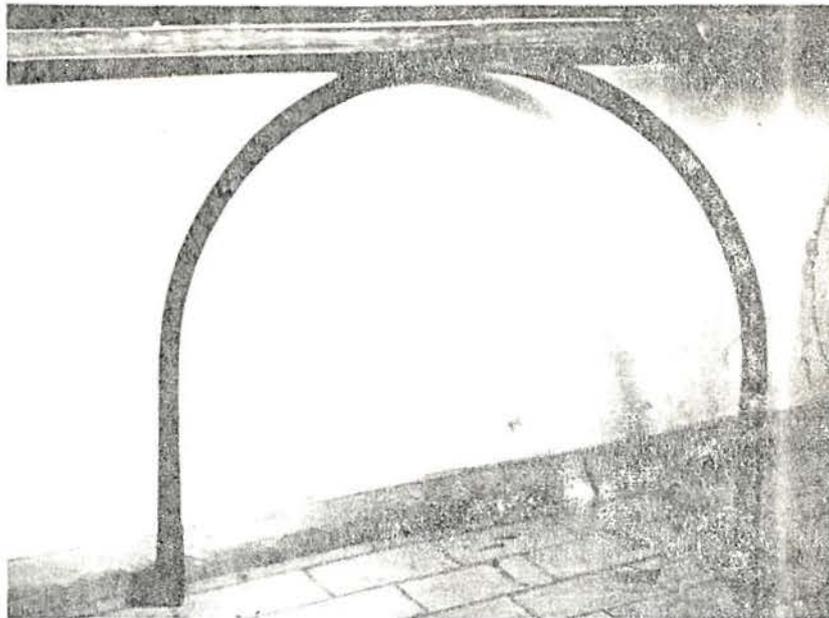


Fig. 4.39 - Arco de fixação dos deflectômetros

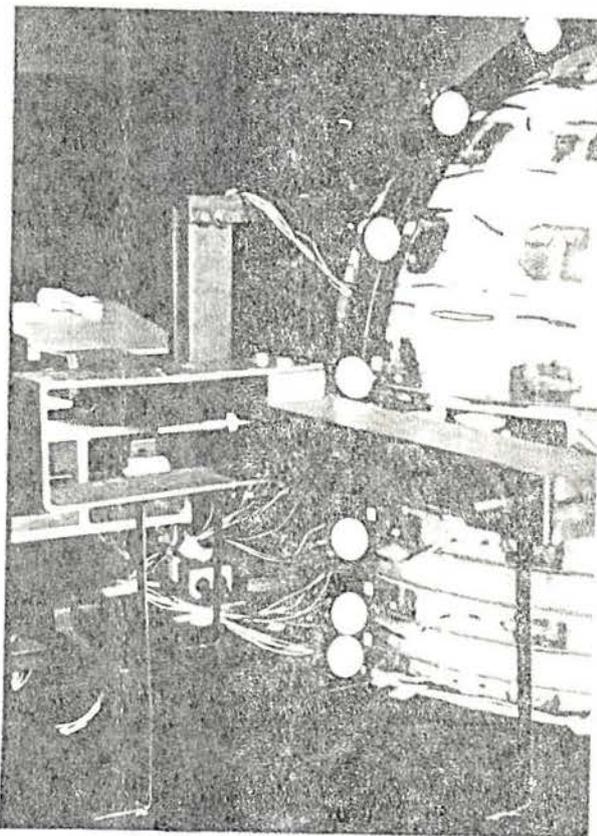


Fig. 4.40 - Vista lateral do modelo

Quadro 4.3 - Posicionamento dos strain gages e deflectômetros

Meridiano M ₁		Meridiano M ₂		Meridiano M ₃		Paralelo P ₁	
Ponto	Strain gages	Ponto	Strain gages	Ponto	Strain gages	Ponto	Strain gages
*A	Ve, Vi, He, Hi	*A'	Ve, Vi, He, Hi	A"	Ve, Vi, He	*K	He
*B	Ve, Vi, He, Hi	*B'	Ve, Vi, He	B"	Ve, Vi, He	*J	Ve, He
*C	Ve, Vi, He, Hi	*C'	Ve, He	C"	Ve, Vi, He	*L	Ve, He
*D	Ve, Vi, He, Hi	*D'	Ve, Vi, He	D"	Ve, He	*M	He
*E	Ve, Vi, He, Hi	*E'	Ve, Vi, He, Hi	E"	Ve, He		
*F	Ve, Vi, He, Hi	*F'	Ve, He	F"	Ve, He		
*G	Ve, He	*G'	Ve, He	G"	Ve, He		
*H	Ve, He	*H'	Ve, He	H"	Ve		
*I	Ve				Ve		

Onde: Ve - alinhado na direção de um meridiano, na face externa

Vi - alinhado na direção de um meridiano, na face interna

He - alinhado na direção de um paralelo, na face externa

Hi - alinhado na direção de um paralelo, na face interna

* pontos onde foram colocados deflectômetros.

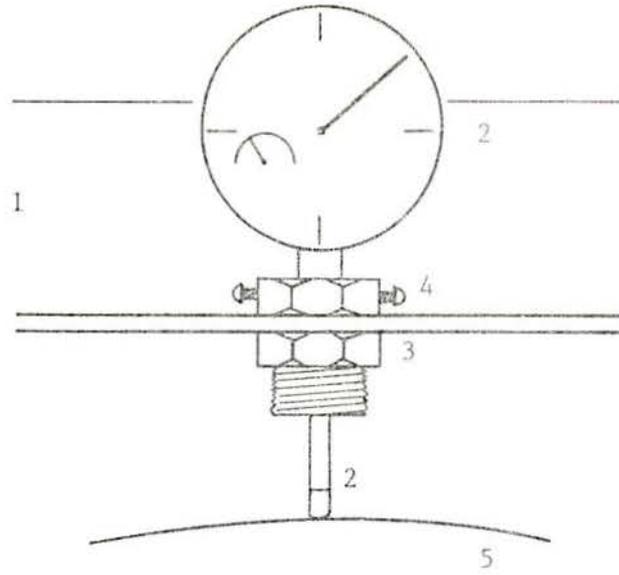


Fig. 4.41 - Fixação dos deflectômetros

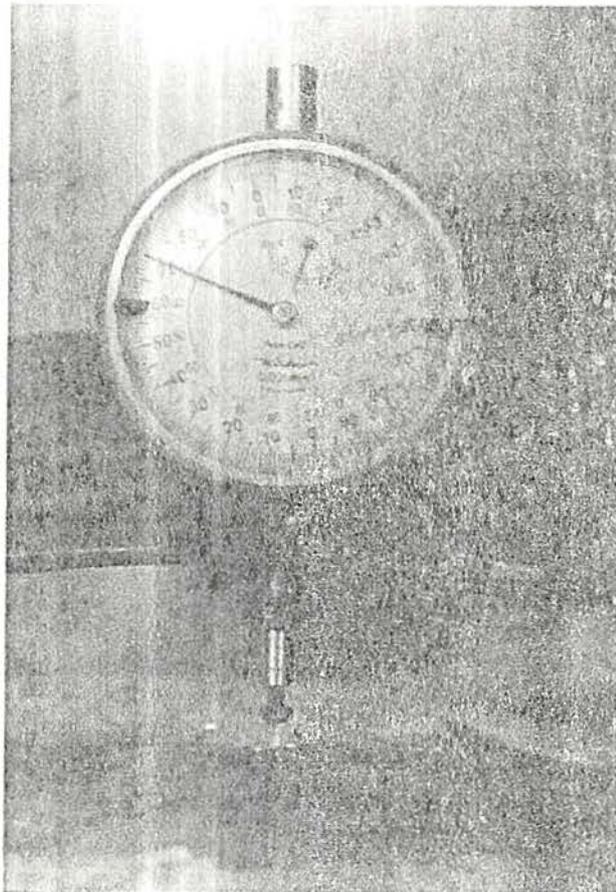


Fig. 4.42 - Fixação dos deflectômetros

intermédio de uma peça, na forma de um parafuso vasado, Fig. 4.41, que, segurando o deflectômetro por dois pequenos parafusos laterais, posicionava-se em um orifício feito nos próprios arcos metálicos.

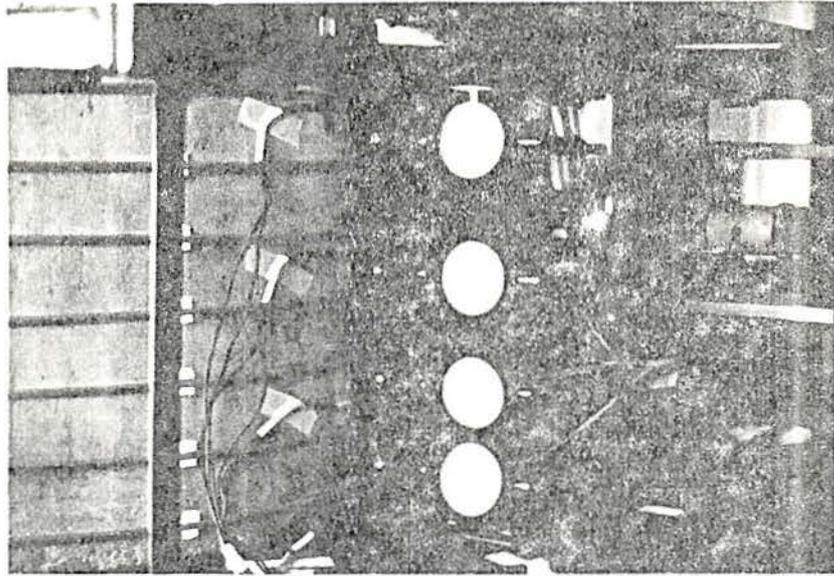


Fig. 4.43 - Deflectômetros na região cilíndrica

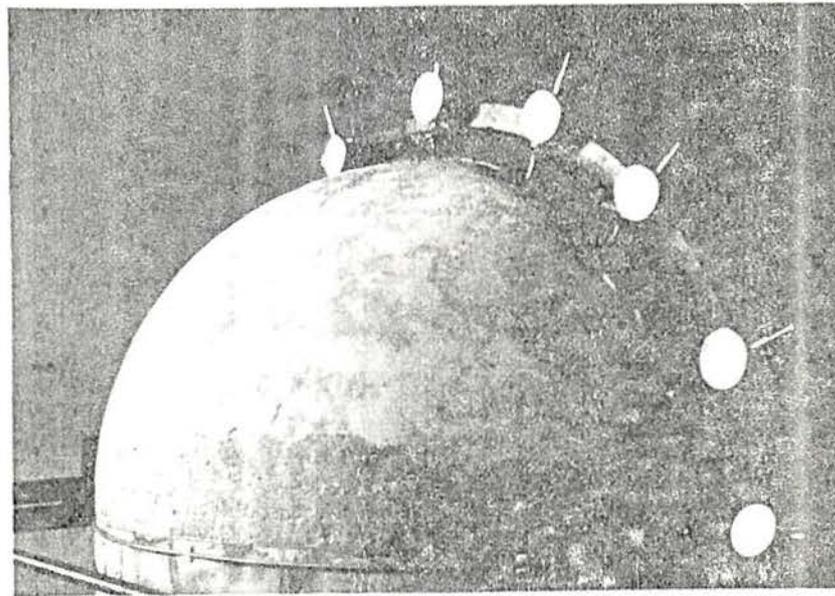


Fig. 4.44 - Deflectômetros na região semi-esférica

CAPÍTULO 5

ENSAIOS PRELIMINARES E EQUIPAMENTOS

5.1 - Sistemas de carga

5.1.1 - Cabos de protensão

Para a determinação das propriedades do arame de aço corda de piano, material dos cabos de protensão, foram ensaiadas à tração simples quatro amostras, com as seguintes características:

Amostras

- comprimento: 50 cm
- diâmetro: 2,79 cm
- seção transversal: 6,1136 cm²

Aparelhagem utilizada

- máquina de tração simples
- extensômetro mecânico, com garras distantes de 10 cm, presas à amostra e com leituras de deformação na precisão de centésimo de milímetro.

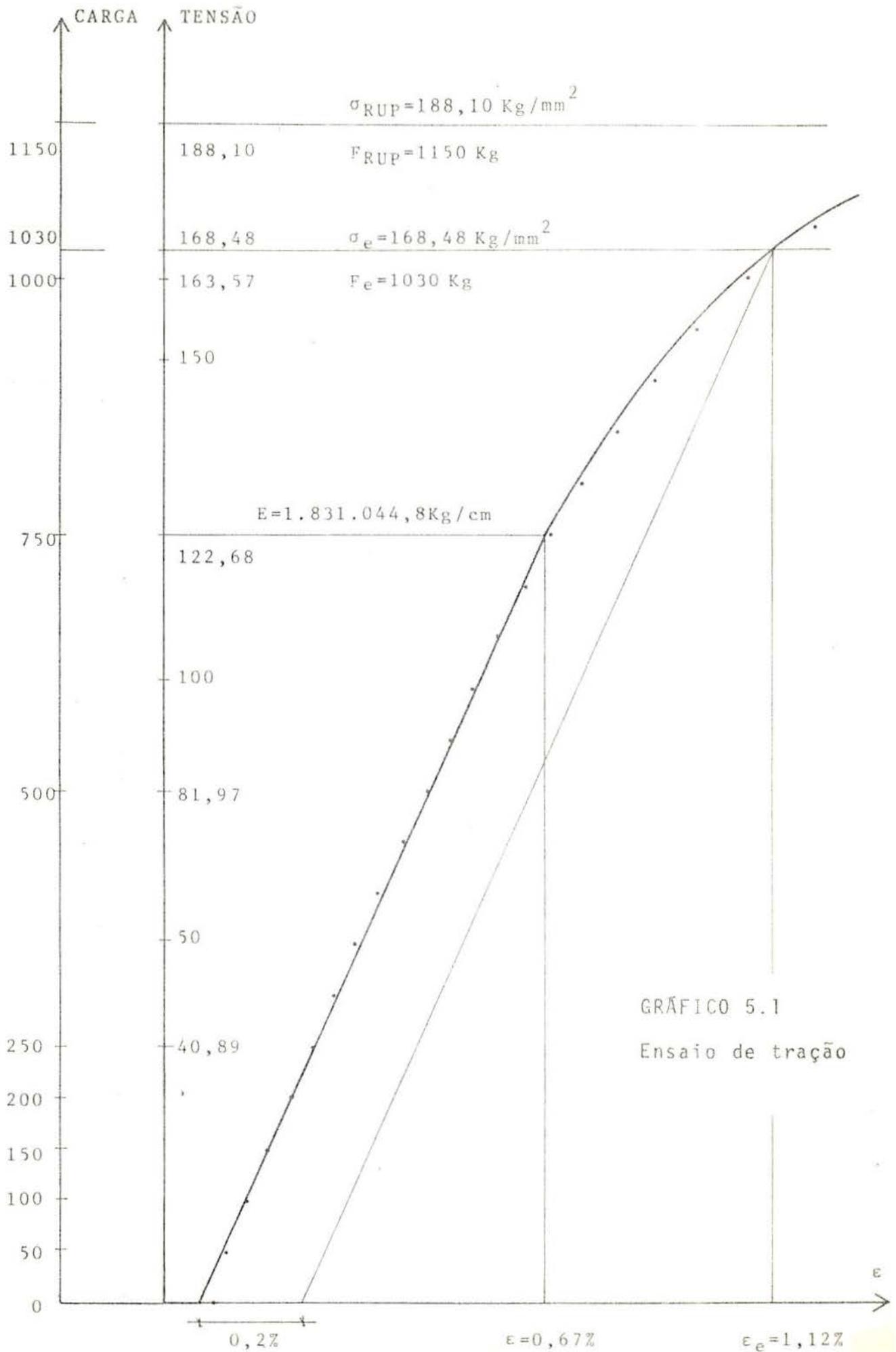
Os dados obtidos dos ensaios encontram-se nos gráficos 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

A partir destes dados, obtiveram-se os seguintes valores médios:

- tensão de escoamento (0,2 %): 165,21 kg/mm²
- tensão de ruptura: 186,88 kg/mm²
- carga de escoamento (a 0,2 % de ξ): 1010 kg
- carga de ruptura: 1140 kg
- alongamento do escoamento: 1,13 %
- módulo de elasticidade: 1830000 kg/cm²

5.1.2 - Ancoragens

Ensaíram-se à tração simples dois exemplares do conjunto cabo-ancoragem, como se encontra esquematizado na Fig. 5.1, sendo que ambos romperam na zona roscada do cabo,



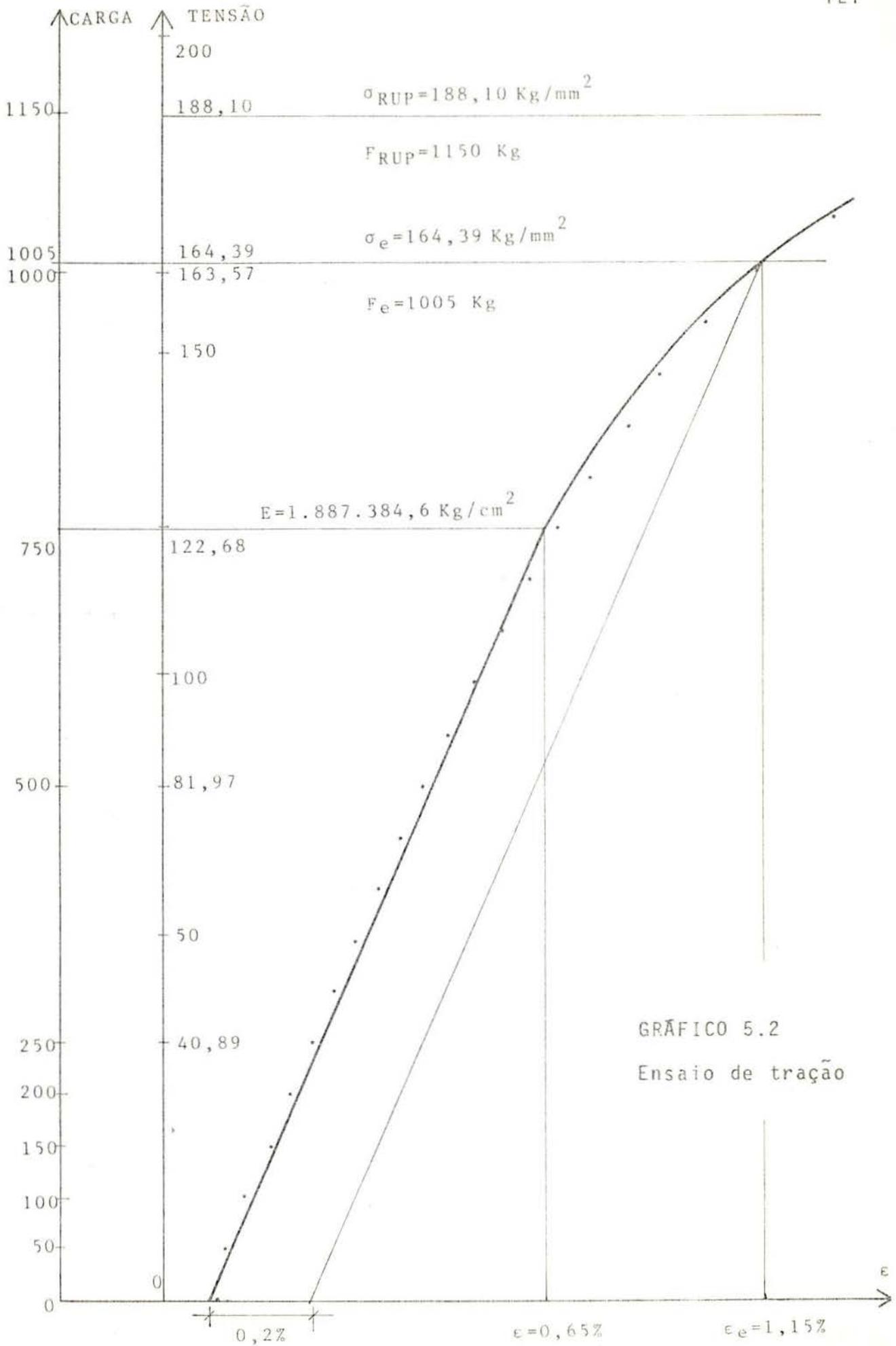


GRÁFICO 5.2
Ensaio de tração

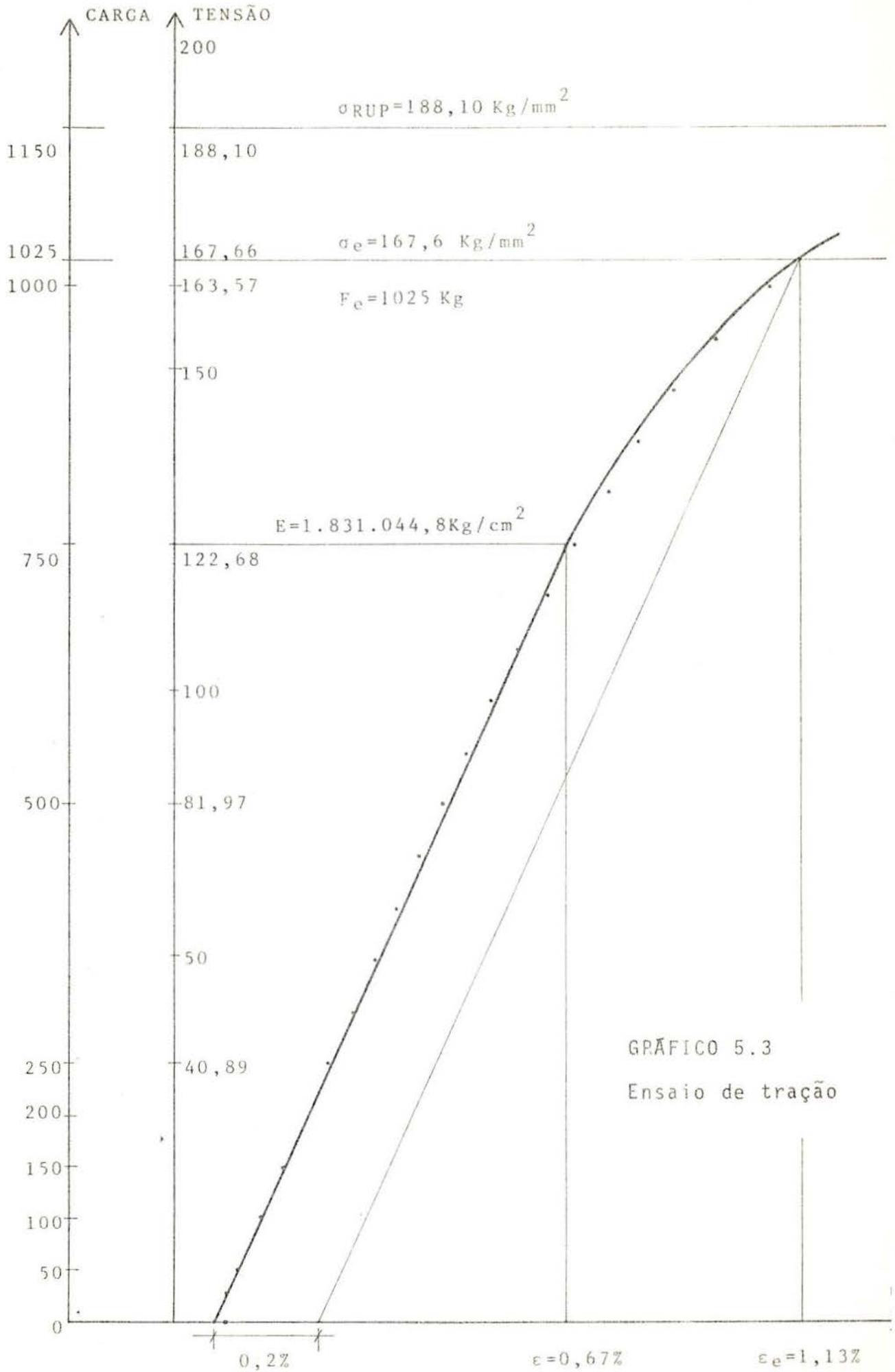


GRÁFICO 5.3
Ensaio de tração

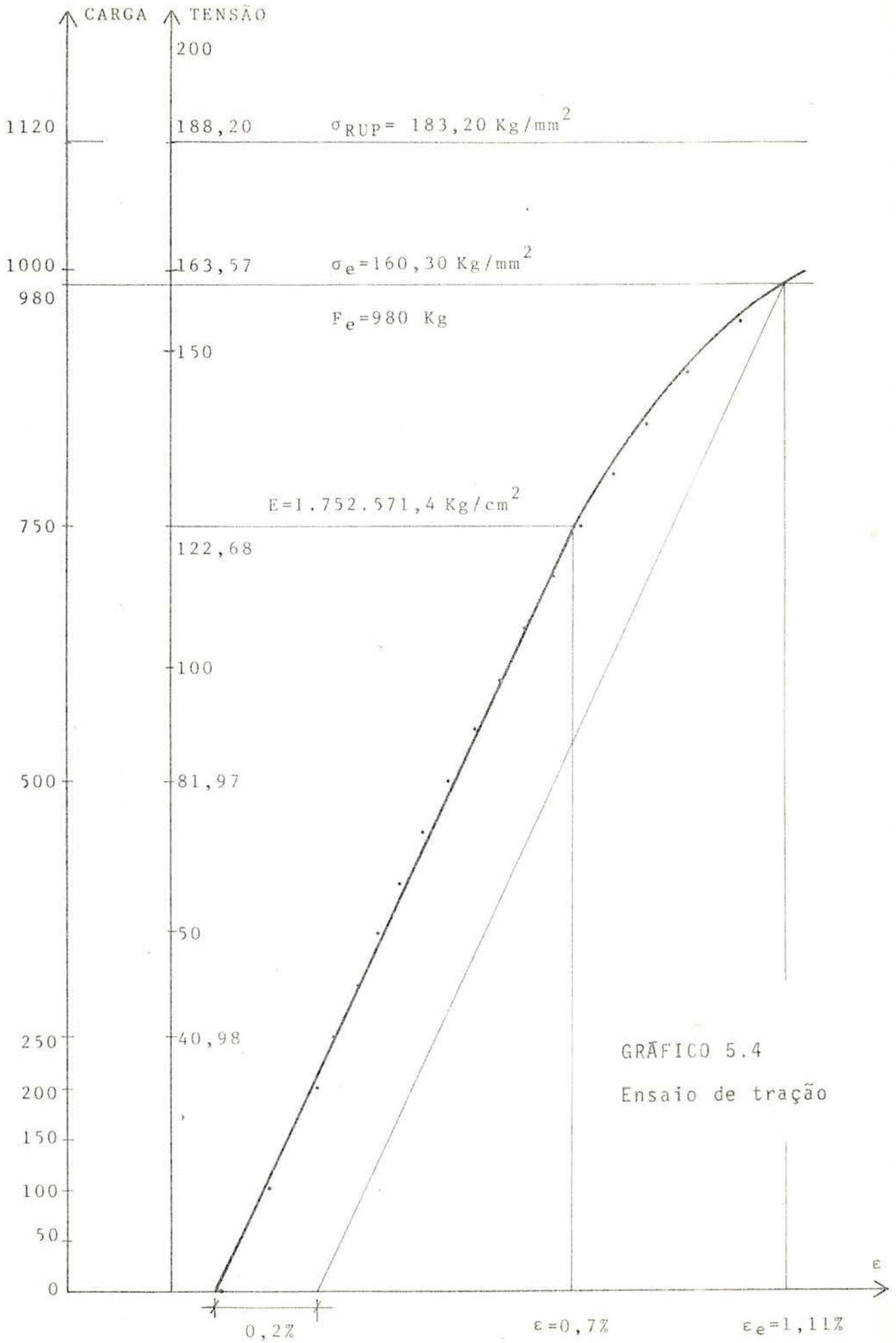


GRÁFICO 5.4
Ensaio de tração

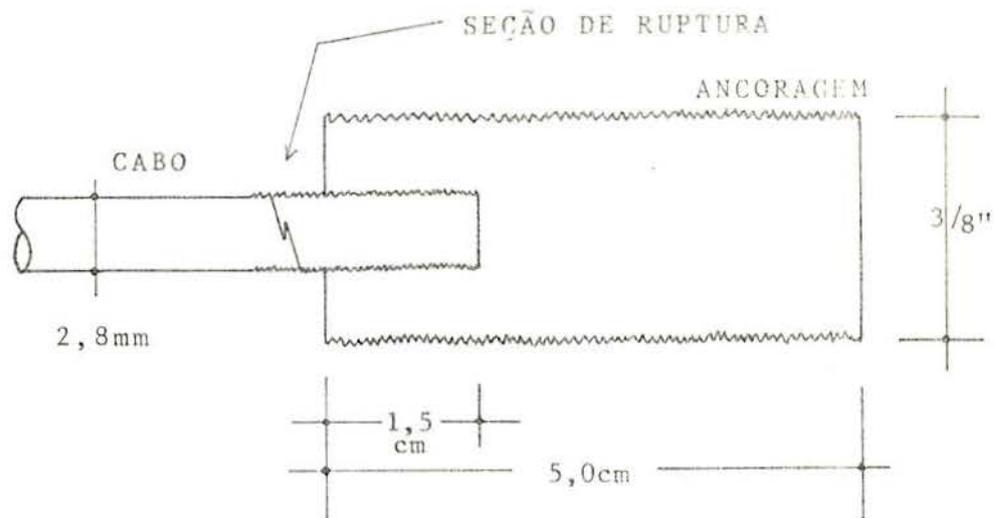


Fig. 5.1 - Ruptura de ancoragem

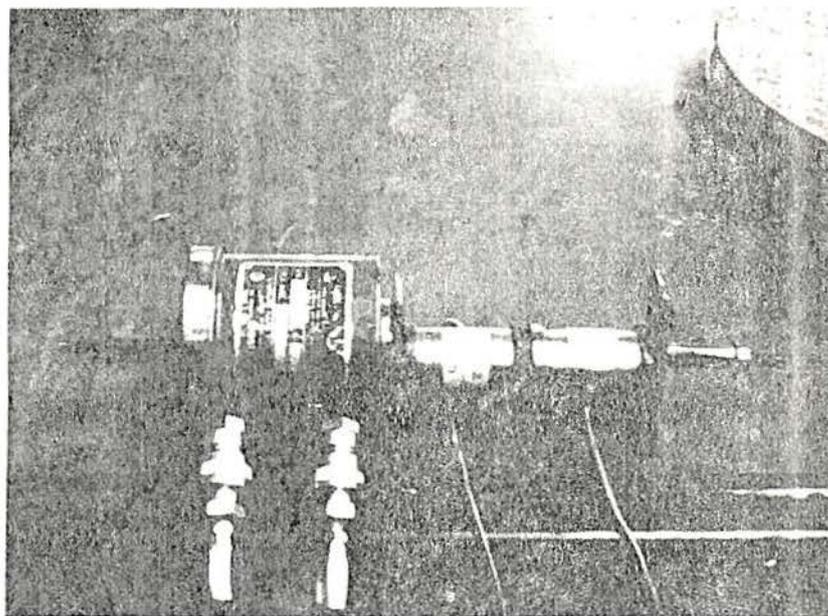


Fig. 5.2 - Ensaio de tração no conjunto cabo-ancoragem

com cargas de 1050 e 1100 kg. Supunha-se que a ancoragem resistisse ao arrancamento, o que foi comprovado pelos ensaios e esperava-se, também, que a ruptura se desse nesta zona, pois a rosca diminui a seção transversal do cabo e, conseqüentemente, sua carga de ruptura.

- carga média de ruptura, com rosca = $\frac{1050 + 1100}{2} = 1075$ kg
- carga média de ruptura, sem rosca = 1140 kg
- perda média em carga = 5,7 %

Como se vê, a rosca diminui em 5,7 % a carga de ruptura dos cabos, porém, como estes cabos não serão solicitados com cargas superiores a 400 kg, isto nos deixa ainda um coeficiente de segurança da ordem de 2,7, valor bastante razoável.

Foram também testados quatro exemplares dos tubos de prolongamento das ancoragens, à compressão simples, conforme trabalham, cujas características estão transcritas a seguir e cujos resultados encontram-se no quadro 5.1.

- diâmetro externo: 5/8" ou 15,9 mm
- espessura da parede: 1,59 mm ($\phi/10$)
- área resistente: 71,48 mm²

Quadro 5.1

Ensaio dos tubos de prolongamento

AMOSTRA	COMPRIMENTO (cm)	CARGA* (kg)	TENSAO (kg/cm ²)
1	5,000	1650	23,08
2	8,125	1550	21,68
3	15,195	1350	18,89
4	25,750	1200	16,79

* Carga em que se notou o primeiro indício de flambagem.

Nota-se nitidamente a influência do comprimento na carga de flambagem e conclui-se que novamente os resultados são satisfatórios, pois temos um coeficiente de segurança da ordem de 3, e os tubos serão solicitados sempre com as mesmas cargas que os cabos de protensão.

Finalmente fez-se um ensaio da ancoragem completa, com todos os seus componentes, a saber: a barra roscada, o tubo de prolongamento, uma arruela e uma porca, conforme Fig. 5.2 e 5.3.

O ensaio consistiu em tracionar-se repetidas vezes o cabo, através do macaco hidráulico, com cargas de até 1000 kg que eram lidas pelas duas células de carga. O sistema completo comportou-se perfeitamente, mantendo a ancoragem, após o carregamento, todas as suas funções inalteradas, seja a facilidade de montagem e desmontagem, como as demais.

5.1.3 - Barras de sustentação da carga de protensão

Ensaíram-se à compressão simples duas amostras das barras de sustentação, de 5/8" de diâmetro, rosqueadas nas extremidades e solicitadas através de duas chapas de aço que se apoiaram em duas porcas, exatamente como funcionam estas barras no modelo, e conforme Fig. 5.4.

Como mostram os resultados apresentados no quadro 5.2, estas amostras falharam por flambagem, onde se nota, também, a influência do comprimento, sem qualquer desligamento das porcas, e com cargas bastante superiores às de utilização, que não passariam de 4000 kg.

Quadro 5.2

Ensaio das barras de sustentação

AMOSTRA	lf cm	Pi kg	Pf kg	σ_i kg/cm ²	σ_f kg/cm ²
1	10	8100	10350	4395	5229
2	15	7500	8850	3789	4471

Pi, σ_i - início de flambagem

Pf, σ_f - fim de flambagem

5.1.4 - Sistema de pressão interna

Os componentes do sistema de pressão interna, descritos no item 4.10.7, foram testados em separado, da seguinte forma: antes de ser colocada no interior do modelo, a câmara de borracha foi testada com ar e água, sob uma pequena pressão in

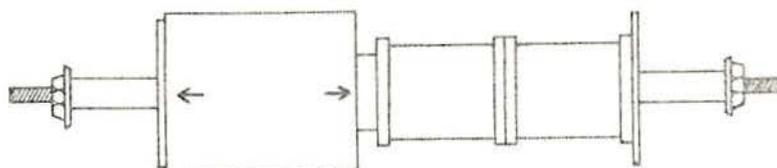


Fig. 5.3 - Ensaio da Fig. 5.2

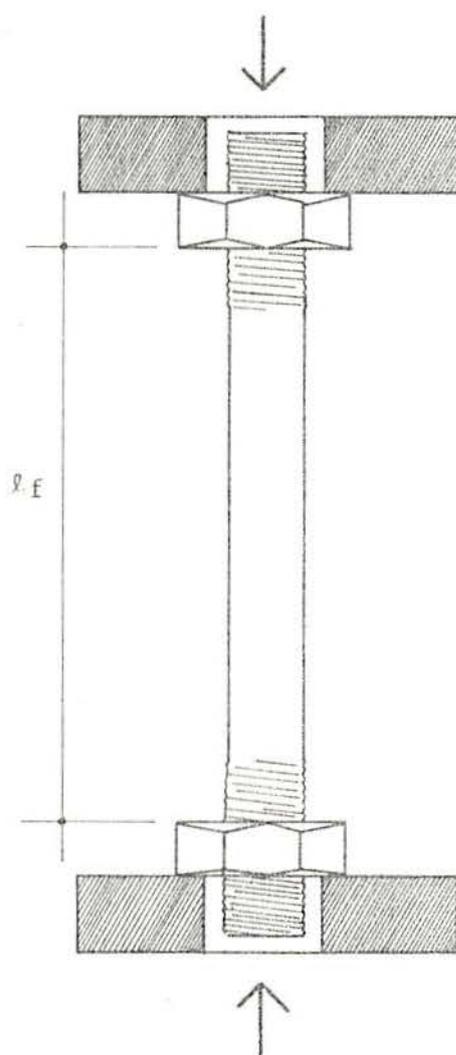


Fig. 5.4 - Ensaio de compressão nas barras de sustentação

terna, da ordem de 2 lb/in², para serem detectados possíveis vazamentos, os quais foram devidamente sanados.

Todo o resto do sistema, com exceção da câmara, foi testado com pressões de até 5 atm (73,8 lb/in²), também para serem detectados vazamentos e como segurança, de vez que no modelo, possivelmente, sã seriam aplicadas pressões de até 4 atm.

Apõs testado, este sistema foi montado, simultaneamente, com a colocação do modelo sobre a mesa de ensaios, ficando a câmara de borracha em seu interior e tendo contato com o meio externo somente através do tubo de entrada do líquido, onde, então, acoplou-se o resto do sistema para a colocação dos 280 litros d'água que transmitiriam a pressão às paredes do modelo.

Colocados, litro a litro, através da extremidade superior do encanamento vertical, todo o volume d'água necessário, houve subitamente, em algum ponto, a ruptura da câmara de borracha o que causou o derrame de, aproximadamente, metade do volume d'água.

Pela quantidade d'água perdida, conclui-se que a ruptura deve ter ocorrido em alguma emenda da câmara, em uma região próxima à intersecção da parte cilíndrica com a esférica. Visto que vazamentos não haviam quando do teste desta câmara, bem como no momento da ruptura não havia pressão interna, a não ser a exercida pelo próprio líquido, que nesta região não poderia ser maior do que 1 lb/in², e também porque a superfície interna do modelo estava perfeitamente lisa e não apresentava nada que pudesse vir a ferir a câmara, não se pode concluir a razão pela qual esta ruptura aconteceu.

Tendo havido, na época, uma grande dificuldade para a confecção desta câmara e não se dispondo de meios para preparar-se outra, a não ser com uma grande perda de tempo, o que não seria viável, optou-se por abandonar esta câmara no interior do modelo e levar-se adiante os ensaios dos outros carregamentos.

5.1.5 - Sistema de protensão vertical

O sistema de protensão vertical foi testado, antes de ter sido colocado o modelo sobre a chapa de sustentação, u-

utilizando-se doze cabos de protensão, com 45 cm de comprimento, ancorados acima da chapa de sustentação e na peça de ancoragem, como mostra a Fig. 5.5.

No sistema assim montado, foram aplicadas cargas até 8000 kg, que permaneceram atuando por um período de 24 horas, durante as quais mediu-se o valor das perdas, tanto por relaxação dos cabos como por possíveis folgas nas porcas que transmitem as cargas às três células de carga.

Durante o carregamento, e por todo o período de 24 horas, o sistema comportou-se perfeitamente, apresentando perdas de aproximadamente 4 % na carga total.

Nos cabos reais, estas perdas seriam ainda de menor valor, por serem estes cabos solicitados com uma tensão menor e também por um período de tempo mais reduzido, de vez que os ensaios finais não duraram mais do que 3 horas cada um.

5.1.6 - Sistema de protensão horizontal

Assim como o sistema de protensão vertical, item 5.1.5, este sistema foi testado em separado, antes de estar o modelo sobre a chapa de sustentação, com o auxílio de 6 cabos de 70 cm de comprimento, ancorados nas duas barras móveis verticais, item 4.10.6.

A Fig. 4.28a, mostra este sistema montado, no qual foi aplicada uma carga de 4000 kg, que também apresentou, após 24 horas, perdas da ordem de 4 %.

Aplicaram-se a estes resultados, as mesmas conclusões do item anterior.

5.1.7 - Sistema de carga lateral

Este sistema foi testado, fora da mesa de ensaios, simplesmente substituindo-se o modelo por uma barra de aço de 2" de diâmetro, que foi solicitada à compressão com cargas de até 4000 kg.

5.1.8 - Determinação do atrito nos cabos de protensão

Com a finalidade de determinar o valor das perdas por atrito nos cabos de protensão, assim como os respectivos coeficientes de atrito, fizeram-se ensaios que tentassem representar as mesmas condições de funcionamento destes cabos no mode-

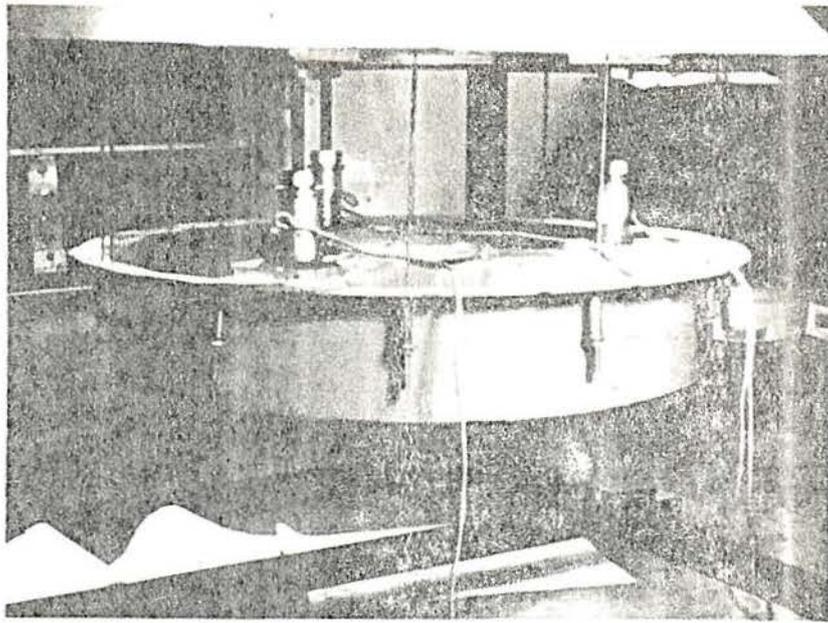


Fig. 5.5 - Ensaio do sistema de protensão vertical

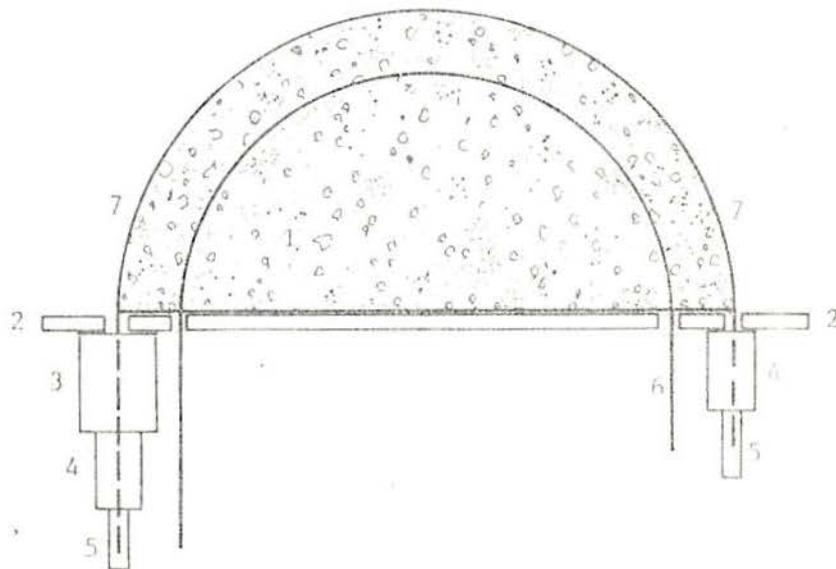


Fig.5.6a - Teste de atrito

lo, para que os resultados pudessem, então, ser aplicados diretamente na análise numérica.

Considerando que os cabos de protensão, protegidos pelas bainhas e envoltos em fita de teflon, não apresentassem perdas consideráveis por atrito nos trechos retos que se encontram na parte cilíndrica do modelo, com comprimentos de 39 cm, as regiões para as quais seria necessária a determinação destas perdas, são:

1) A parte esférica, onde os cabos desenvolvem-se em ângulos de 180° , sendo que, tracionados por ambas as extremidades, as perdas se fazem sentir em ângulos de 90° .

2) A parte cilíndrica, quando da protensão horizontal, onde os cabos desenvolvem-se em ângulos de 360° , apresentando perdas relativas a ângulos de 180° .

O equipamento utilizado para estes ensaios, Fig.5.6a,b, era composto pelas seguintes partes: um semidisco de concreto (1), com 75 cm de diâmetro e 5 cm de espessura, no qual se encontravam dois cabos de protensão, um interno (6) e um externo (7). Nas extremidades destes cabos, conforme eram ensaiados o cabo interno ou o externo e, após, uma barra de aço (2), havia ancoragens (5), células de carga (4) e, em uma das extremidades, um macaco hidráulico (3).

Os ensaios consistiram simplesmente em aplicar-se à extremidade do cabo, onde estava localizado o macaco hidráulico, uma carga que era avaliada pela célula de carga adjacente e determinar-se na outra extremidade, também com a célula de carga, a carga atuante, onde já estavam descontadas as perdas por atrito.

Estes ensaios foram repetidos inúmeras vezes, fazendo-se variar tanto o cabo, interno ou externo, como sua proteção:

- 1) Cabo nu, diretamente sobre o concreto.
- 2) Cabo com a bainha plástica.
- 3) Cabo envolto em fita de teflon e com a bainha plástica.

Os resultados obtidos encontram-se discriminados nos gráficos 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, e os coeficientes de atrito, assim como as percentagens médias de perda, no quadro 5.3.

Quadro 5.3
Perdas e coeficientes de atrito

PROTEÇÃO	CABO EXTERNO		CABO INTERNO	
1	$f_m = 0,23$	$p_{mc} = 52$	(*)	
2	$f_m = 0,14$	$p_{mc} = 36$	$f_m = 0,05$	$p_{mc} = 15$
3	$f_m = 0,03$	$p_{mc} = 9$	$f_m = 0,11$	$p_{mc} = 29$

(*) Não foram testados cabos internos sem proteção, pois estes ficariam aderidos ao microconcreto.

Onde:

f_m - coeficiente médio de atrito no carregamento

p_{mc} - perda percentual média, de carga, no carregamento

Obtidos por:

$$f = \frac{\ln F_1/F_2}{\alpha}$$

$$p_{mc} = \frac{F_1 - F_2}{F_1} = 100 (1 - e^{-f\alpha})$$

Sendo:

F_1 - força aplicada pelo macaco hidráulico

F_2 - força obtida na extremidade oposta

α - ângulo de desenvolvimento do cabo (180°).

Nas regiões onde as perdas por atrito são consideradas em função de ângulos de desenvolvimento de 180° , podem-se utilizar diretamente os valores constantes no quadro 5.3, em função do cabo e de seu revestimento; porém, naquelas regiões em que o ângulo de desenvolvimento a ser considerado nas perdas for de 90° ($\pi/2$), estas perdas deverão ser determinadas em função de sua variação com o coeficiente de atrito e com o ângulo de desenvolvimento do cabo.

Como tais perdas não variam uniformemente com o ângulo de desenvolvimento e com o coeficiente de atrito, ou seja, para dois diferentes coeficientes de atrito a relação entre perdas para dois dados ângulos não é a mesma, em regiões em que estas perdas forem relativas a desenvolvimentos de 90° , e-

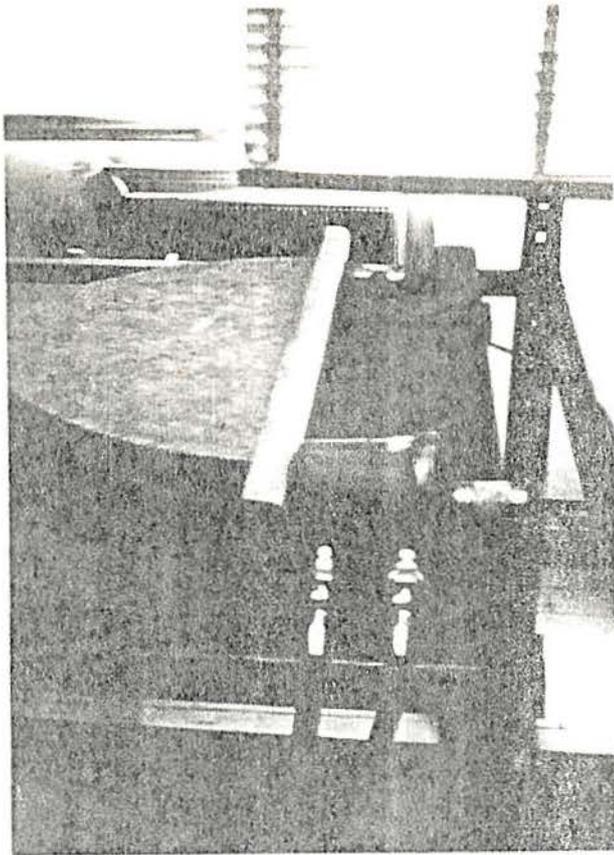
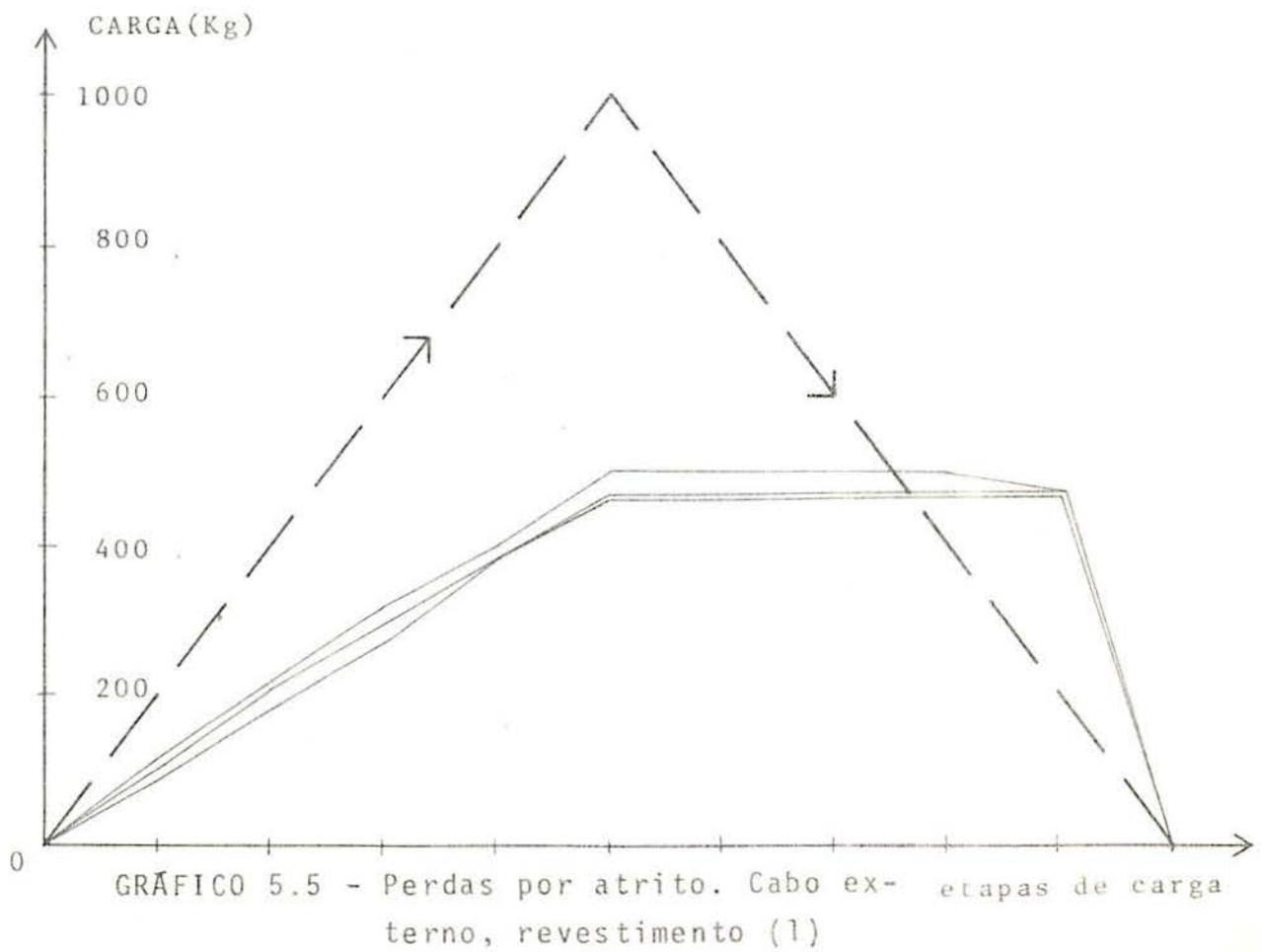


Fig. 5.6b - Sistema pa
ra teste de
atrito



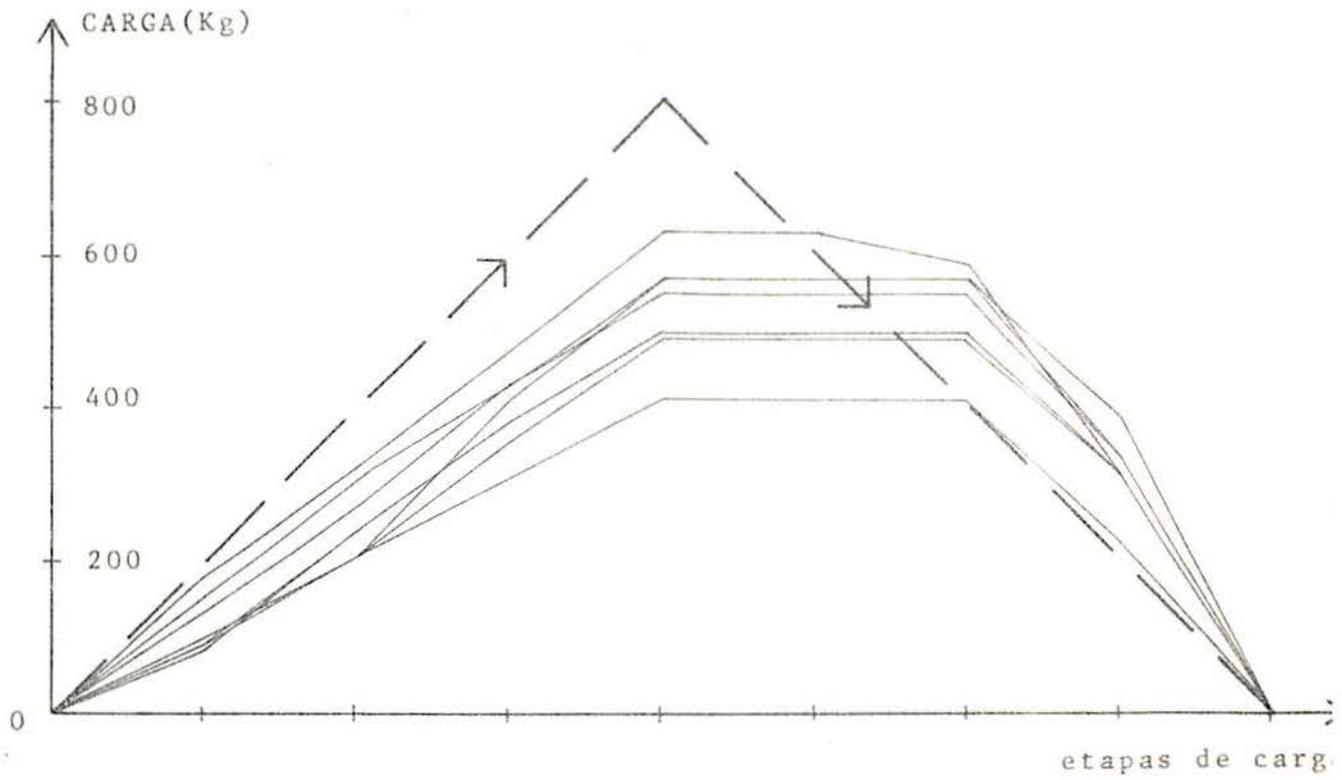


GRÁFICO 5.6 - Cabo externo, revestimento (2)

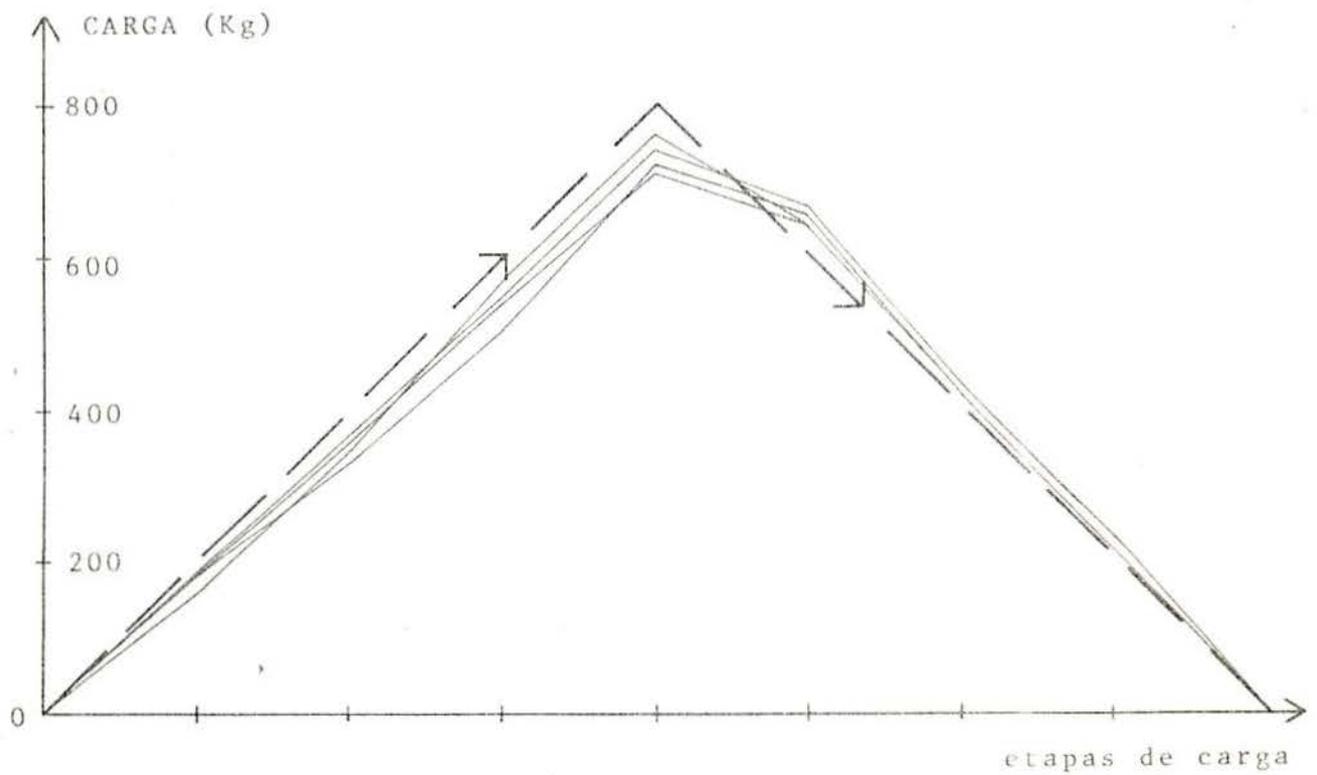


GRÁFICO 5.7 - Cabo externo, revestimento (3)

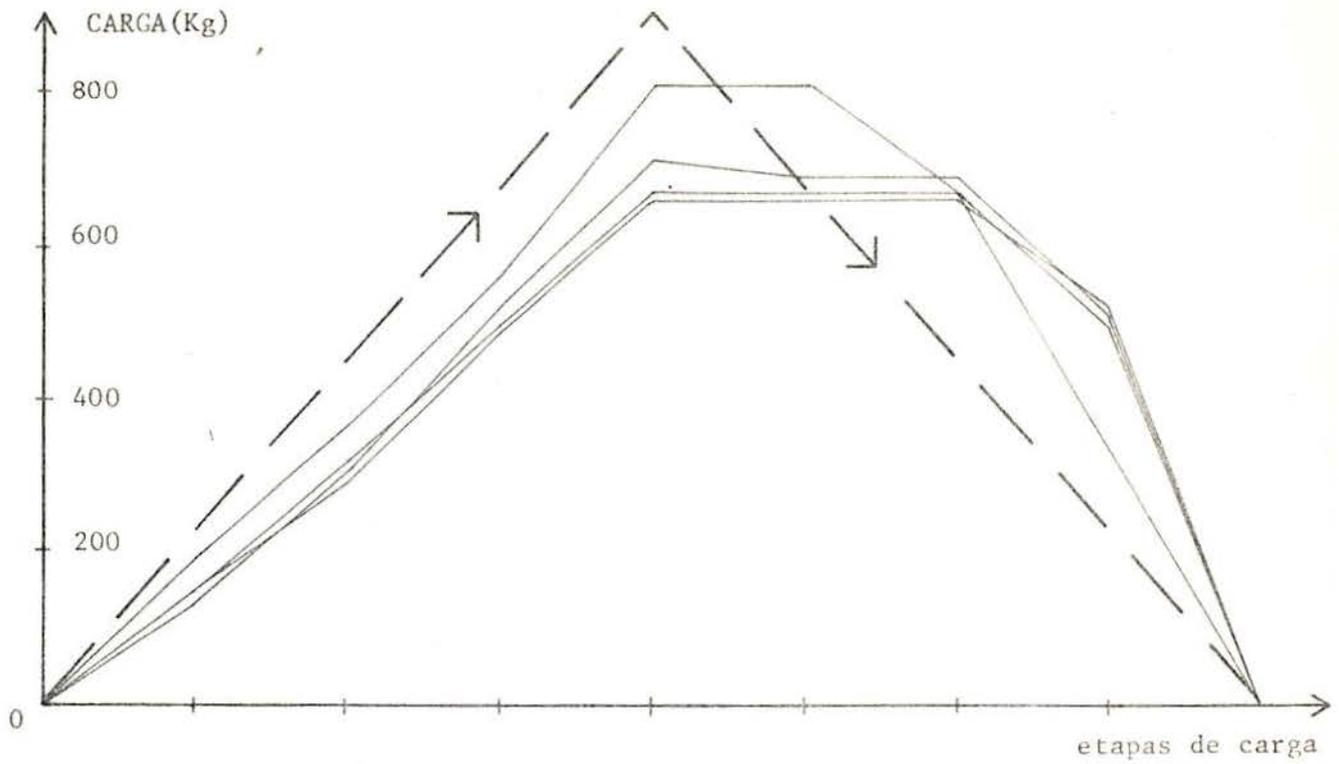


GRÁFICO 5.8 - Cabo interno, revestimento (2)

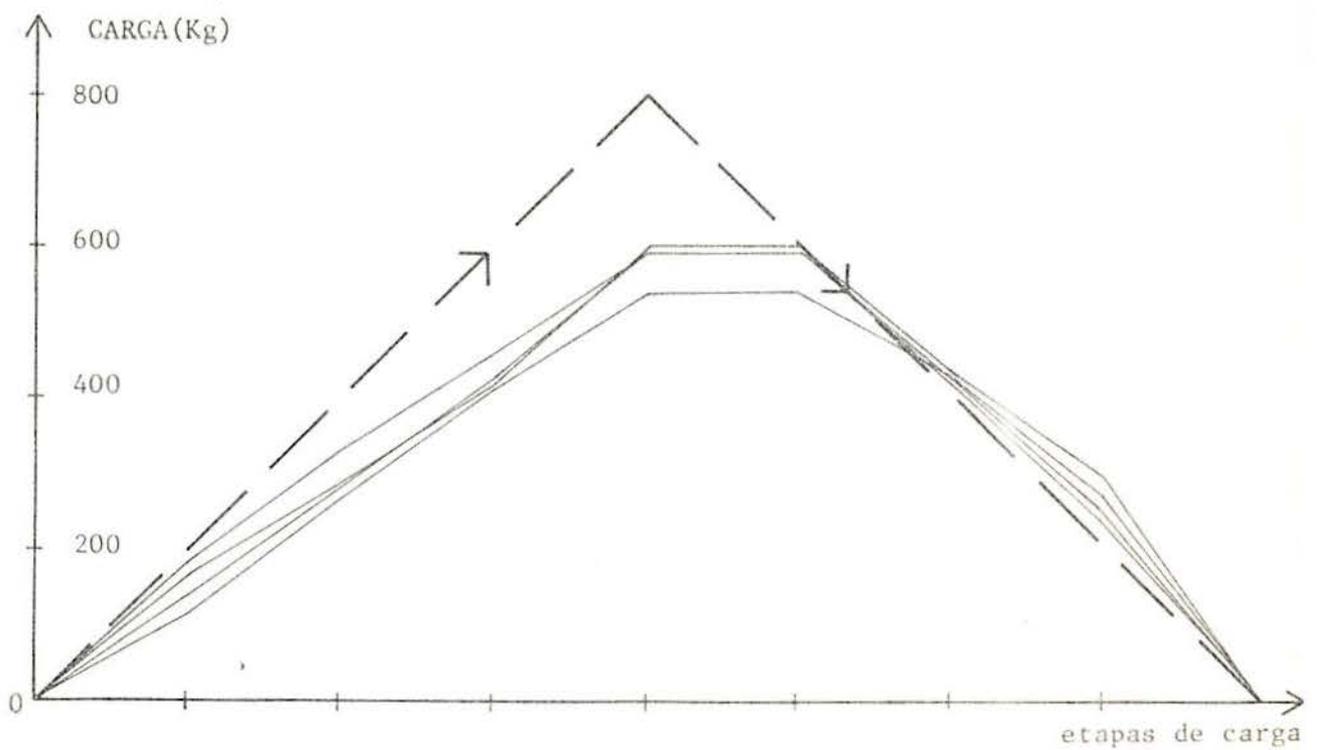


GRÁFICO 5.9 - Cabo interno, revestimento (3)

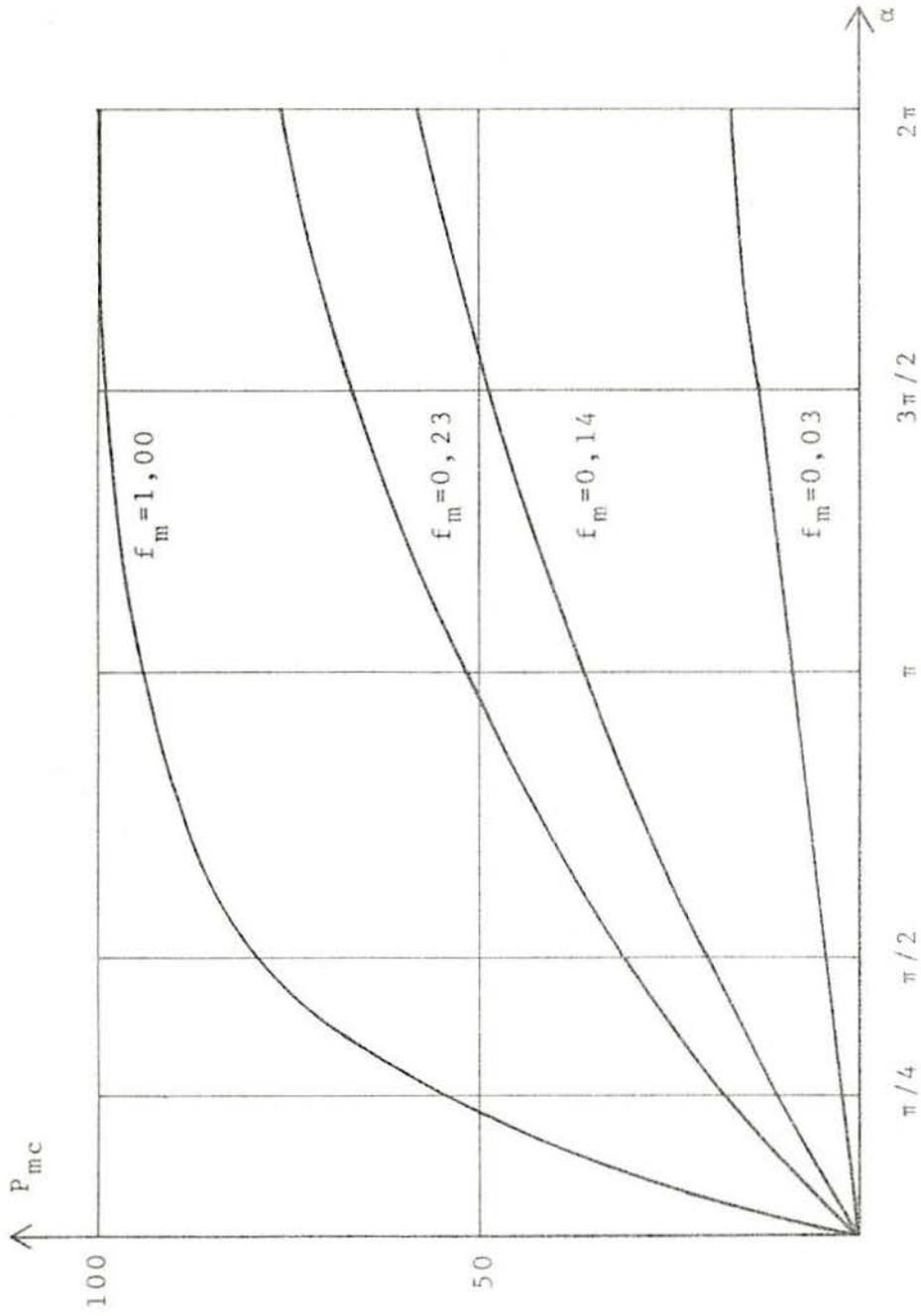


GRÁFICO 5.10 - Perdas por atrito em função do ângulo de desenvolvimento do cabo

las podem ser determinadas através das curvas do gráfico 5.10, considerando-se o tipo de revestimento do cabo, a ser utilizado.

Como pode ser observado nos gráficos 5.5 a 5.7, as perdas vão diminuindo sensivelmente à medida em que se vai aumentando o revestimento do cabo, com o que se consegue, no caso do revestimento completo, perdas da ordem de 1/6 daquelas obtidas para o cabo nu em contato direto com o concreto.

Isto ocorreu com os ensaios feitos com o cabo externo; o mesmo, porém, não se deu no caso do cabo interno, devido ao fato de ter sido este colocado dentro do semidisco, para a concretagem, somente com a bainha plástica, pois quando retirado e envolto em teflon não se conseguiu colocá-lo novamente na bainha sem que o teflon se enrugasse, prejudicando então os ensaios com este tipo de revestimento.

Em função do ocorrido, tomaram-se como válidos os resultados obtidos para o cabo externo e utilizou-se este tipo de revestimento, completo, para ambos os cabos, externo e interno, quando da montagem do modelo, sendo que os cabos internos já foram colocados com o revestimento completo antes da concretagem.

5.2 - Microconcreto

5.2.1 - Compressão simples

Foram ensaiados à compressão simples 21 corpos de prova, em diferentes idades, sendo que, destes, 3 foram relativos aos ensaios para a determinação da curva tensão-deformação. Os resultados obtidos encontram-se no quadro 5.4 e os mesmos estão contidos no gráfico 5.11, comparados com algumas curvas de resistência em função da idade do concreto, fornecidas por Peterson¹⁴, Leonhardt¹⁶ e pelo CEB¹⁴.

Características geométricas dos corpos de prova cilíndricos:

Altura = 11 cm
Diâmetro = 5,5 cm

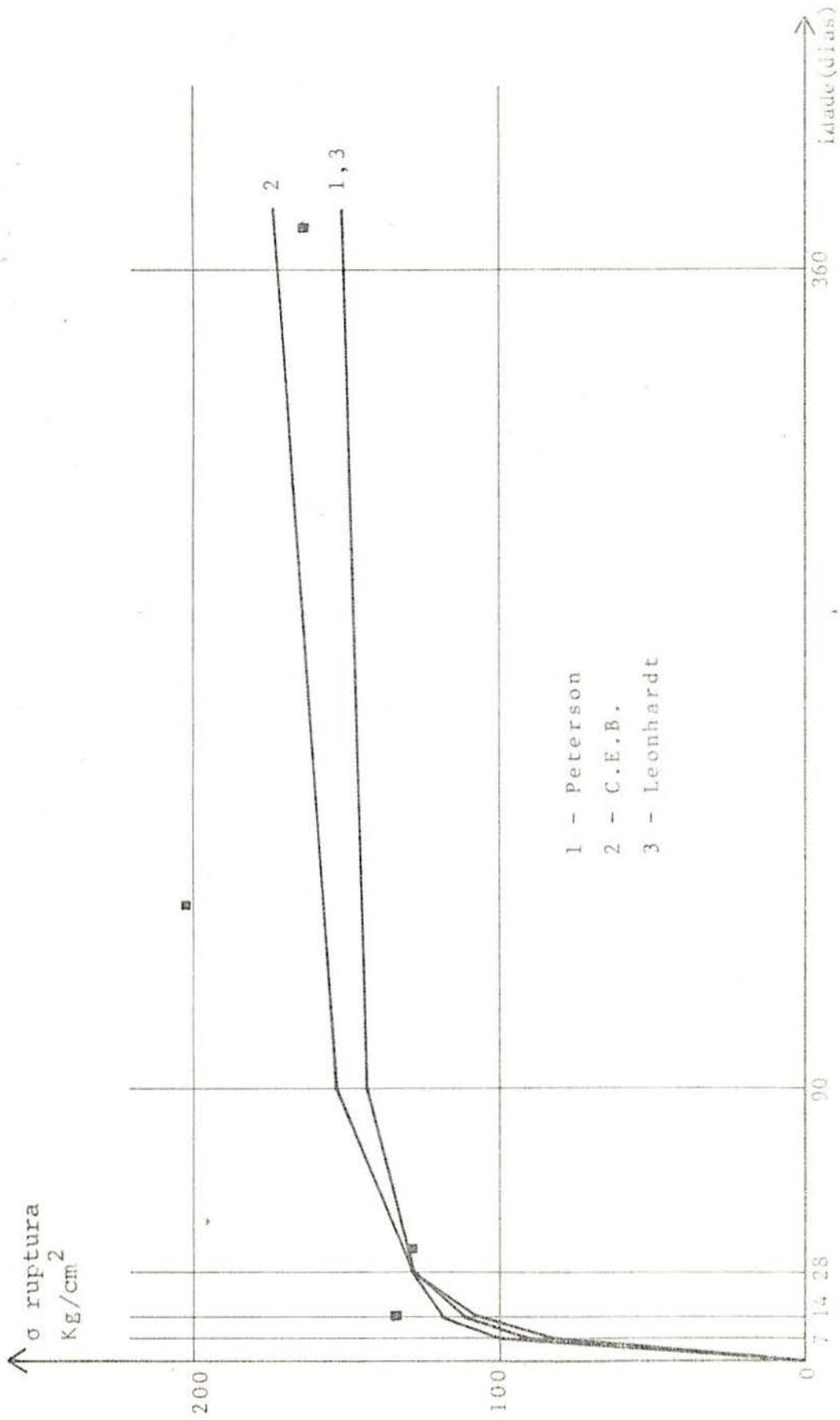


GRÁFICO 5.11 - Ensaaios de Compressão simples

Quadro 5.4
Ensaio à compressão simples

Nº de corpos ensaiados	Idade (dias)	Resistência média a ruptura (kg/cm ²)	Desvio padrão
6	14	133,77	11,75
6	36	127,53	11,24
3	150	203,40	5,24
6	372	163,86	23,46

5.2.2 - Tração indireta

Foram feitos ensaios à compressão diametral (ensaio brasileiro), conforme Fig. 5.8, de 6 corpos de prova, com idade de 372 dias, cujos resultados encontram-se no quadro 5.5.

Quadro 5.5
Ensaio de tração indireta

C.P.	Carga de ruptura P em kg	Tensão de tração σ_T em kg/cm ²
1	2350	24,73
2	2250	23,68
3	2150	22,62
4	2330	24,52
5	2830	29,78
6	2340	24,62

Onde:

$$\sigma_T = \frac{2 P}{\pi D l} \quad (\text{ref. 14})$$

Sendo:

- P - Carga de ruptura em kg
- D - Diâmetro do corpo de prova
- l - Comprimento do corpo de prova

Obtendo-se como valores médios:

$$\text{Tensão média de tração} = 24,99 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Desvio padrão} = 2,26 \text{ kg/cm}^2$$

Fig. 5.7 - Ensaio de compressão simples

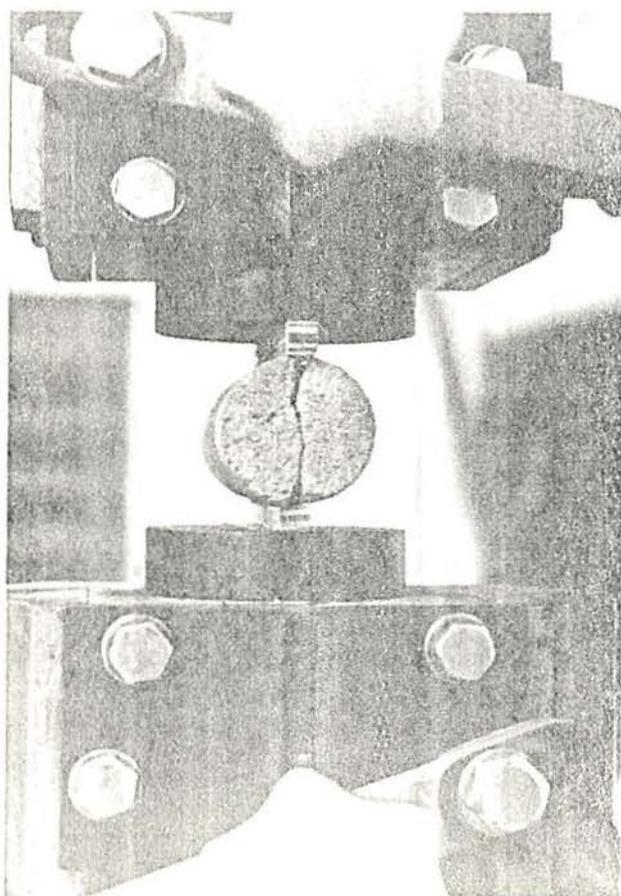
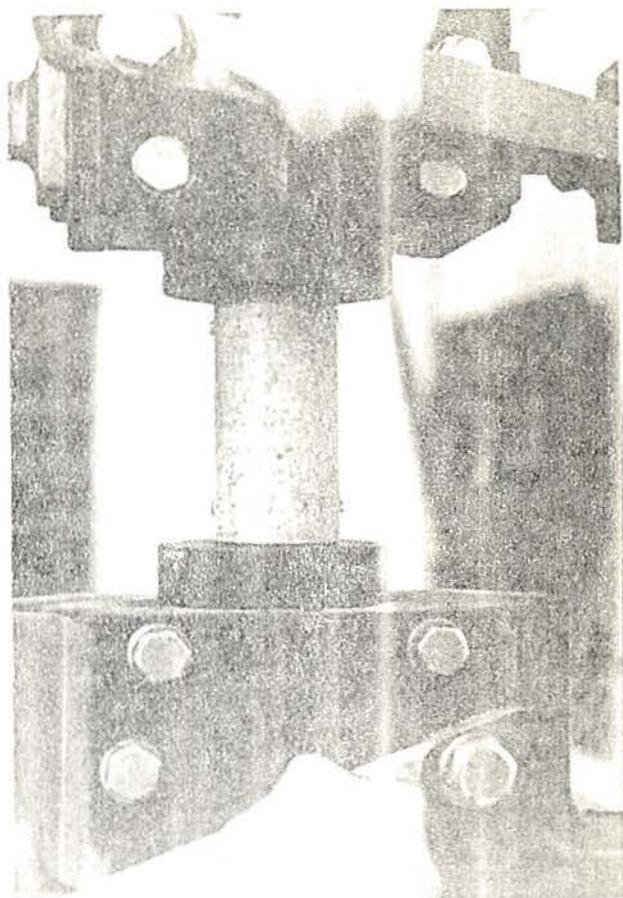


Fig. 5.8 - Ensaio de tração indireta

5.2.3 - Tração na flexão

Quando da confecção das fôrmas do modelo, com a finalidade de testar os materiais desta fôrma e a melhor maneira de concretar, foram montadas duas pequenas fôrmas, de isopor revestido e acrílico, Fig. 5.9a,b, com dimensões 40x10x3 cm, com as quais se concretou duas pequenas vigas.

Estas serviram para mostrar o bom funcionamento das fôrmas e foram posteriormente ensaiadas à flexão com a finalidade de obtenção de mais alguns parâmetros relativos ao microconcreto, tais como, tensão de tração na flexão, momento de ruptura, e outros.

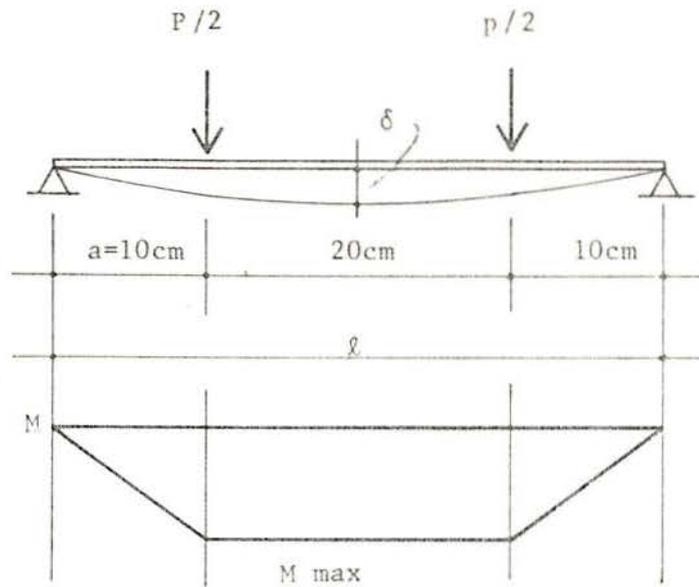
Foram feitos dois ensaios, diferentes entre si quanto à atuação da carga, mas utilizando basicamente o mesmo equipamento que será descrito a seguir: como mostram as Figs. 5.10 e 5.11, o sistema é composto por uma viga de microconcreto (1), com as dimensões mencionadas acima, apoiada sobre dois roletes de aço (2), os quais repousam sobre dois perfis metálicos (3) presos a um bloco de madeira (4).

Todo este conjunto foi colocado em uma prensa manual, Fig. 5.12, que, através de um anel dinamométrico (5), aplicava a carga em uma chapa de aço (6) que, por sua vez, transmitia à viga, através de dois outros roletes de aço. Sob a viga em teste, havia um deflectômetro com precisão de 0,0001" (7) que, protegido por uma chapa metálica (8), acusava as variações de deflexão no ponto médio do vão (de 40 cm).

A diferença entre dois ensaios foi que um deles, o descrito acima, recebeu a atuação de duas cargas concentradas, iguais e simétricas, que produziam uma região de momentos constantes, enquanto o outro sofria a atuação de somente uma carga concentrada, no meio do vão (este de 20 cm), obtida pelo contato direto do anel dinamométrico em um rolete, sem a utilização da chapa de aço (6).

Esquema dos ensaios

Ensaio 1:



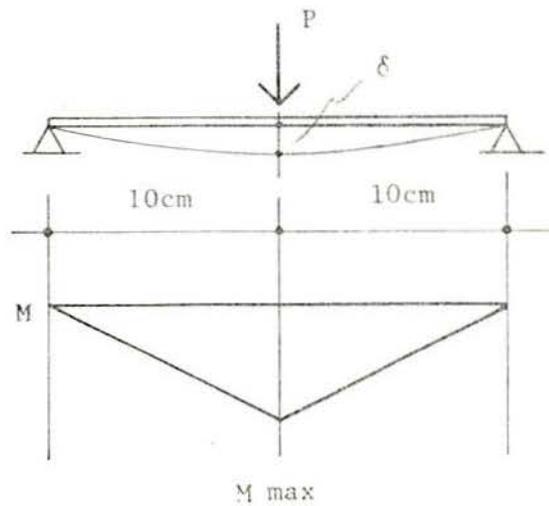
$$M_{\max} = 5P \text{ (kg/cm)}$$

$$\sigma_T = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{P}{3} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\delta_{\max} = \frac{Pa}{12EI} \left(\frac{3}{4} l^2 - a^2 \right) = 40,74 \frac{P}{E} \text{ (cm)}$$

$$b = 10 \text{ cm}, \quad h = 3 \text{ cm}$$

Ensaio 2:



$$M_{\max} = 5 P \text{ (kg/cm)}$$

$$\sigma_T = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{3P}{h^2} = 0,293 P \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\delta_{\max} = \frac{Pl^3}{48EI} = 6,1035 \frac{P}{E} \text{ (cm)}$$

$$b = 10 \text{ cm, } h = 3,2 \text{ cm}$$

h = altura medida na seção de ruptura.

Os resultados obtidos destes ensaios encontram-se no quadro 5.6 e também no gráfico 5.12, onde traçou-se, a partir dos pontos, as retas aproximadas e que melhor os representam, com as quais se obteve as deflexões δ_1 e δ_2 para a obtenção dos módulos de elasticidade aproximados.

Quadro 5.6
Ensaio de tração na flexão

Carga P no centro do vão em kg	δ no centro do vão em mm	
	Ensaio 1	Ensaio 2
0	0	0
10	0,0330	0,0051
20	0,0635	0,0108
30	0,0914	0,0152
40	0,1161	0,0204
50	0,1410	0,0250
60	0,1651	0,0301
70	0,1905	0,0335
80	0,2179	0,0382
90	0,2433	0,0416
100	0,2756	0,0454
110	0,3048	0,0488
120	0,3454	0,0530
130	-	0,0584

Fig. 5.9a - Fôrmas

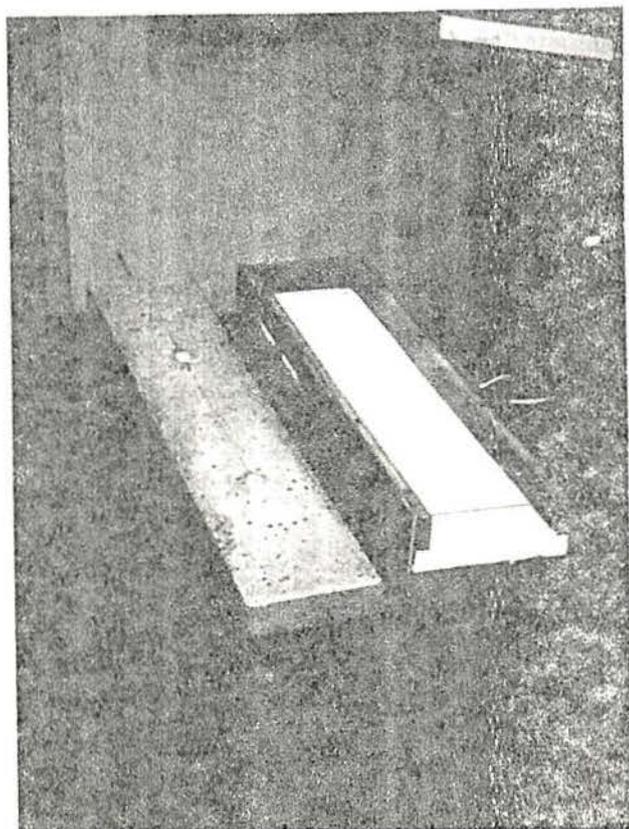
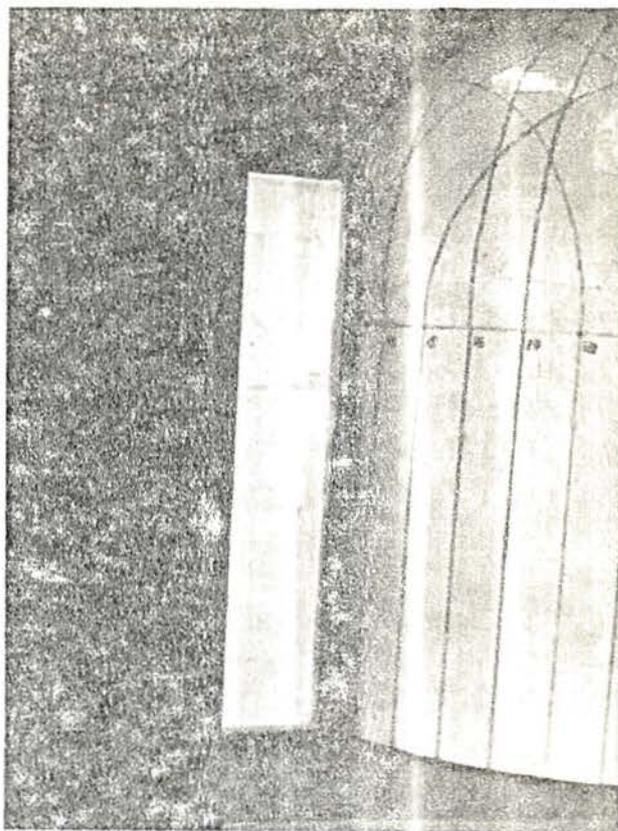
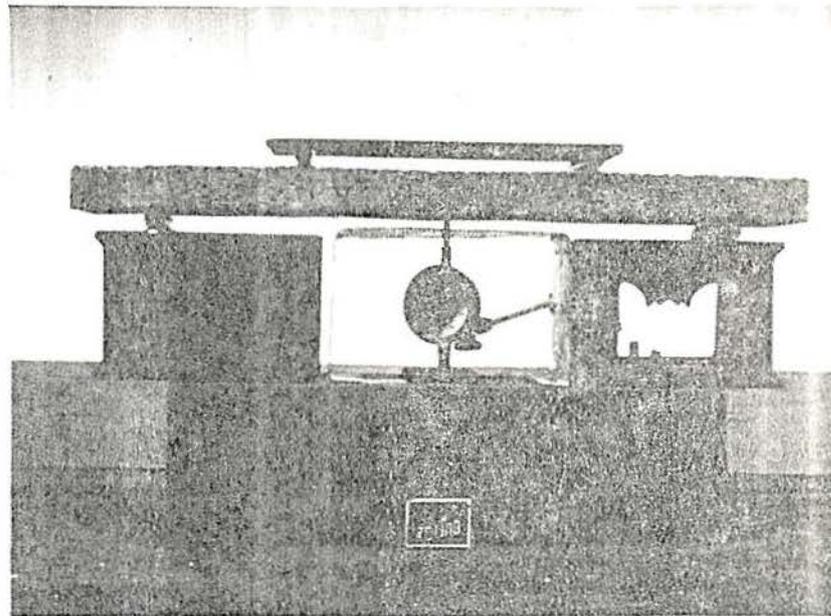
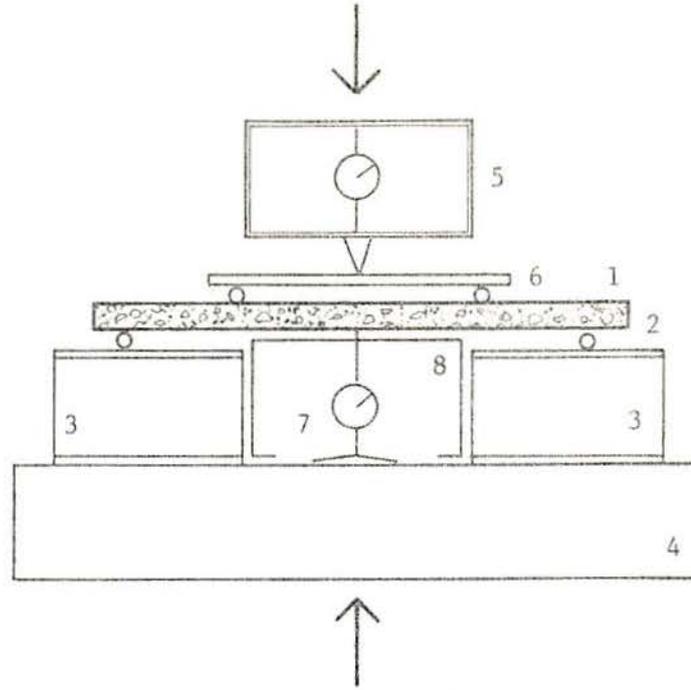


Fig. 5.9b - Viga de teste



Figs. 5.10 e 5.11 - Ensaio de tração na flexão

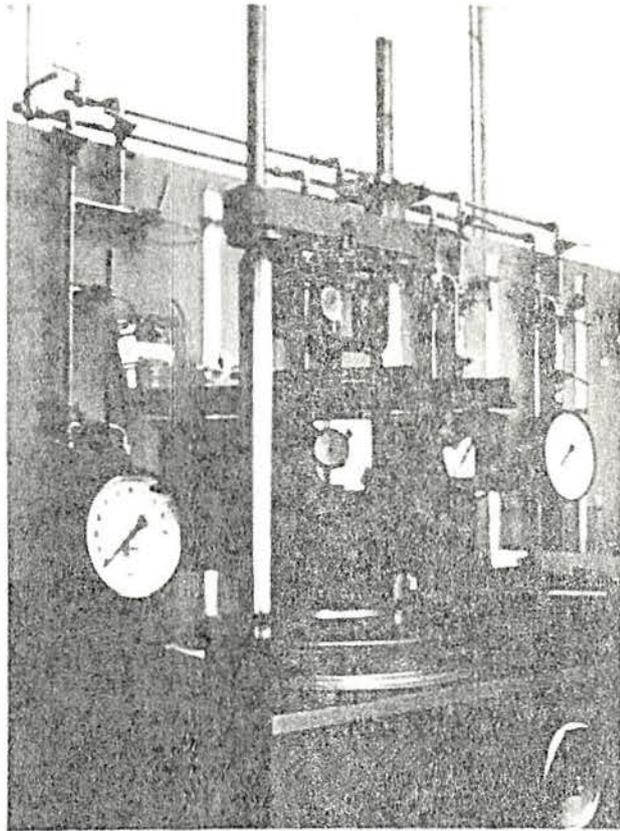


Fig. 5.12 - Ensaio de tração na flexão

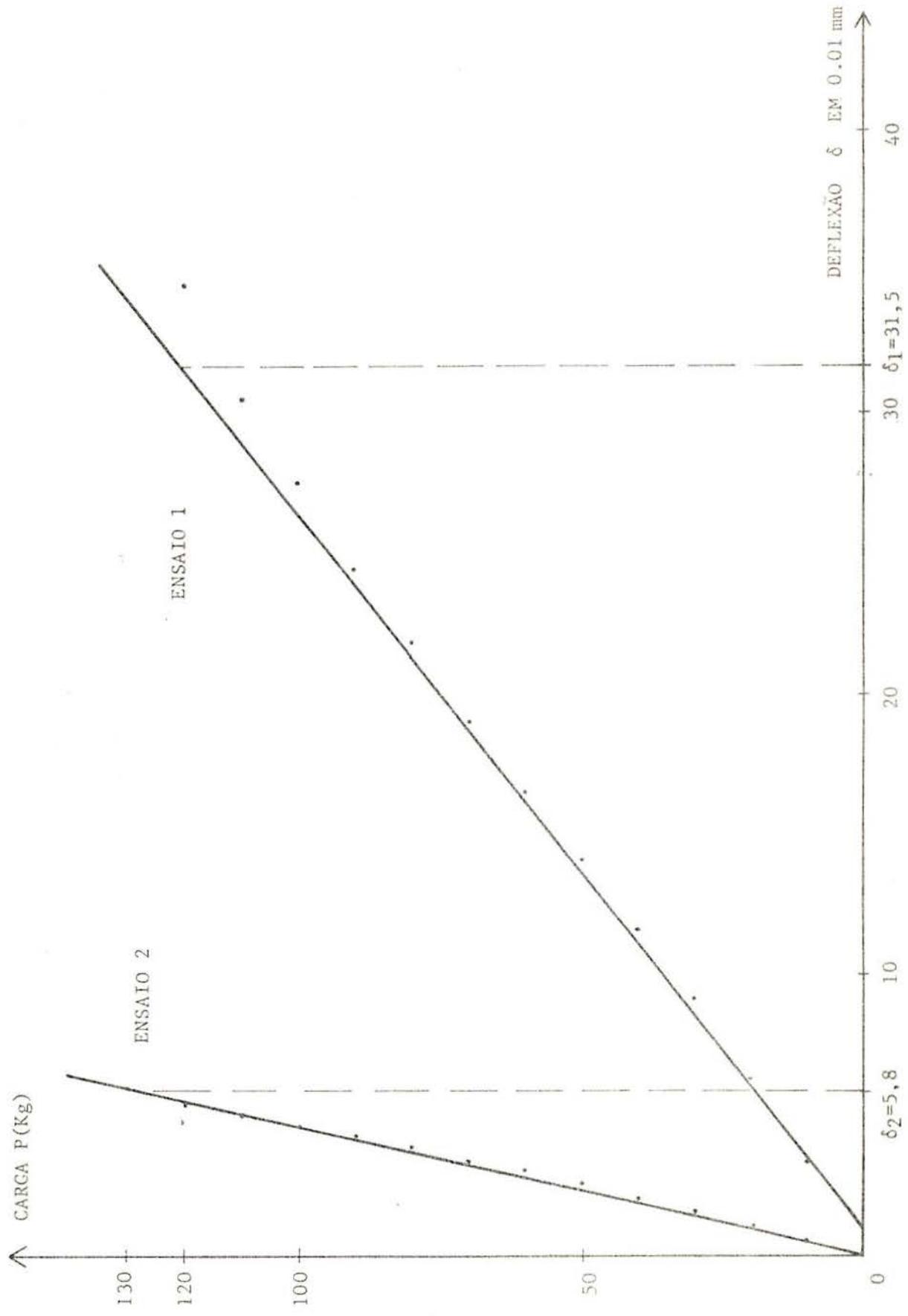


GRÁFICO - 5.12 Ensaio de tração na flexão

A partir destes resultados, podem-se obter as seguintes conclusões:

Ensaio 1:

$$E = 40,74 \frac{P}{\delta_1} = 40,74 \frac{120}{0,0315} = 155200 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{rup} = 5 P_{rup} = 600 \text{ kg/cm}$$

$$\sigma_{T_{rup}} = \frac{P_{rup}}{3} = 40 \text{ kg/cm}^2$$

Ensaio 2:

$$E = 6,1035 \frac{P}{\delta_2} = 6,1035 \frac{130}{0,0058} = 136800 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{rup} = 5 P_{rup} = 650 \text{ kg/cm}$$

$$\sigma_{T_{rup}} = 0,293 P_{rup} = 38,1 \text{ kg/cm}^2$$

que se encontram no quadro 5.7.

Quadro 5.7

Ensaio de tração na flexão

Ensaio	1	2
M_{rup} momento de ruptura	600	650
T_{rup} tensão de tração de ruptura	40	38
E módulo de elasticidade	155200	136800

5.2.4 - Curva tensão-deformação

Para a determinação da curva tensão-deformação do microconcreto utilizado, foram ensaiados 3 corpos de prova, dos 30 moldados junto à concretagem do modelo, com idades de 150 dias.

O ensaio consistiu na aplicação de uma carga axial, gradativa, nos corpos de prova e na determinação de suas deformações específicas através do sistema mostrado nas Figs. 5.13a,b.

Como mostra a Fig. 5.13a, este sistema consiste em dois quadros metálicos (2), ligados entre si e ao corpo de

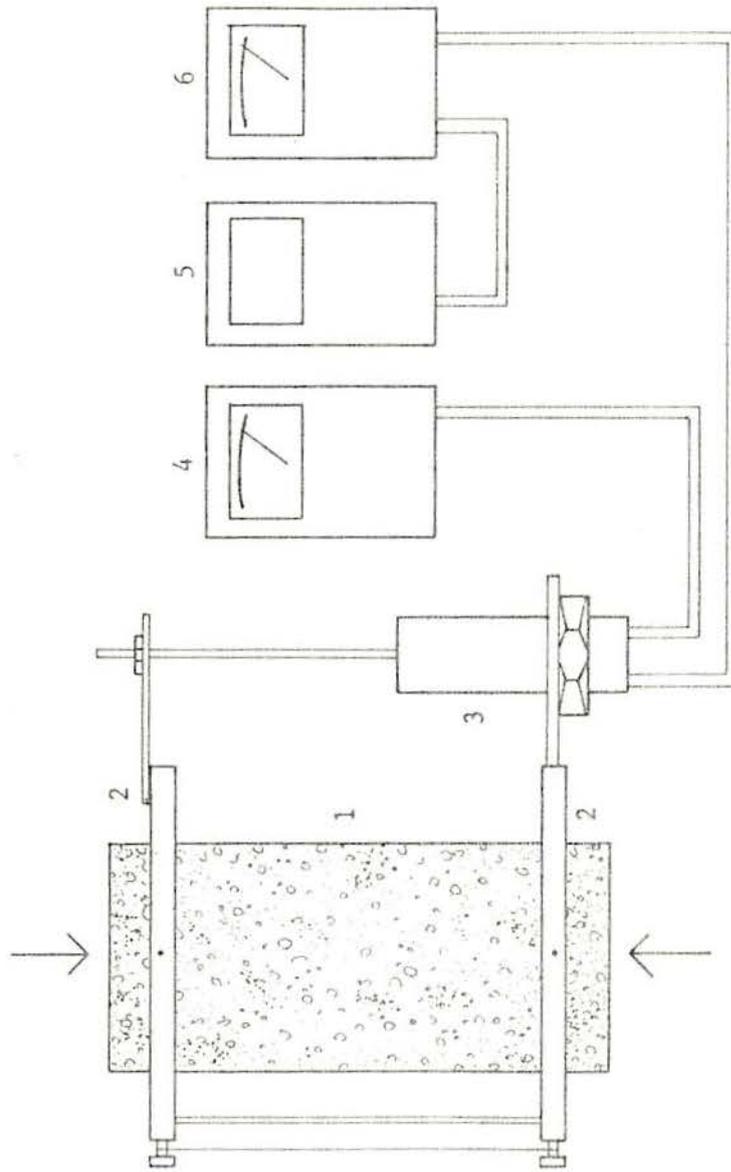


Fig. 5.13a - Sistema utilizado para a determinação da curva tensão-deformação

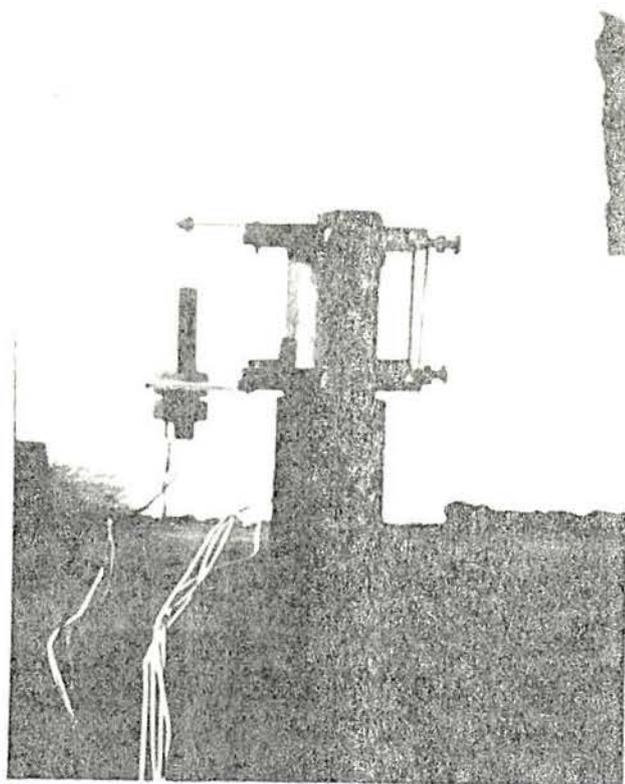


Fig. 5.13 - Corpo de prova e LVDT

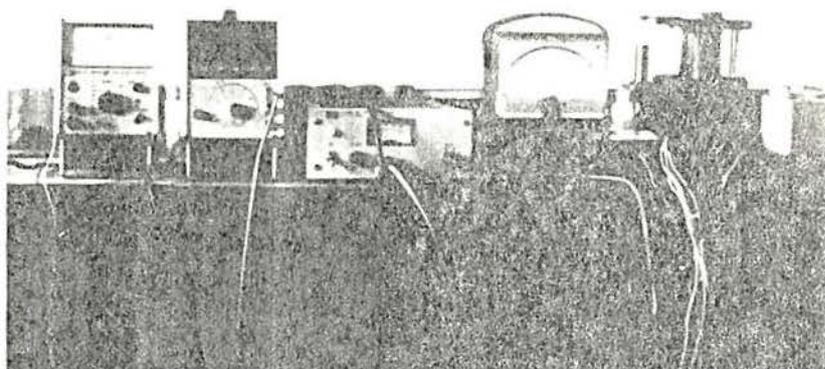
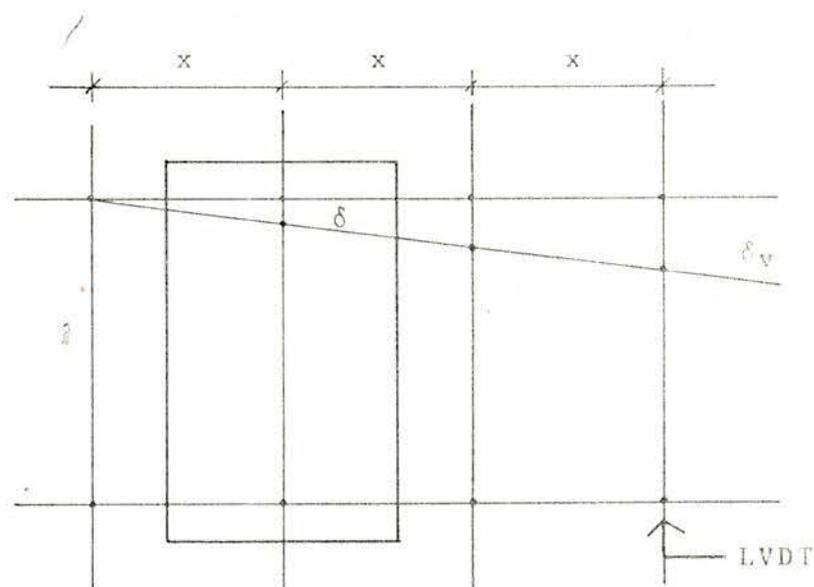


Fig. 5.14 - Aparelhagem auxiliar

prova (1), aos quais encontra-se preso um LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), sendo este último alimentado por uma fonte de corrente contínua (6) de 6 volts, controlada por um voltímetro digital (5) e quando da deformação do corpo de prova este LVDT transmite uma variação de voltagem a um segundo voltímetro (4), a qual é transformada, através das equações características do sistema, eq. a e eq. b, em deformações específicas.

Equações de transformação:



onde:

- δ - deformação real do corpo de prova,
- δ_v - deformação acusada no voltímetro (4),
- ℓ - distância entre os pontos em que os quadros (2) ligam-se ao corpo de prova referente à qual é determinada a deformação específica.

Sendo:

$$\delta_v = 3\delta,$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{\ell} = \frac{\delta_v}{3\ell}$$

$$\ell = 8,00 \text{ cm} = 3,149''$$

$$\delta_v(1'') \rightarrow 33,3 \text{ V},$$

$$\delta_v(1\mu'') \rightarrow 33,3\mu\text{V}$$

$$\delta_v(1\mu") \rightarrow \epsilon = \frac{1\mu"}{3 \cdot 3,149"} = 0,1058 \mu"/" \rightarrow 33,3\mu V$$

$$\epsilon = 1 \mu"/" \rightarrow 314,7 \mu V \quad (\text{eq. a})$$

$$1 \text{ mV} \rightarrow 3,18 \mu"/" \quad (\text{eq. b})$$

As curvas obtidas nestes ensaios encontram-se no gráfico 5.13 e alguns valores característicos de interesse estão contidos no quadro 5.7.

Quadro 5.7

Valores obtidos nos ensaios para a determinação da curva tensão-deformação

C.P.	Ruptura			Módulo de Elasticidade inicial (kg/cm ²)
	carga (kg)	tensão(kg/cm ²)	deformação(%)	
1	4700	197,8	2,68	162000
2	4800	202,0	2,42	150000
3	5000	210,4	2,30	145000

5.2.5 - Coeficiente de Poisson

Foi feito um ensaio para a determinação do coeficiente de Poisson do microconcreto, utilizando-se um corpo de prova, semelhante aos usados nos demais ensaios citados, o qual foi instrumentado com quatro strain gages, colocados nas posições indicadas na Fig. 5.15.

Este corpo de prova foi colocado em uma prensa e solicitado à compressão simples axial, com cargas de até 2000 kg (84,18 kg/cm²), sendo que a cada intervalo de 100 kg foram determinados os valores das deformações específicas médias longitudinais e transversais, as quais encontram-se representadas no gráfico 5.14.

A Fig. 5.16 mostra um esquema da colocação do corpo de prova na prensa, onde vê-se um sistema de centramento composto por duas chapas de aço e uma esfera, a qual tem a fina-

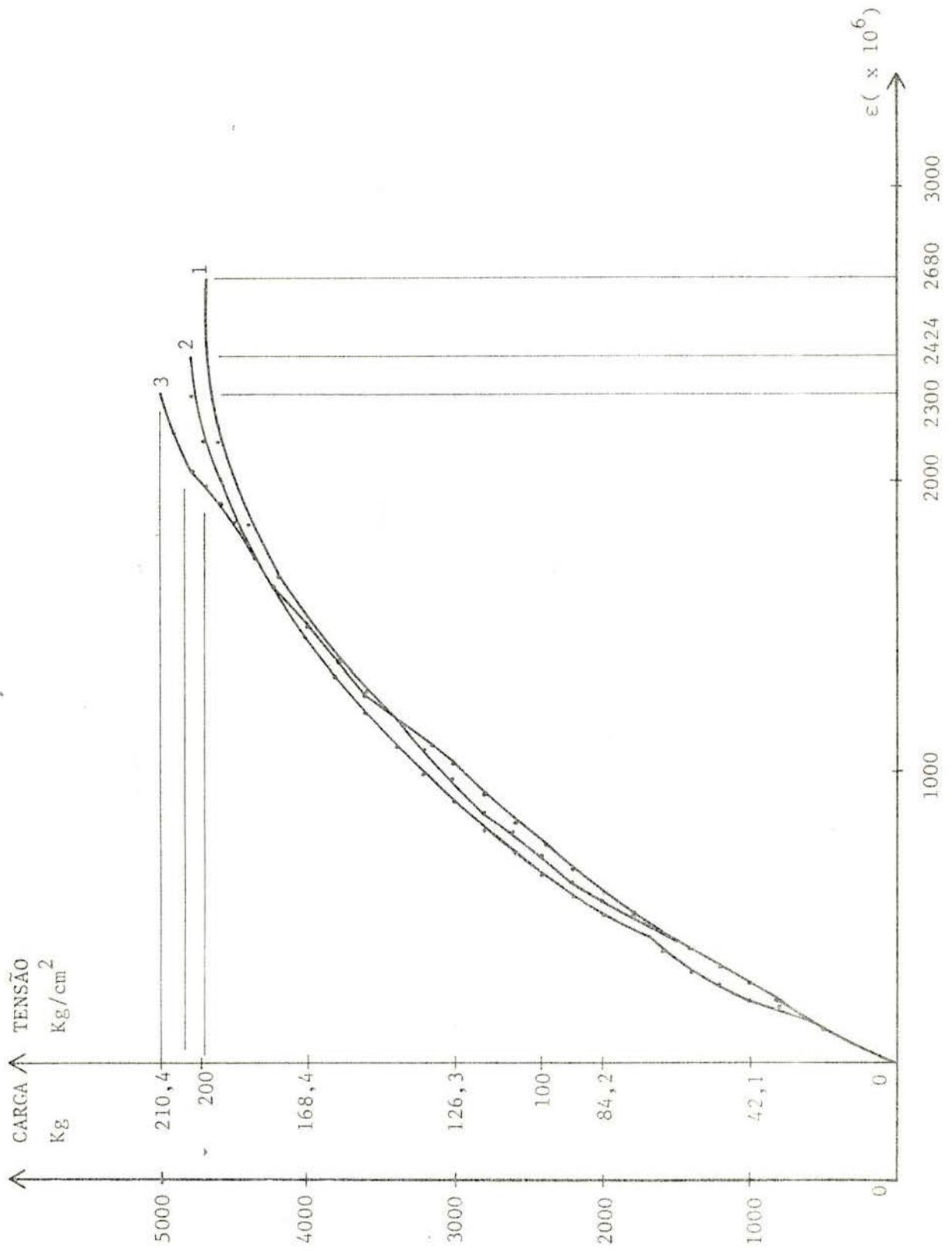


GRÁFICO 5.13 - Curva tensão-deformação do microconcreto

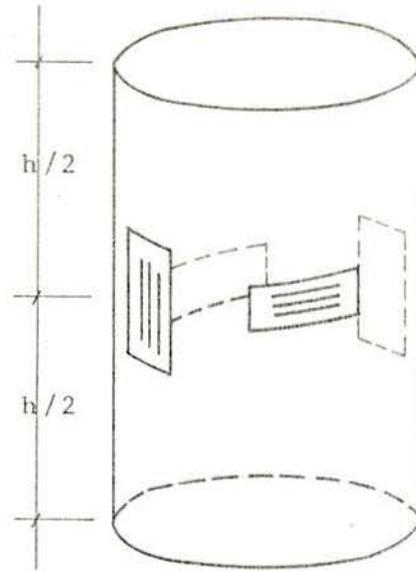


Fig. 5.15 - Posição dos "strain gages"

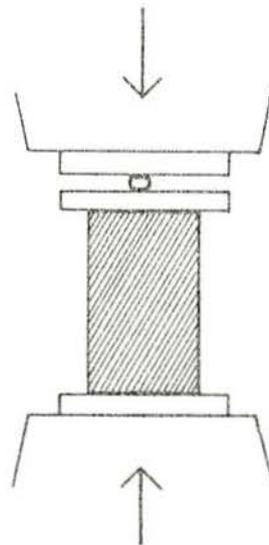


Fig. 5.16 - Ensaio de Poisson

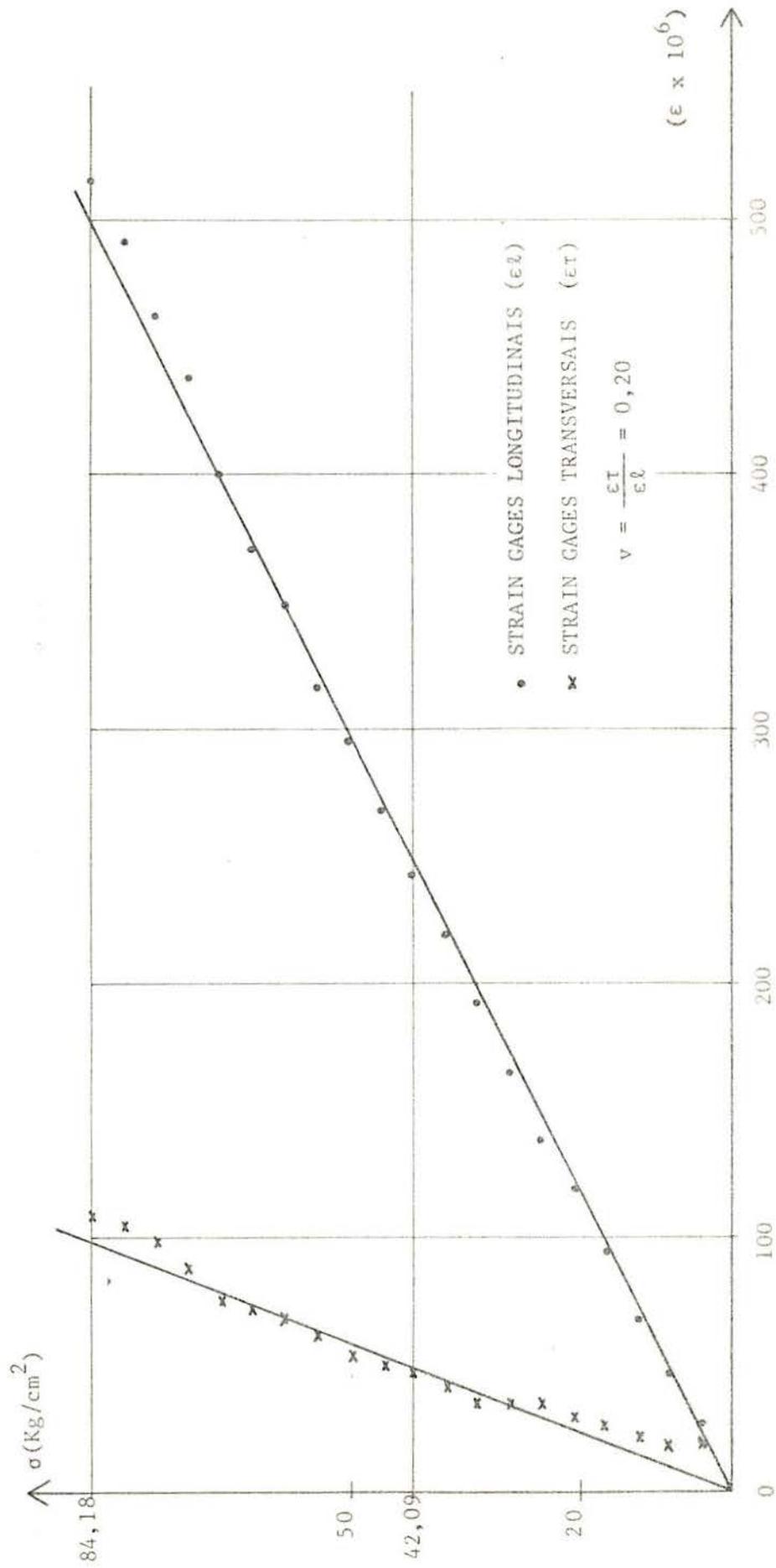


GRÁFICO 5. 14 - Ensaio para a determinação do coeficiente de Poisson

lidade de manter a carga centrada em relação a chapa inferior que também se encontra centrada em relação ao corpo de prova.

Através deste ensaio, como pode ser observado no gráfico 5.14, chegou-se a um coeficiente de Poisson de aproximadamente $\nu = 0,2$.

5.3 - Aparelhagem de medição e equipamentos

5.3.1 - Strain gages

Foram utilizados 100 strain gages, de diferentes tipos, sendo que, destes, 76 foram colados diretamente no modelo (item 4.11), 20 aplicados às 5 células de carga confeccionadas para o modelo (item 5.3.3) e 4 em um corpo de prova para a determinação do coeficiente de Poisson do microconcreto (item 5.2.5).

Os strain gages utilizados, tanto no modelo, como no corpo de prova, foram de dois tipos: base de papel com grade colada e base de poliéster, fotoimpressos, ambos com terminais, fabricados pela Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd. e com as seguintes características:

- Tipo KC-10-A1-11
 - Comprimento da grade: 10 mm
 - Resistência: $120.2 \pm 0.3 \Omega$
 - Gage factor: $2.07 \pm 1 \%$
- Tipo KC-20-A1-11
 - Comprimento da grade: 20 mm
 - Resistência: $119.8 \pm 0.3 \Omega$
 - Gage factor: $2.10 \pm 1 \%$
- Tipo KC-30-A1-11
 - Comprimento da grade: 30 mm
 - Resistência: $119.8 \pm 0.3 \Omega$
 - Gage factor: $2.10 \pm 1 \%$

Os strain gages utilizados nas células de carga foram do tipo base de papel com grade colada, com e sem terminais, fabricados pela BLH Electronics Inc. e com as seguintes

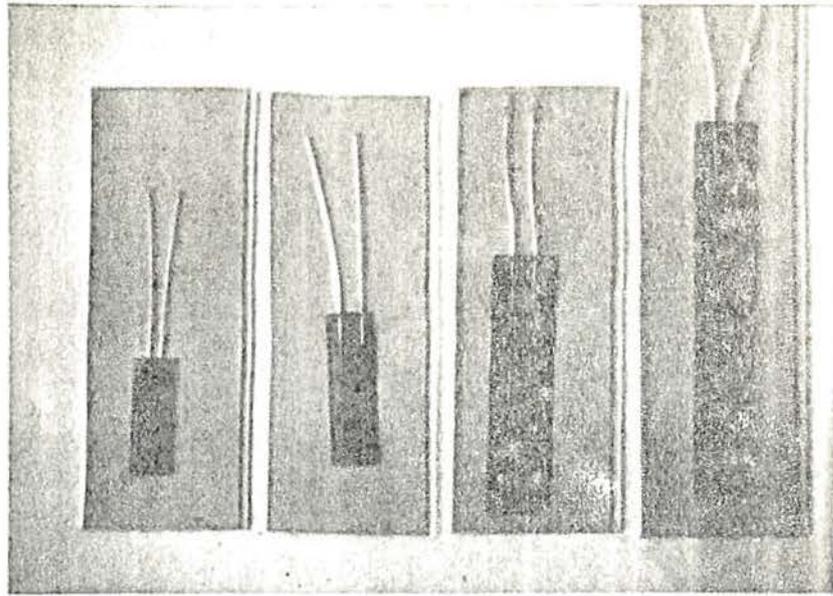


Fig. 5.17 - "Strain gages" utilizados

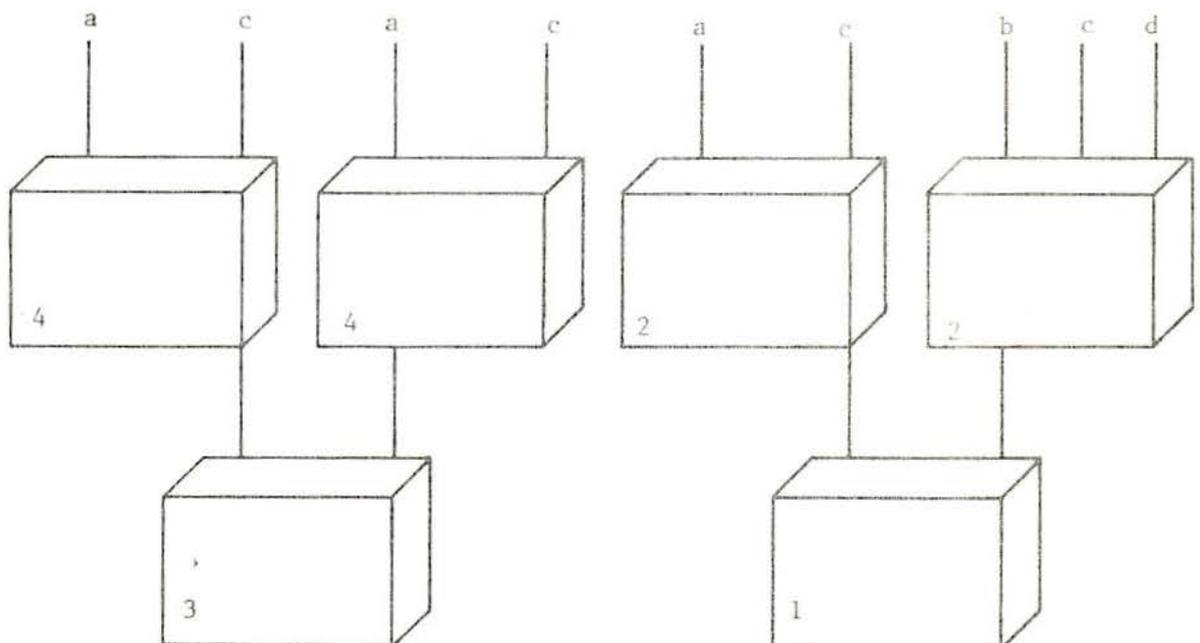


Fig. 5.18 - Esquema de ligação dos aparelhos

características:

- Tipo FAB-03N-1256 (com terminais)
 - Comprimento total: 7 mm
 - Resistência: $120.0 \pm 0.2 \Omega$
 - Gage factor: $2.02 \pm 2 \%$
- Tipo FAE-50-1256 (sem terminais)
 - Comprimento total: 10 mm
 - Resistência: $120.0 \pm 0.2 \Omega$
 - Gage factor: $2.06 \pm 1 \%$

5.3.2 - Strain indicators

Para a leitura dos strain gages do modelo e das células de carga, foram utilizados dois strain indicators e quatro Switching and Balancing Units, todos fabricados pela BLH Electronics Inc., ligados de acordo com o esquema da Fig. 5.18 e com as seguintes características:

(1) - Strain indicators modelo 120C: um modelo de leitura manual, em micropolegada por polegada.

(2) - Switching and Balancing Units modelo 225: duas unidades, cada uma com 10 canais, ligados ao SI(1), com as quais se podia ler 15 strain gages e 5 células de carga.

(3) - Portable digital strain indicator modelo 1200: um modelo digital com leitura em micropolegada por polegada.

(4) - Switching and Balancing Units modelo 1225: duas unidades, cada uma com 10 canais, ligados ao SI(3), com as quais eram lidos 20 strain gages.

5.3.3 - Células de carga

Devido à necessidade de manterem-se equilibradas e controladas as forças de protensão, assim como também a carga externa localizada, construíram-se 5 células de carga, com capacidade para 6000 kg, uma vez que já se possuía uma para 15000 kg e uma para 1500 kg.

Essas 5 células; cuja forma interna pode ser vista na Fig. 5.19, foram aferidas em uma prensa hidráulica através de um anel dinamométrico de grande precisão, Fig. 5.20, de onde se obteve o gráfico 5.15, que representa a relação

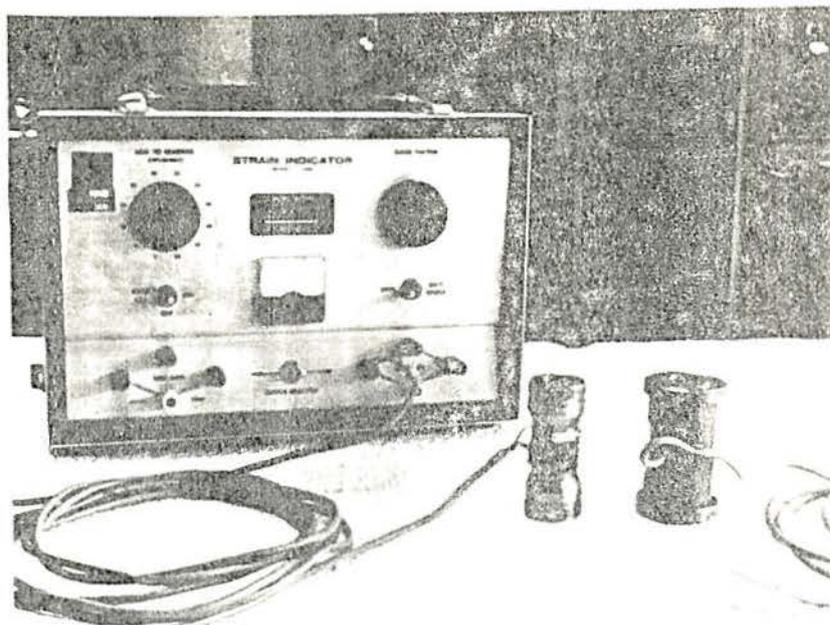


Fig. 5.19 - Células de carga

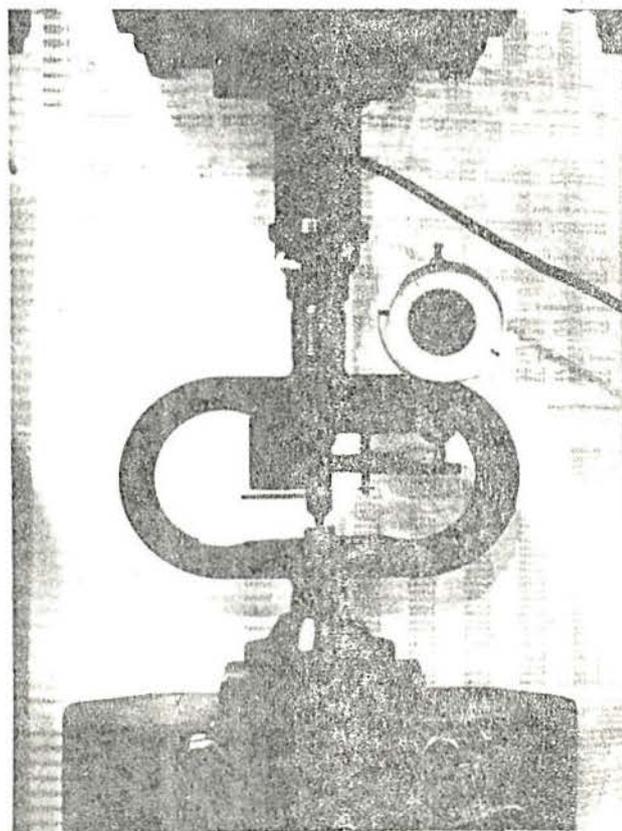
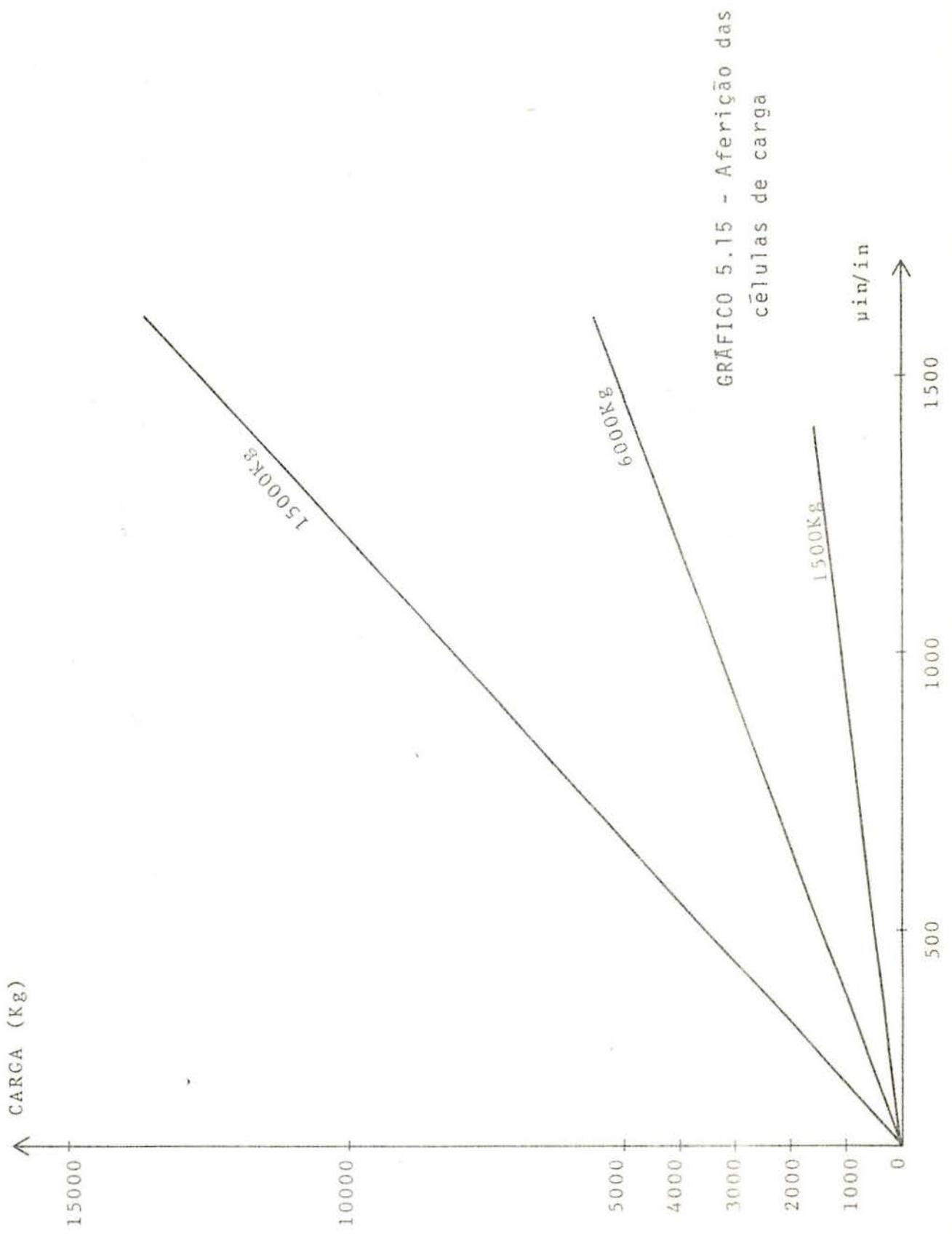


Fig. 5.20 - Aferição das células de carga



entre a carga aplicada à célula e a deformação, lida por um strain indicator, de seus 4 strain gages, ligados em forma de uma ponte de Wheatstone¹⁸ com os quatro braços ativos.

5.3.4 - Deflectômetros

Foram utilizados 32 deflectômetros, sendo, destes, 29 colocados nas posições já citadas no item 4.12, cuja relação e características estão transcritas no quadro 5.8.

Quadro 5.8
Relação dos deflectômetros utilizados

Marca	Precisão	Curso máximo	Quantidade
Starrett	1/100 mm	10 e 30 mm	19
C.S.E.	1/100 mm	50 mm	4
Baty	1/1000 pol.	10 mm	3
John Bull	2/1000 mm	10 mm	3
Käfer	1/1000 mm	5 mm	3

5.3.5 - Equipamentos auxiliares

No desenrolar dos ensaios, tanto do modelo em si como de vários ensaios preliminares, foi utilizada uma série de equipamentos, alguns já mencionados em itens anteriores, que será mostrada a seguir, simplesmente na forma de uma relação:

- macacos hidráulicos para 10000 e 30000 kg, com bombas de comando à distância, marca FAREX.
- prensas hidráulicas para 10000 e 60000 kg, da Web-Thüringer Industriewerk;
- anel dinamométrico para 6000 kg da Pgh-Kraftmessgeräte, Halle/Saale;
- prensa para 2000 kg (multispeed Triaxial Press, 2 tons max. load - Type Mossco) da Geonor;
- anel dinamométrico para 400 kg da Geonor;
- Transdutor de deslocamentos lineares variáveis (LVDT), da Hewlett Packard, (item 5.2.4) com as seguintes características:
Modelo: 70 CDT-050

Voltagem de entrada: 6 V DC
Intervalo: $\pm 0,50$ in
Fator de escala: 33,3 V DC/in
Linearidade: ± 0.5 % full scale

- Fonte (6203 B DC Power Supply, 0-40 V, 3 A, 0-20 V, 6 A) da Hewlett Packard.

- Voltímetro digital (3469 B Multimeter) da Hewlett Packard;

- Voltímetro (Vacuum Tube Voltmeter model K-142) da Kyoritsu;

- Voltímetro (4304 B DC Volt-Am meter) da Hewlett Packard.

CAPÍTULO 6

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS NO MODELO

6.1 - Introdução

Neste capítulo faz-se uma descrição detalhada de como foram procedidos os ensaios do modelo, relativos a todos os carregamentos já mencionados. Apresentam-se também todos os problemas ocorridos em cada um deles e as soluções encontradas, quando houve.

Alguns problemas que, entretanto, atingiram a todos os ensaios, de uma maneira geral, são relacionados a seguir.

Como pode ser lido no item 4.11, foram aplicados ao modelo 76 strain gages e, como foi descrito no item 5.3.2, as aparelhagens de leitura tinham capacidade de manter conectados apenas 35 strain gages e mais as células de carga utilizadas.

Para que fosse possível obter-se leituras de todos os strain gages em um mesmo ensaio, seria necessário que se lessem os primeiros 35 strain gages, que estes fossem desconectados e outros 35 fossem ligados aos mesmos terminais e lidos, para que se pudesse, então, passar a uma nova etapa de carga, onde novamente repetir-se-ia o mesmo processo. Restariam ainda 6 strain gages que deveriam ser lidos ou com outra aparelhagem adicional ou, então, em uma terceira etapa dentro do processo descrito acima.

Isto, entretanto, acarretaria a cada etapa de carregamento, dentro de um mesmo ensaio, a necessidade de serem ligados e desligados 152 fios que aos pares deveriam ficar em suas posições pré-estabelecidas.

Pode-se facilmente imaginar que um processo como este, além de ser tremendamente moroso, facilmente incorreria em erros que dificilmente poderiam ser corrigidos, uma vez que

após desconectado um grupo de fios, não mais se saberia qual dentre eles foi o fio mal conectado.

Para evitar estes problemas, foram confeccionadas chapas de contato, para que se pudesse conectar simultaneamente um grupo de fios, não permitindo, desta forma, a inversão de nenhum deles.

Estas chapas, feitas em fibra de vidro e revestidas com um material condutor (chapas usadas para a confecção de circuitos impressos) tinham um dos bordos ligados ao conjunto de fios enquanto o outro era ligado a um conector que, por sua vez, ligava-se aos aparelhos de leitura dos strain gages.

Estas chapas, entretanto, não produziram bons resultados, pois não apresentavam um contato suficientemente firme e produziam uma grande flutuação na leitura dos strain gages, por serem estes de grande sensibilidade.

Além disto, o maior problema encontrado foi o de que um grupo de strain gages quando desligado e ligado novamente não apresentava o mesmo valor "zero" e isto ocorria não somente com as chapas de contato, mas também com um strain gage isolado, ligado diretamente ao aparelho de leitura.

Isto, então, descartou totalmente a possibilidade de serem permutados strain gages dentro de uma mesma etapa de carga e impôs, então, que um ensaio fosse completado lendo-se somente os strain gages de um grupo de 35 e, para que os demais fossem também lidos, um novo ensaio deveria ser feito.

Um outro problema encontrado foi o de que os indicadores de deformação (strain indicators) apresentavam uma certa flutuação no valor zero, ou seja, um strain gage ligado a eles, sem que estivesse solicitado, apresentava valores de deformação variáveis.

Através de observação, notou-se que esta variação, tanto no sentido positivo como no negativo, apresentava-se praticamente constante para cada strain gage, ou seja, cada strain gage apresentava uma deformação fictícia que aumentava em função do tempo.

Esta deformação fictícia, limitada pela reta b-b

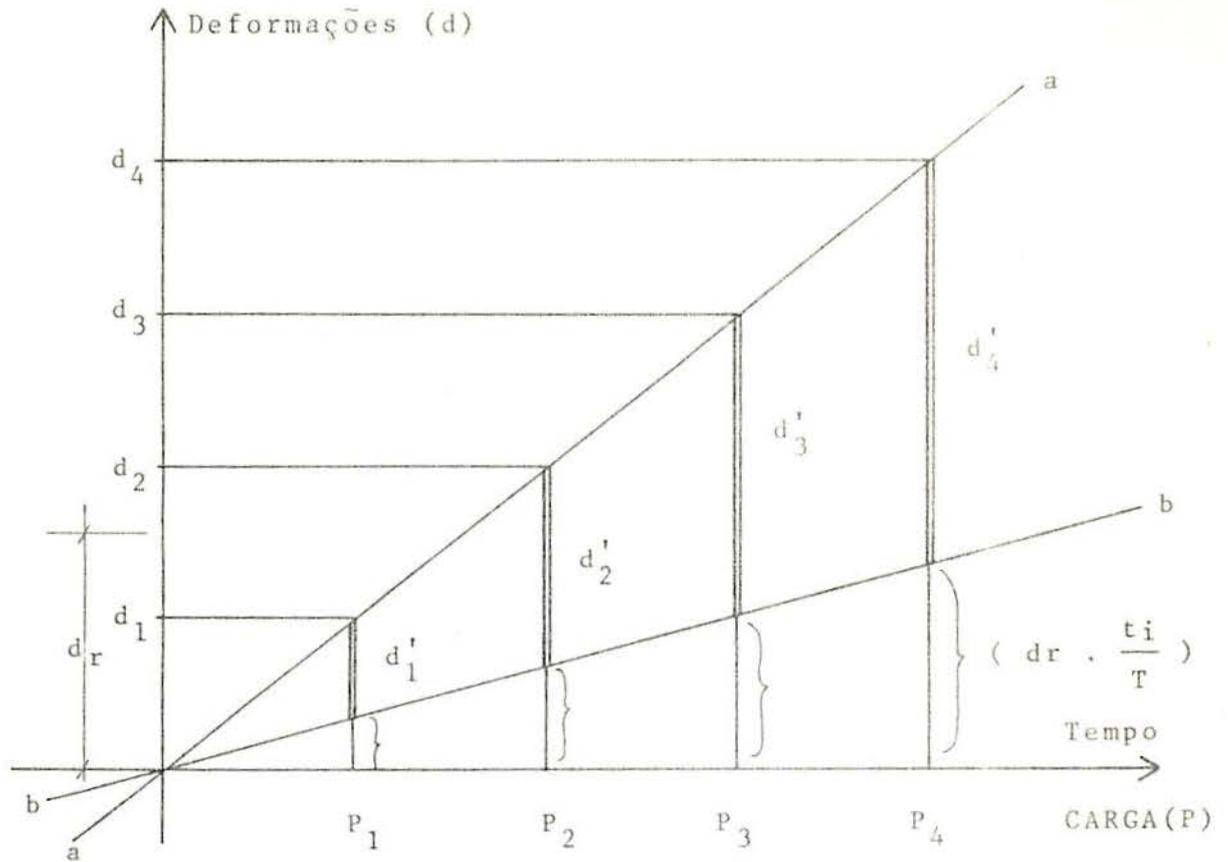


Fig. 6.1 - Determinação das deformações reais nos strain gages

$$d'_i = d_i - \left(d_r \frac{t_i}{T} \right) \quad \text{eq. 1}$$

onde:

- $P_1, P_2, P_3 \dots$ - Etapas de carregamento
- $d_1, d_2, d_3 \dots$ - Deformações lidas em cada etapa, acrescidas da deformação fictícia
- d_r - Deformação remanescente total, ao cabo do tempo T
- T - Tempo gasto para completarem-se as etapas de carregamento e o descarregamento da estrutura
- t_i - Tempo gasto para cada etapa de carregamento
- d'_i - Deformação real em cada etapa, já descontada a deformação fictícia
- $\left(d_r \frac{t_i}{T} \right)$ - Deformação fictícia em cada etapa
- $\overline{b-b}$ - Reta que define o valor "zero" dos strain gages

na Fig. 6.1, era descontada dos resultados apresentados em um ensaio, da seguinte maneira:

Procedidas as etapas de carregamento P_i , em cada uma delas era determinada uma deformação d_i , para cada strain gage. Após o descarregamento da estrutura, quando a deformação do strain gage deveria voltar a zero, de onde partiu, era determinada uma deformação remanescente total d_r .

Supondo-se que esta deformação cresceu de zero até o valor máximo d_r de uma maneira constante, pode-se, então, de terminar as deformações fictícias referentes a cada etapa de carregamento, como:

$$d_r \frac{t_i}{T}$$

E as deformações reais d_i' em cada etapa de carregamento, como:

$$d_i' = d_i - \left(d_r \frac{t_i}{T} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

Um outro fator a ser considerado, e que também traz influência nos resultados de deformações dos strain gages, é a consideração do valor da constante extensométrica (GAGE FACTOR) apropriada, de cada strain gage.

Como foi mostrado no item 5.3.1, os strain gages utilizados neste trabalho apresentam diferentes valores de G.F., porém, com uma série deles ligada a um mesmo indicador de deformações não foi possível selecionar-se a cada um deles o seu respectivo valor de G.F. Selecionou-se, então, no aparelho, um G.F. comum a todos os strain gages e fez-se, depois, a conversão dos resultados mediante os seguintes passos:

, Por definição desta constante

$$G.F. = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (\text{ref. 15})$$

onde:

ϵ - deformação sofrida pelo strain gage
 ΔR - variação de resistência proveniente da deformação ϵ

R - resistência própria do strain gage

A deformação real ϵ_r , no strain gage solicitado, seria obtida com seu G.F. real, $(G.F.)_r$.

$$\epsilon_r = \frac{\Delta R/R}{(G.F.)_r}$$

E a deformação lida, proporcional ao G.F. colocado no aparelho

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{G.F.}$$

Portanto

$$\epsilon_r = \epsilon \frac{G.F.}{(G.F.)_r} \quad (\text{eq. 2})$$

Tendo sido tomado como G.F. comum a todos os strain gages o valor $G.F. = 2,00$ e, tendo estes strain gages valores de $G.F. = 2,07$ e $G.F. = 2,10$, podemos obter as seguintes equações de transformação de deformações.

$$(G.F.)_r = 2,07 \rightarrow \epsilon_r = \epsilon 0,9661835 \quad (\text{eq. 2a})$$

$$(G.F.)_r = 2,10 \rightarrow \epsilon_r = \epsilon 0,9523809 \quad (\text{eq. 2b})$$

Obtidos, então, os valores das deformações específicas, já considerados os problemas de flutuação dos aparelhos e também da influência do G.F., estes foram, em cada ponto, transformadas em momentos fletores e esforços normais, através das equações constantes do quadro 6.1, as quais podem ser obtidas da maneira mostrada a seguir, onde:

$$E = 150.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$h = 3,00 \text{ cm}$$

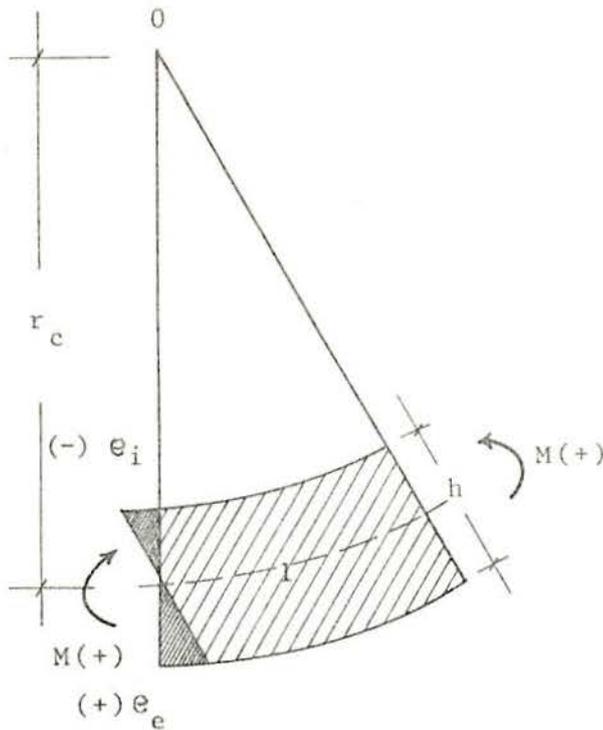
$$v = 0,20$$

e_e = deformação específica externa

e_i = deformação específica interna

x \rightarrow s (direção meridional)

y \rightarrow ϕ (direção circunferencial)



$$\frac{e_e - e_i}{h} = \frac{1}{r_c} = \theta$$

$$M_x = D \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$M_x = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} (\theta_x + \nu \theta_y)$$

$$M_x = \frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)} \left| (e_e - e_i)_x + \nu (e_e - e_i)_y \right|$$

e

$$N_x = \frac{Eh}{2} \left| (e_e + e_i)_x + \nu (e_e + e_i)_y \right|$$

Quadro 6.1

Equações para a determinação dos momentos fletores e esforços normais, nas direções meridional (s) e circunferencial (ϕ) em função das deformações específicas (e), lidas nos strain gages

M_s	$= 0,1172 \left (e_e - e_i)_s + 0,2 (e_e - e_i)_\phi \right $
M_ϕ	$= 0,1172 \left (e_e - e_i)_\phi + 0,2 (e_e - e_i)_s \right $
N_s	$= 0,225 \left (e_e + e_i)_s + 0,2 (e_e + e_i)_\phi \right $
N_ϕ	$= 0,225 \left (e_e + e_i)_\phi + 0,2 (e_e + e_i)_s \right $

6.2 - Protensão vertical

Para serem efetuados os ensaios da protensão vertical, foi necessário determinar-se os valores das cargas a serem aplicadas nos cabos de protensão, de modo a que houvesse uma correspondência entre estes ensaios experimentais e a análise numérica.

Como foi visto no item 3.3, para a análise numérica a protensão foi considerada como uma pressão externa distribuída na superfície, sobre a qual foram consideradas, de forma simplificada, as perdas por atrito nos cabos de protensão. Através desta consideração, determinou-se, então, as forças a serem aplicadas nos ensaios, da seguinte forma.

De acordo com a Fig. 3.15, foi considerada uma perda máxima de 5%, relativa a um desenvolvimento de cabo de 90° , uma vez que os cabos são tracionados por ambas as extremidades.

Obtêm-se, então, uma pressão média p_m ,

$$p_m = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{1 + 0,95}{2} = 0,975 \text{ kg/cm}^2,$$

que atua sobre toda a superfície semi-esférica, produzindo uma reação total F , na base

$$F = p_m \cdot r_m^2 = 0,975 \cdot 3,14 \cdot 39^2 = 4658,9 \text{ kg}$$

Essa força F , força total de protensão, dividida pelo número de cabos n , dá a força aplicada em cada cabo, f_c .

$$f_c = \frac{F}{n} = \frac{4658,9}{48} = 97,06 \text{ kg p/cabo}$$

Determinada a força total de protensão F , esta força era aplicada através do macaco hidráulico e determinada pela célula de carga que a ele se acoplava, produzindo a separação da placa P_1 e da peça de ancoragem P_2 , conforme Fig. 2.4. Simultaneamente, eram tensionados os cabos de protensão, que já haviam sofrido um primeiro ajuste de tensão, através das ancoragens móveis, como já mencionado anteriormente.

Essa força era, então, transferida às três células de carga C_1 , C_2 e C_3 , que, tomando cada uma um terço desta carga, mantinham os cabos igualmente tensionados até que a carga fosse retirada, ou que outra etapa de carregamento fosse iniciada.

A cada ciclo de carga, eram lidos os valores das deformações específicas nos strain gages e também os valores dos deslocamentos ao longo dos meridianos onde se encontravam os relógios comparadores.

Os resultados, entretanto, não se apresentavam bons, obtendo-se dos strain gages valores de deformações específicas praticamente nulos e dos relógios comparadores, valores de deslocamentos muito diferentes dos esperados, obtidos através da análise numérica.

Através da repetição de uma série de ensaios, medindo-se inclusive possíveis deformações da mesa onde encontra-se apoiado o modelo, Fig. 6.2, e do arco onde ancoram-se os relógios comparadores, chegou-se a conclusão de que estes resultados eram causados por alguns problemas que passamos a citar:

- a chapa de aço sobre a qual apoia-se o modelo, apesar de ter 1,5 cm de espessura e de ser reforçada inferiormente com perfis de aço, não é suficientemente rígida e, sofrendo influência do sistema de protensão vertical, deforma-se, formando também o arco onde se fixam os relógios comparadores.

- a base do modelo, por não ter ficado perfeitamente contida em um plano, não apresenta um contato perfeito com a chapa de apoio, ou seja, apoia-se em algumas regiões e não em todo o perímetro circular, como deveria acontecer.

Obviamente, não apresentando o modelo um contato contínuo com a chapa de apoio, a reação da protensão vertical, que deveria se distribuir igualmente em toda a superfície cilíndrica, apresenta regiões de concentração de tensões e regiões onde praticamente não há nenhuma compressão na parede cilíndrica.

Estando o meridiano onde se encontram os strain gages justamente em uma destas zonas onde não há um contato perfeito, logicamente estes strain gages acusam valores de defor-

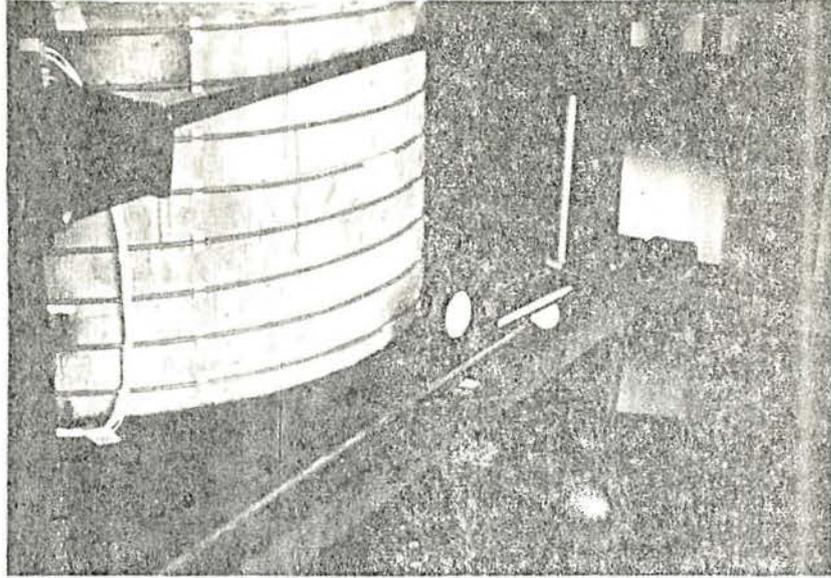


Fig. 6.2 - Deflectômetro na chapa de apoio

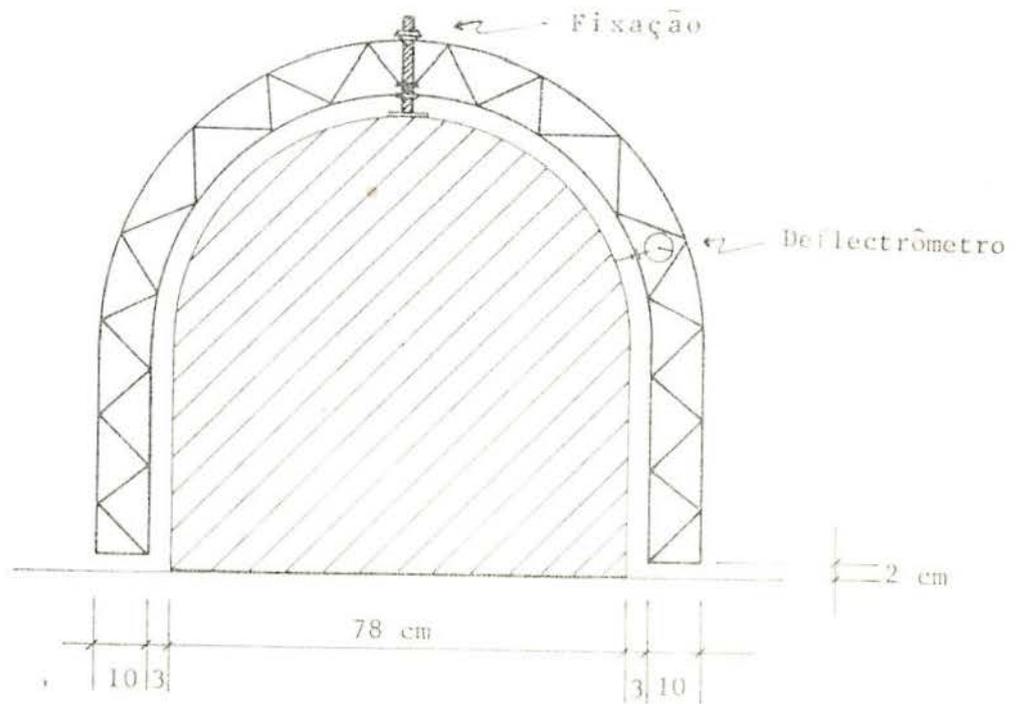


Fig. 6.3 - Arco metálico

mação específica praticamente nulos.

Para serem solucionados estes problemas, dever-se-ia dar à placa de apoio do modelo uma rigidez suficiente, a fim de que, quando solicitada pelo esforço de protensão vertical, apresentasse deformações insignificantes, comparadas com os deslocamentos do próprio modelo.

Também a superfície de contato do modelo com esta chapa de aço deveria ser corrigida, de modo a apresentar um perfeito apoio e distribuir a reação igualmente em todo o contorno.

Estas soluções, entretanto, seriam bastante demoradas e implicariam em se desmanchar o modelo para serem feitos estes reparos.

Optou-se, então, por tentar resolver o problema do arco onde se ancoram os deflectômetros, para que se pudesse obter, pelo menos, uma curva de deslocamentos, uma vez que o problema das deformações específicas seria de bem mais difícil solução.

Construiu-se um novo arco para a medida dos deslocamentos, bem mais rígido que o primeiro e fixado ao próprio modelo, em seu ponto mais elevado, conforme Fig. 6.3, de forma a não sofrer as influências da chapa de apoio, uma vez que este não se encontra ligado à chapa.

Este arco, porém, acompanha o deslocamento vertical do ponto onde se fixa ao modelo, fornecendo, então, a leitura de deslocamentos relativos à posição em que se encontra em cada etapa de carga.

Como pode ser visto no gráfico 3.8, os deslocamentos da estrutura, relativos a esta protensão, são predominantemente verticais e, com o arco metálico acompanhando verticalmente o deslocamento do ponto superior, os deslocamentos relativos a sua posição tornaram-se bastante pequenos, cerca de três vezes menores do que os deslocamentos relativos à posição indeformada, Fig. 6.4.

Em face da grande dificuldade já sentida na medida de deslocamentos tão pequenos, da ordem de poucos milésimos de

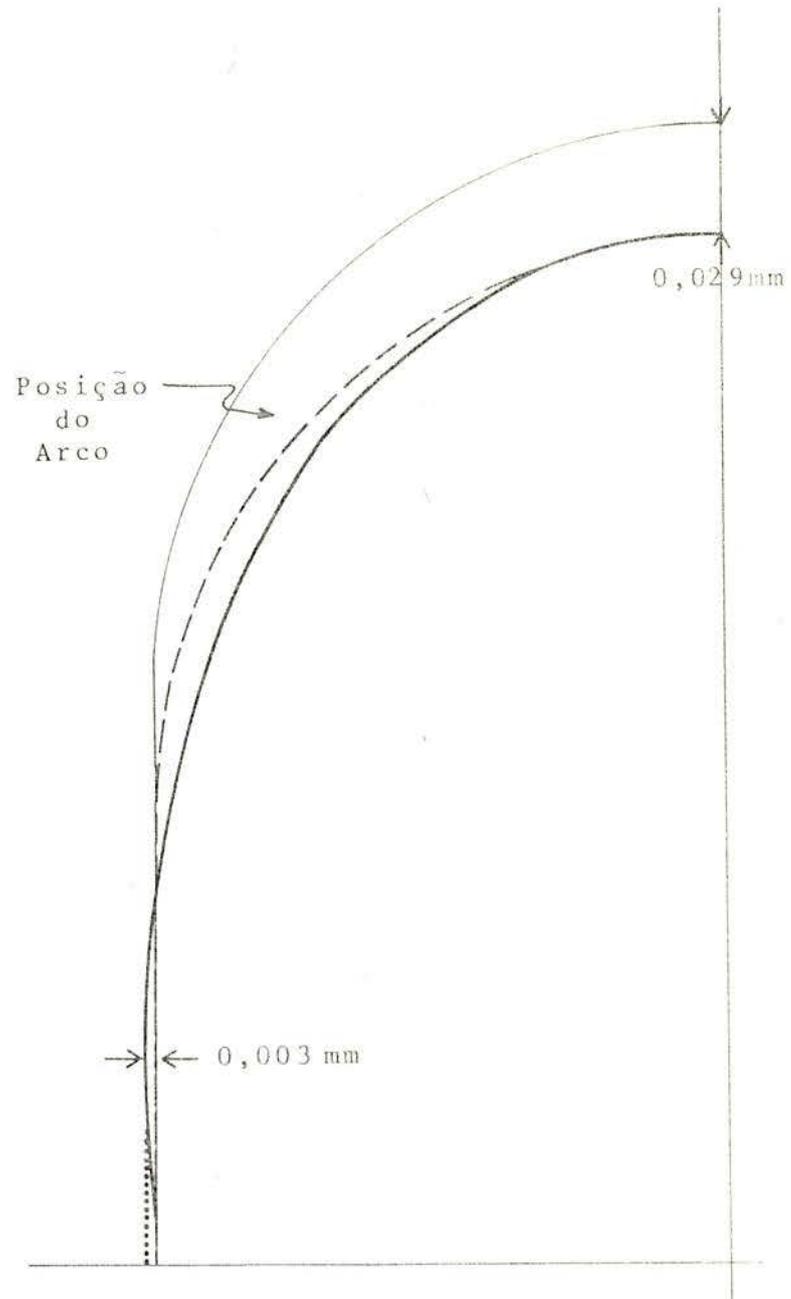


Fig. 6.4 - Posição do arco metálico quando da protensão vertical

milímetro, utilizando-se apenas alguns relógios comparadores com precisão compatível, a diminuição do valor destes deslocamentos, citada anteriormente, impossibilitou a sua determinação.

Isto, entretanto, não ocorreu no caso da protensão horizontal, uma vez que neste carregamento os deslocamentos são praticamente horizontais, como poderá ser visto no próximo item.

6.3 - Protensão horizontal

Para os ensaios da protensão horizontal, novamente houve a necessidade de serem determinadas as cargas a serem aplicadas nos cabos, uma vez que também esta protensão foi considerada, na análise numérica, como uma pressão externa distribuída na superfície cilíndrica, sobre a qual foram consideradas as perdas por atrito dos cabos.

Esta protensão poderia ser aplicada de duas maneiras diferentes, como mostra a Fig. 3.16 e como também já foi mencionado no Cap. 2.

Poder-se-ia aplicar o esforço de protensão tracionando-se os cabos por ambas as extremidades, utilizando-se dois macacos hidráulicos, ou então, utilizando-se somente um macaco hidráulico, tracionar-se os cabos por somente uma das extremidades, mantendo-se a outra devidamente ancorada.

A diferença básica entre estas duas formas de aplicação da protensão está na consideração das perdas por atrito, entretanto, a primeira delas parece produzir menos problemas, uma vez que utilizando-se somente um macaco hidráulico a protensão produz também um deslocamento rígido da estrutura, causado, justamente, pelo atrito dos cabos.

Apesar disto, pelo fato de somente possuímos um macaco hidráulico capaz de ser utilizado para esta protensão, optou-se pelo segundo método.

A determinação das forças de protensão fez-se, então, da seguinte maneira, tendo-se a vista novamente a Fig. 3.16.

A pressão distribuída $p(b)$ representa o caso em que

se tracionam os cabos por somente uma extremidade e, para que ela produza uma pressão média de $1 \text{ kg/cm}^2 (= 0,9 p)$, é necessário que a pressão p seja:

$$p = \frac{1}{0,9} = 1,11 \text{ kg/cm}^2$$

uma vez que para um desenvolvimento de cabo de 90° a perda foi considerada em 10%.

A força total de protensão F é então determinada como:

$$F = p r_m h = 1,11 \cdot 39 \cdot 39 = 1688 \text{ kg}$$

onde:

r_m - raio médio da superfície do modelo

h - altura da superfície cilíndrica

E a força em cada cabo f_c , como:

$$f_c = \frac{F}{n} = \frac{1688}{8} = 211 \text{ kg p/cabo}$$

Esta força foi então aplicada nos ensaios de protensão horizontal que se desenvolveram com o seguinte procedimento:

Em uma das extremidades dos cabos, com o auxílio do macaco hidráulico, era aplicada a força de protensão, determinada pela célula de carga colocada na extremidade oposta. Após estar aplicada esta força, quando então os cabos já estavam devidamente tensionados, a força era transferida do macaco hidráulico à célula de carga adjacente, que a mantinha controlada até que esta fosse retirada ou que uma nova etapa de carga fosse requerida.

Neste momento eram lidos os valores das deformações específicas, apresentados pelos strain gages e também os deslocamentos por intermédio dos deflectômetros.

Nesta protensão não foram sentidos os problemas ocorridos com a protensão vertical, de não uniformidade de apoio e de influência da protensão na chapa de apoio e conse-

dentemente no arco de referência dos deslocamentos; entretanto, como já mencionado em outro problema, surgiu.

Com o fato de a protensão ser dada por somente uma das extremidades dos cabos, ocorreu que a estrutura apresentou um deslocamento rígido, crescente com o aumento da carga aplicada, e os deslocamentos lidos com referência ao arco, fixado à placa de apoio, eram negativos em um dos lados e positivos no outro, o que dificultava bastante a sua determinação.

Com a colocação do novo arco para a medida de deslocamentos, Fig. 6.3, este problema foi solucionado, uma vez que este deslocamento rígido era também acompanhado pelo arco, e com a referência a ele eram somente lidos os deslocamentos reais da estrutura, fruto da protensão propriamente dita.

Procedida uma série de ensaios, carregando-se e descarregando-se a estrutura, notou-se que até uma carga de aproximadamente 1000 kg, os deslocamentos não se faziam sentir, e, após esta carga, começava-se então a medir algum deslocamento nos pontos analisados.

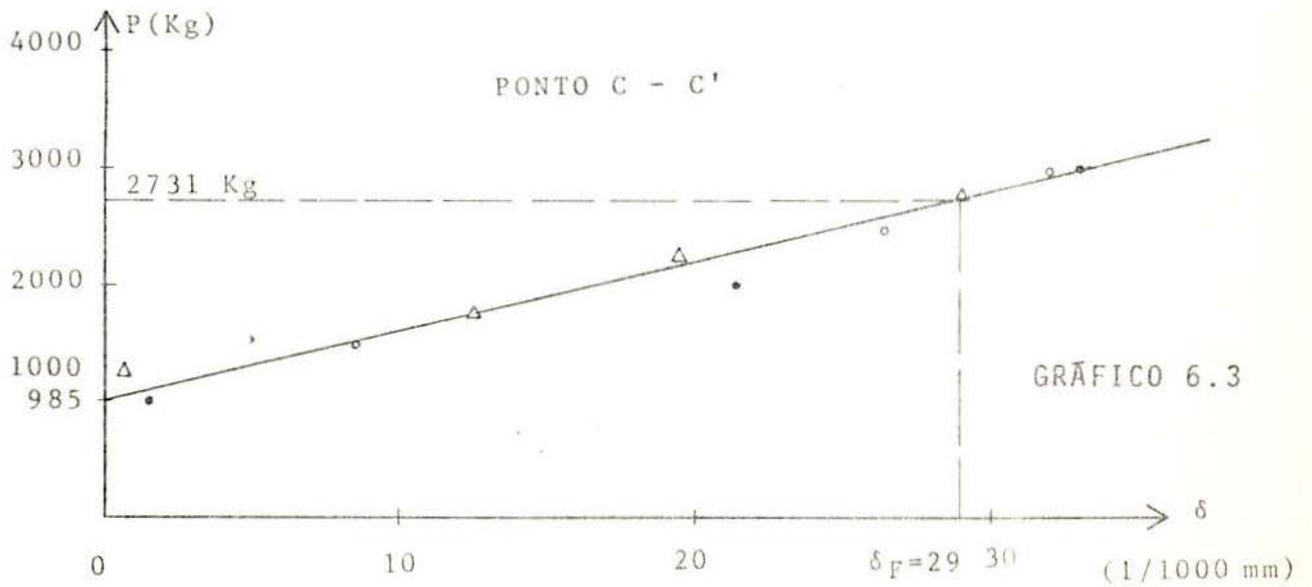
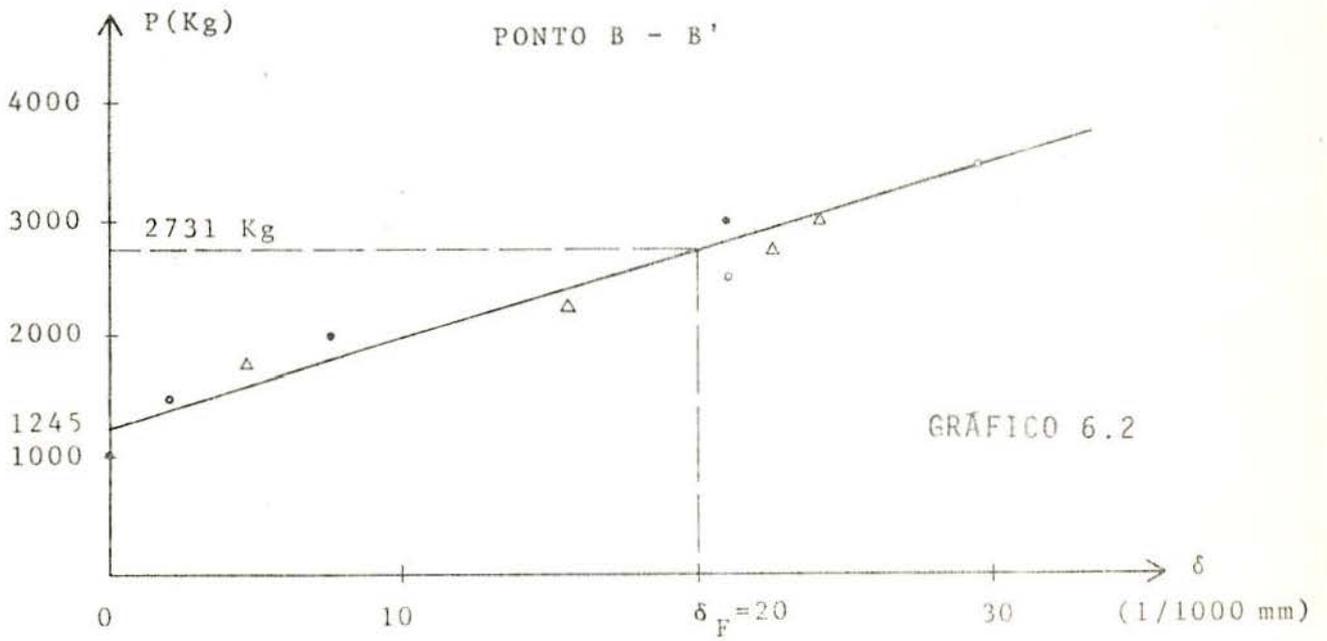
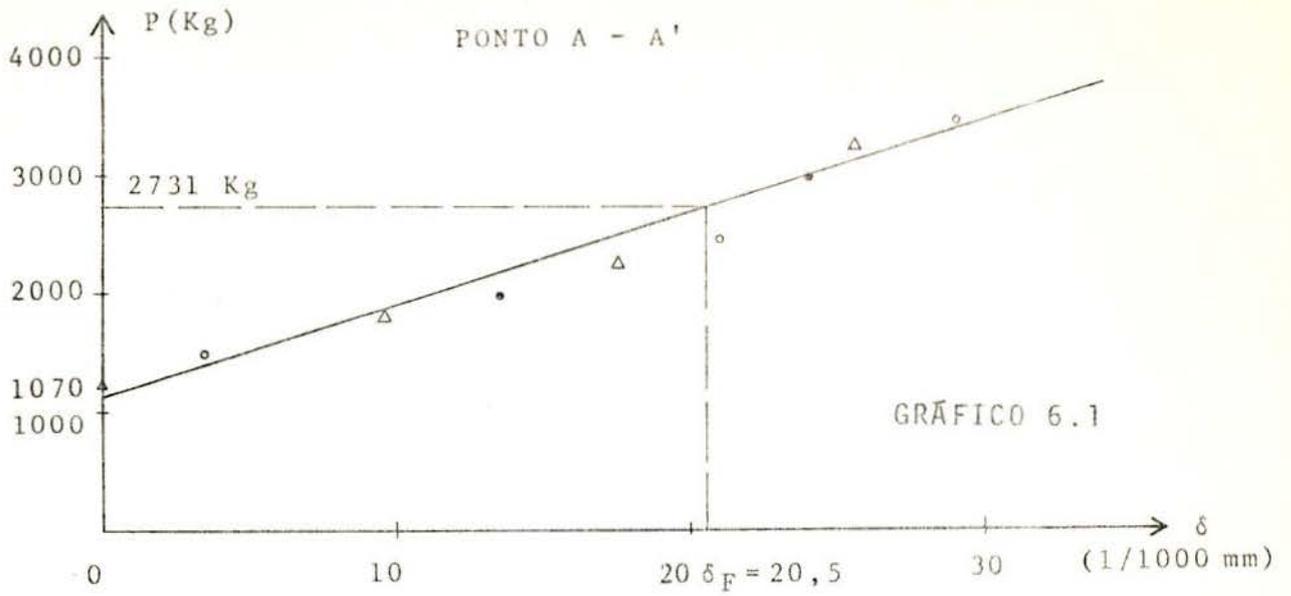
Concluiu-se que esta era uma carga de acomodação dos cabos, e que a partir dela é que os cabos realmente começavam a protender o modelo; então, para a determinação mais exata dos deslocamentos, utilizou-se o seguinte processo:

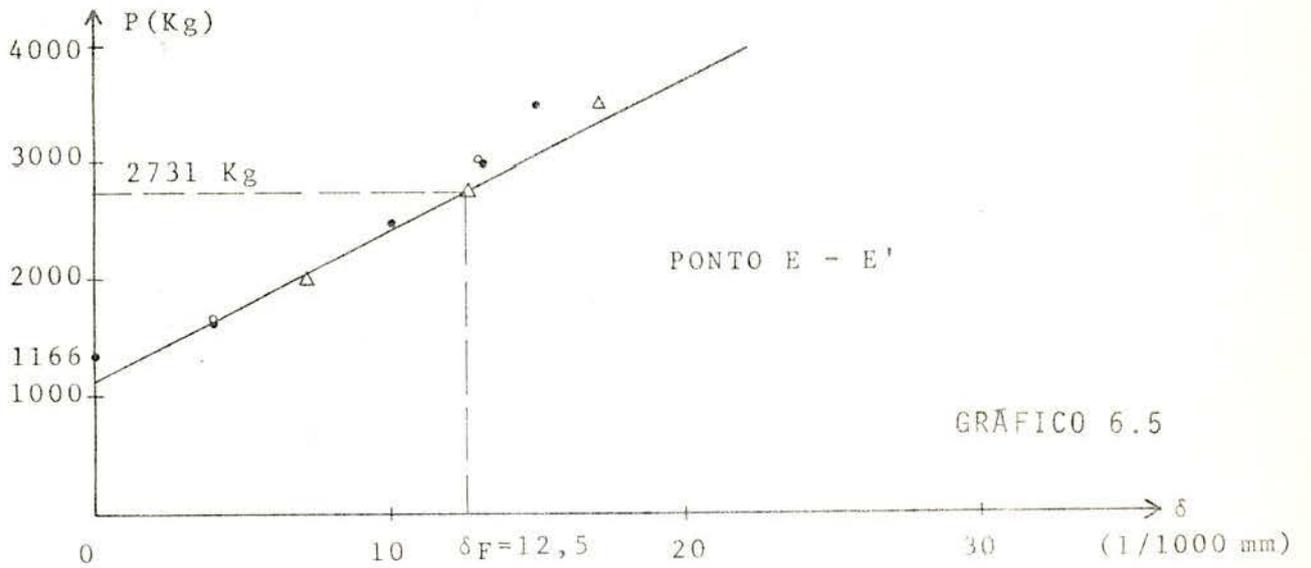
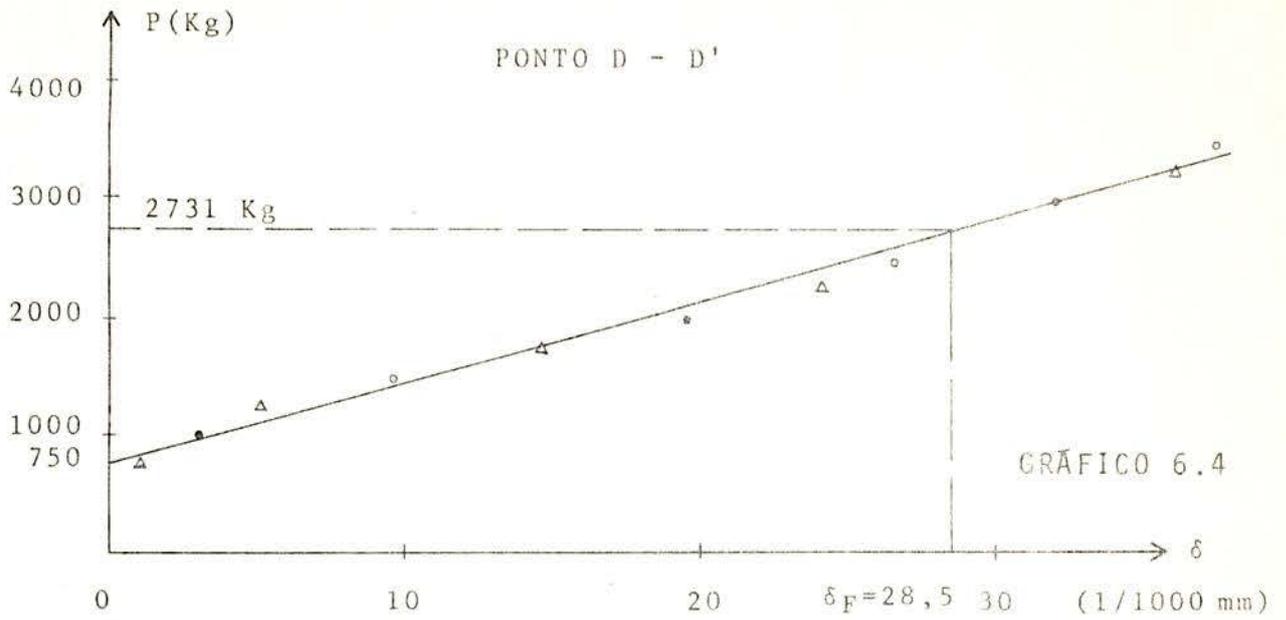
Fez-se, para cada ponto analisado, um gráfico que relaciona os deslocamentos ocorridos para uma série de carregamentos de 0 a 4000 kg, gráficos 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5. Aproximando-se os pontos de cada um dos gráficos por uma reta, observa-se que para cada um deles tem-se uma carga inicial de acomodação, para a qual o deslocamento do ponto é nulo.

Tomou-se a média destas cargas de acomodação, $F_{a,m}$:

$$F_{a,m} = (1070 + 1245 + 985 + 750 + 1166) \div 5 = 1043 \text{ kg}$$

como uma carga de acomodação global, e sobre ela contou-se a carga necessária para a protensão, determinada anteriormente, $F = 1688 \text{ kg}$, tendo-se então como carga real de protensão horizontal:





GRÁFICOS 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 - Deslocamentos dos pontos analisados, sob protensões horizontais com cargas de 0 a 4000 kg. Determinação das cargas de acomodação

$$F_{ph} = 1043 + 1688 = 2731 \text{ kg}$$

Com esta nova carga, F_{ph} , entra-se nos gráficos mencionados e determina-se o deslocamento de cada ponto.

Observa-se, entretanto, que os pontos analisados em dois meridianos são em número de 17, como mostra a Fig. 4.38, item 4.11, porém, para os pontos F, F', G, G', H, H' e I os deslocamentos são praticamente nulos e para os 10 pontos restantes os deslocamentos são simétricos, como assim o foram de terminados, apresentando-se, então, tão somente 5 gráficos que representam, cada um, um ponto e o seu simétrico.

Para a determinação dos esforços foram lidos os valores das deformações específicas, nos strain gages, também para a carga $F_{ph} = 2731 \text{ kg}$, e através destes valores utilizando-se as fórmulas constantes do quadro 6.1, chegou-se aos momentos fletores e esforços normais, nas direções meridional e circunferencial, que se encontram representados nos gráficos do Cap. 7.

6.4 - Carregamento lateral

O carregamento lateral, de todos os carregamentos utilizados, seguramente o de mais simples aplicação, foi dado exatamente da forma como foi idealizado. Por intermédio do macaco hidráulico, acoplado à célula de carga, era aplicada a carga lateral, em um dos lados do modelo, enquanto no lado oposto o sistema montado encarregava-se de aplicar a reação desta carga.

Enquanto o macaco hidráulico mantinha aplicada a carga, determinada pela célula de carga, eram lidos os valores das deformações específicas e dos deslocamentos, e esta carga era então retirada ou aumentada, conforme a etapa do ensaio em que se estivesse operando.

O valor da carga lateral utilizada na análise numérica foi de 1000 kg; entretanto, nos ensaios experimentais foi utilizada uma carga máxima de 300 kg, pelo fato de que, com esta carga, alguns strain gages já acusavam uma deformação especí

fica da ordem de 100 micropolegadas por polegada, o que corresponde a uma tensão de tração de cerca de:

$$\sigma_T = E \epsilon = 150000 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 15 \text{ kg/cm}^2$$

Como pode ser visto no item 5.2.2, a tensão mínima de ruptura à tração, obtida dos ensaios de tração indireta, foi de $\sigma_T = 22,62 \text{ kg/cm}^2$ e, guardando-se um coeficiente de segurança de 1,5, a tensão máxima a que se deveria atingir é de $\sigma_T = 15,08 \text{ kg/cm}^2$, para que se pudesse proteger o modelo de uma ruptura, com uma boa margem de segurança.

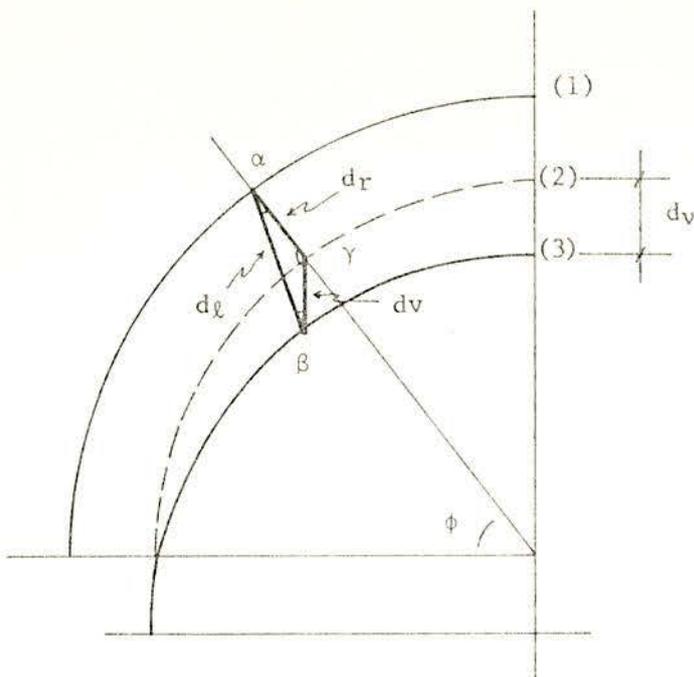
Os resultados dos ensaios, feitos com esta carga de 300 kg foram então transformados para uma carga de 1000 kg, para que pudessem ser superpostos aos resultados da análise numérica. Esta transformação foi feita simplesmente multiplicando-se pelo coeficiente de proporcionalidade entre as cargas, uma vez que todos os ensaios foram feitos dentro do regime elástico.

Um problema surgido quando da aplicação da carga externa foi o deslocamento vertical da estrutura, para baixo, causado também pela má condição de apoio desta em relação à chapa de aço.

Este deslocamento vertical, rígido, foi determinado através da colocação em vários pontos da borda inferior do modelo, de deflectômetros, Fig. 6.5, com os quais pode-se fazer uma avaliação do valor deste deslocamento, e levá-lo em consideração, corrigindo os deslocamentos dos pontos analisados.

Esta correção fez-se sentir nos deslocamentos dos pontos da parte semi-esférica, e também na parte do cilindro, onde os deslocamentos, embora sendo horizontais, sofrem a influência deste deslocamento vertical de corpo rígido.

Esta correção foi feita da seguinte forma:



onde:

d_v - deslocamento vertical de corpo rígido

d_r - deslocamento radial

d_l - deslocamento lido no deflectômetro

(1) - Posição indeformada do modelo

(2) - Posição deformada sem o deslocamento d_v

(3) - Posição deformada com o deslocamento d_v

Assumindo-se um deslocamento rígido d_v , constante em todos os pontos, tem-se que o deslocamento lido é

$$d_l = d_r \cos \alpha + d_v \cos \beta$$

e, portanto, o deslocamento radial

$$d_r = \frac{d_l - d_v \cos \beta}{\cos \alpha}$$

Para a determinação dos ângulos α , β e γ , assume-se que os deslocamentos dos pontos do modelo sejam sempre orientados na direção radial, direção do deslocamento d_r , o que não foge muito da realidade, face aos valores dos deslocamentos apresentados pela análise numérica; então:

$$\gamma = \pi + \phi$$

$$\alpha = \arcsen \frac{d_v \operatorname{sen} \gamma}{d_l}$$

$$\beta = \pi - \phi - \alpha$$

Pode-se, então, obter facilmente o valor do deslocamento d_r em cada ponto analisado.

Esta má condição de apoio do modelo fez-se também sentir nos resultados das deformações específicas, pois, como pode ser visto nos resultados apresentados no capítulo seguinte, os esforços normais na direção meridional são bastante menores do que os esperados, enquanto que na direção circunferencial, que não sofre influência direta desta apoio mal condicionado, os resultados já não foram tão pequenos.

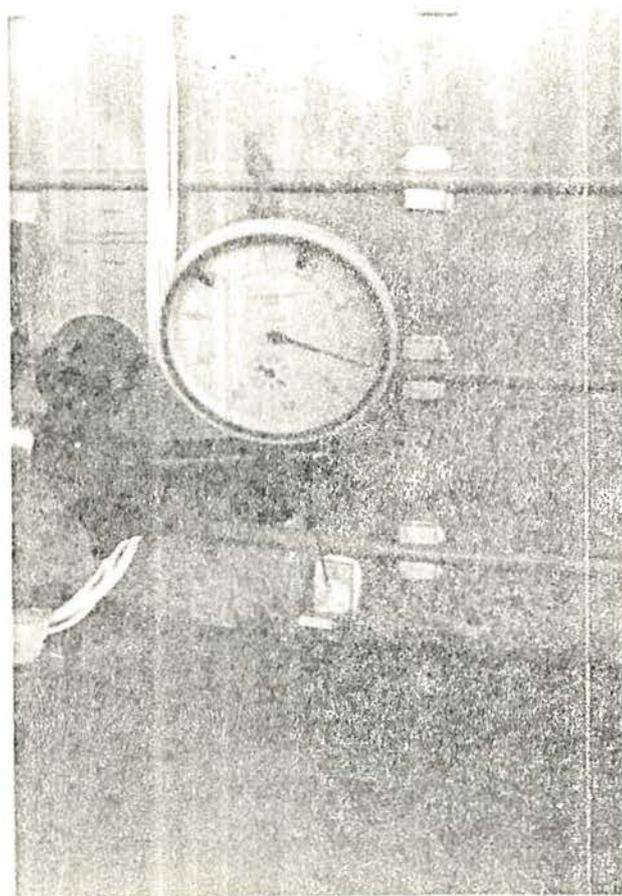


Fig. 6.5 - Determinação dos deslocamentos verticais rígidos

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais do modelo, na forma de gráficos, nos quais comparam-se estes com os obtidos na análise numérica, transpostos do Capítulo 3.

Como já foi explanado em capítulos anteriores, os ensaios experimentais referentes ao carregamento de pressão interna não foram efetuados e os resultados dos ensaios da protensão vertical também não puderam ser determinados; em vista disto, aqui, apresentam-se os resultados de deslocamentos, momentos fletores e esforços normais, tão somente dos carregamentos de protensão horizontal e carga lateral.

Os resultados da protensão horizontal encontram-se nos gráficos:

7.1 - Deslocamentos dos pontos contidos em um meridiano;

7.2 - M_S , momentos fletores na direção meridional;

7.3 - N_S , esforços normais na direção meridional;

7.4 - M_ϕ , momentos fletores na direção circunferencial, sobre os pontos de um meridiano;

7.5 - N_ϕ , esforços normais na direção circunferencial, sobre os pontos de um meridiano.

Como pode ser observado nestes resultados, os deslocamentos, gráfico 7.1, apresentam-se bastante coerentes com os fornecidos pela análise numérica, apresentando na região próxima à base do modelo valores intermediários aos obtidos com as condições de engaste, rótula e apoio simples.

Os momentos fletores meridionais, gráfico 7.2, os que produzem curvaturas no plano que contém um meridiano, apre

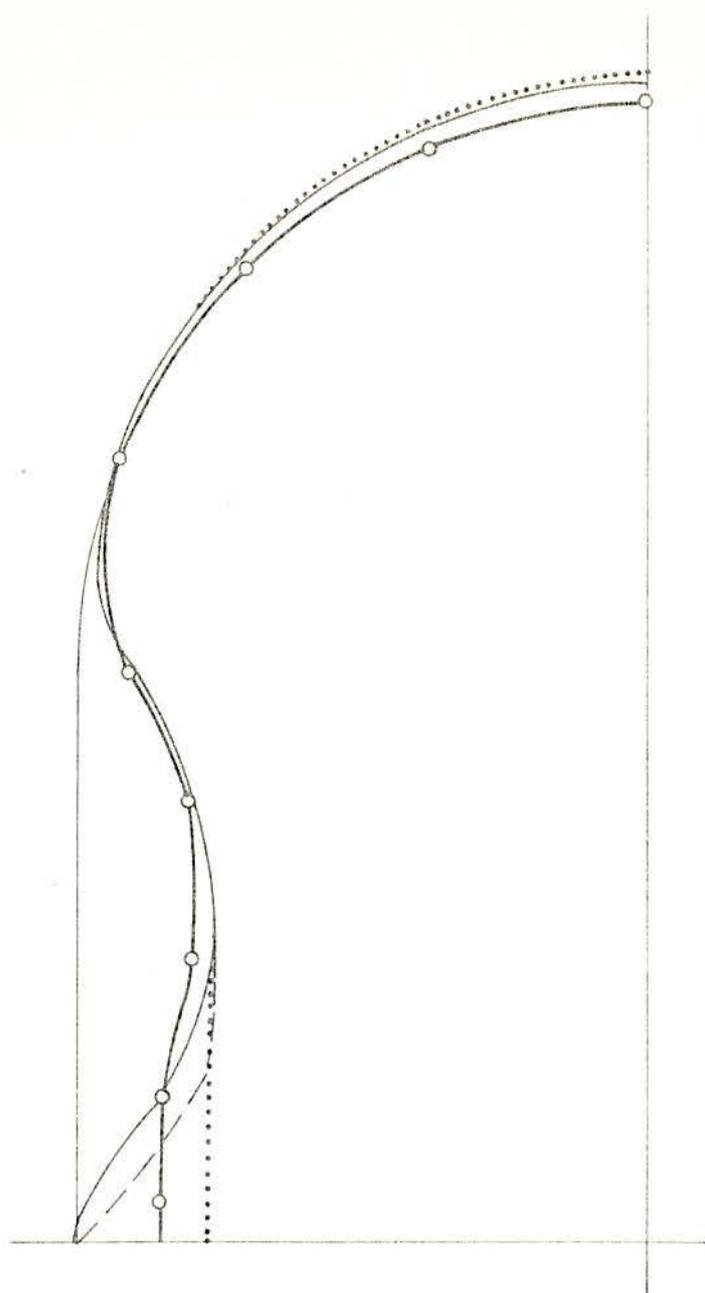


GRÁFICO 7.1 - Deslocamentos dos pontos
contidos em um meridiano
(vide GRÁFICO 3.11)

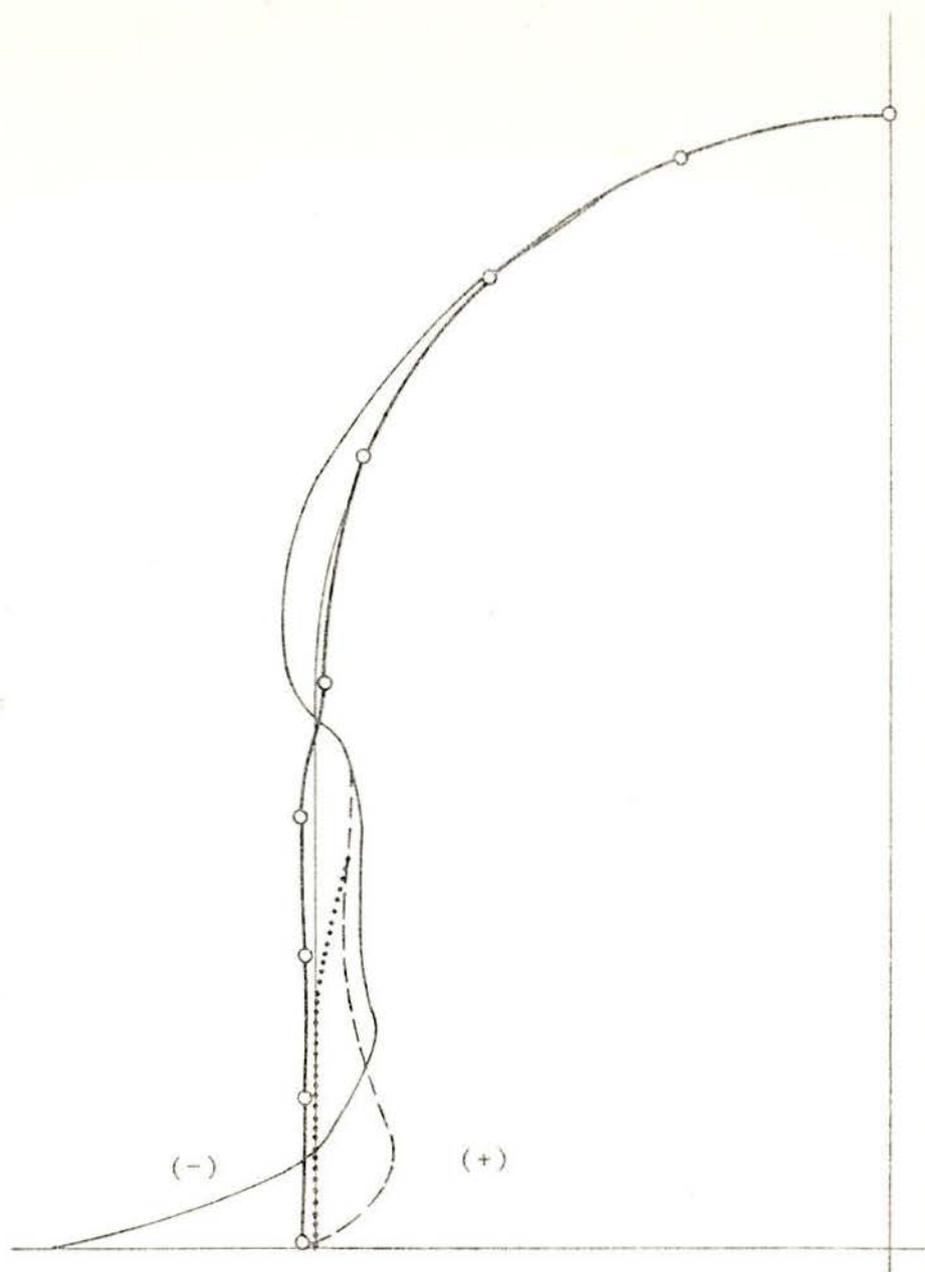


GRÁFICO 7.2 - Momentos fletores na direção meridional (MS)
(vide GRÁFICO 3.12)

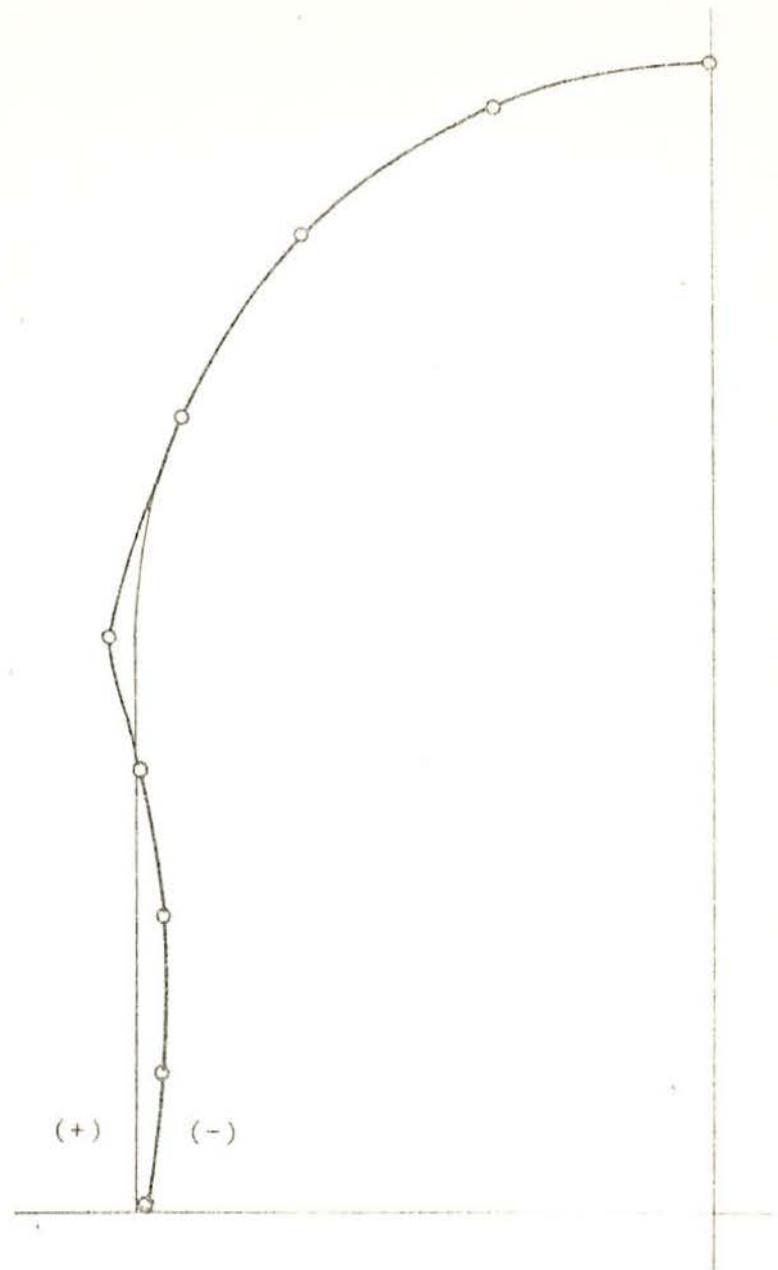


GRÁFICO 7.3 - Esforços normais na direção meridional (NS)

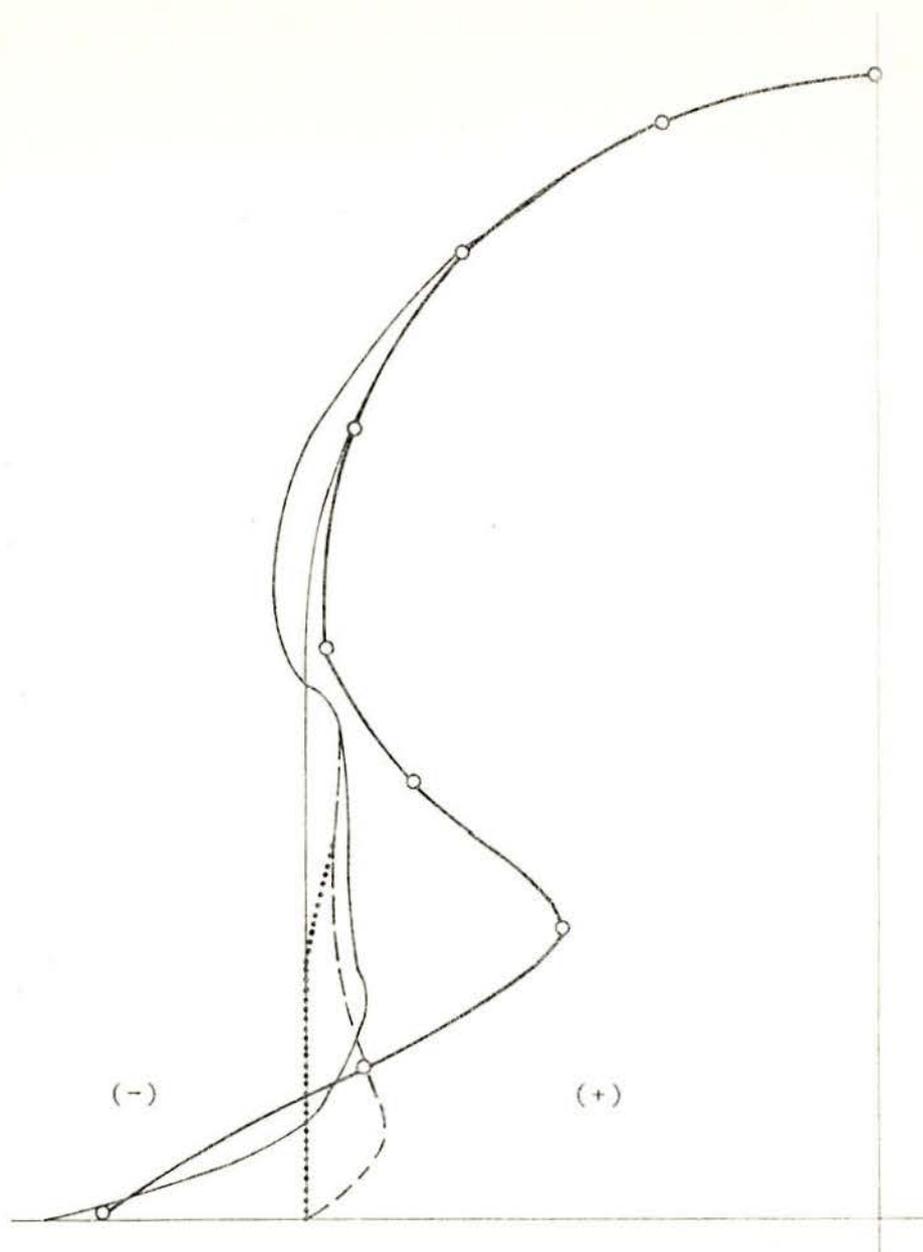


GRÁFICO 7.4 - Momentos fletores na direção
circunferencial (M_{ϕ}), sobre os pontos de
um meridiano
(vide GRÁFICO 3.12)

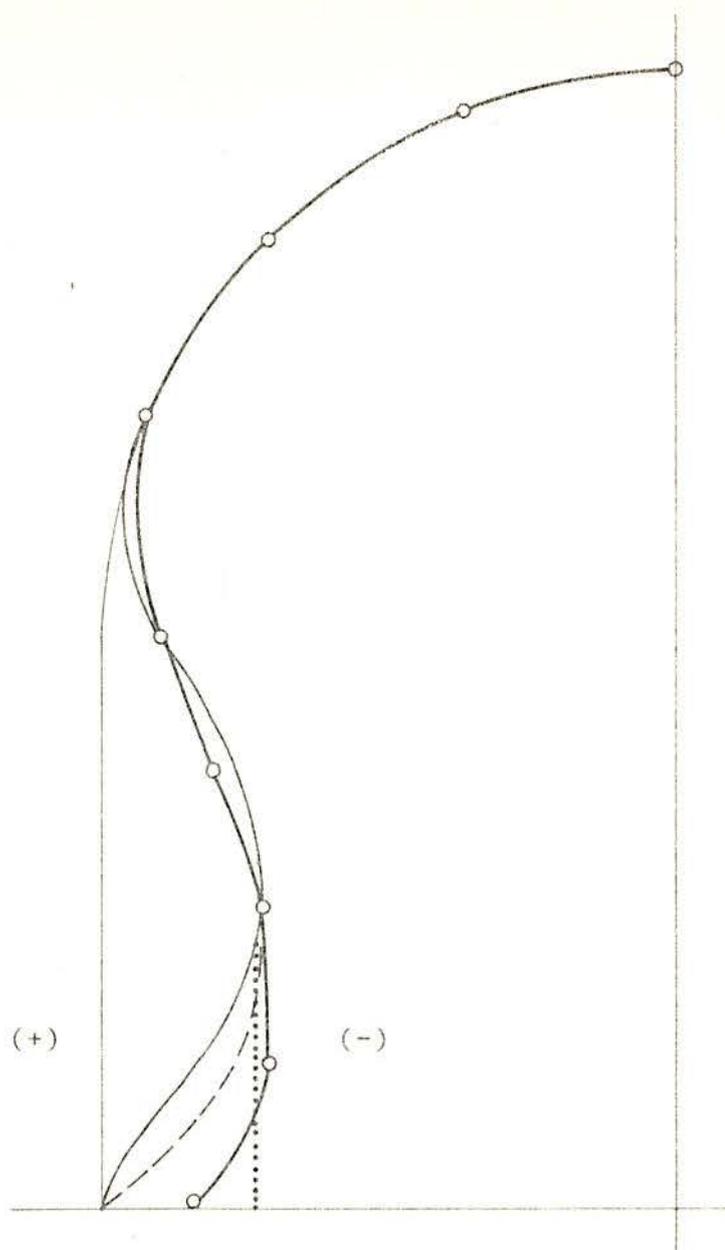


GRÁFICO 7.5 - Esforços normais na direção circunferencial (N_{ϕ}), sobre os pontos de um meridiano (vide GRÁFICO 3.13)

sentam-se bem menores que os resultados numéricos, e os momentos fletores circunferenciais, gráfico 7.4, bem maiores na região central do cilindro e de mesma ordem na borda inferior. Estes resultados diferentes podem ser fruto da pouca precisão na determinação das deformações específicas, principalmente no caso dos momentos circunferenciais que são realmente de valor pequeno.

Quanto aos esforços normais, os meridionais, gráfico 7.3, que deveriam ser praticamente nulos, apresentam valores realmente bastante pequenos e os circunferenciais, gráfico 7.5, apresentam-se também muito coerentes com os resultados numéricos, novamente tendo-se na base, resultados intermediários entre as três condições de bordo.

Os resultados do carregamento lateral apresentam-se nos gráficos:

7.6 - Deslocamentos dos pontos contidos no meridiano da carga;

7.7 - M_S , momentos fletores na direção meridional;

7.8 - N_S , esforços normais na direção meridional;

7.9 - M_ϕ , momentos fletores na direção circunferencial;

7.10 - N_ϕ , esforços normais na direção circunferencial.

Os resultados, tanto de momentos fletores como de esforços normais, na direção meridional, como mostram os gráficos 7.7 e 7.8, apresentam-se bem menores que os obtidos numericamente, talvez, como foi mencionado no Cap. 6, pela má condição de apoio do modelo, que influencia diretamente estes valores.

Na direção circunferencial os resultados de momentos e esforços são bem mais definidos que na outra direção, chegando mais próximo das curvas teóricas, embora não apresentando uma compatibilidade com estas.

Nas regiões onde se apresentam os momentos e esforços máximos, regiões em torno do ponto de aplicação da car

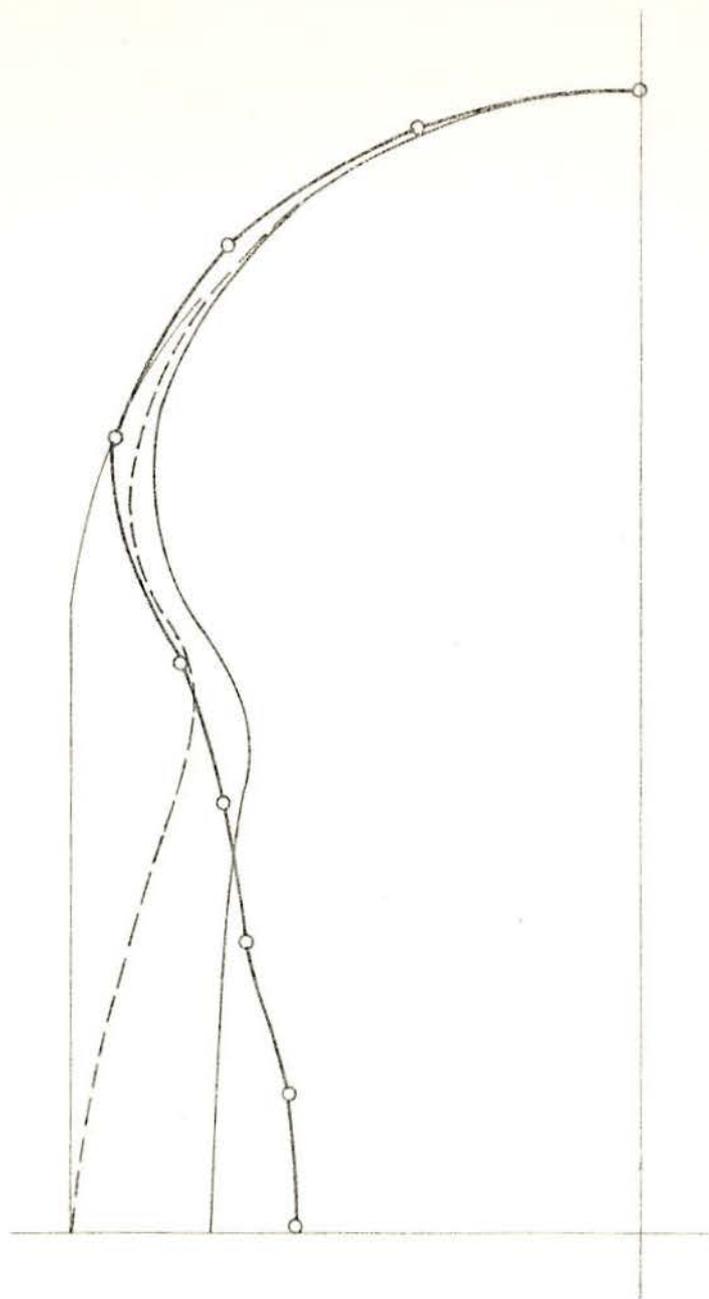


GRÁFICO 7.6 - Deslocamento dos pontos contidos no meridiano da carga
(vide GRÁFICO 3.17a)

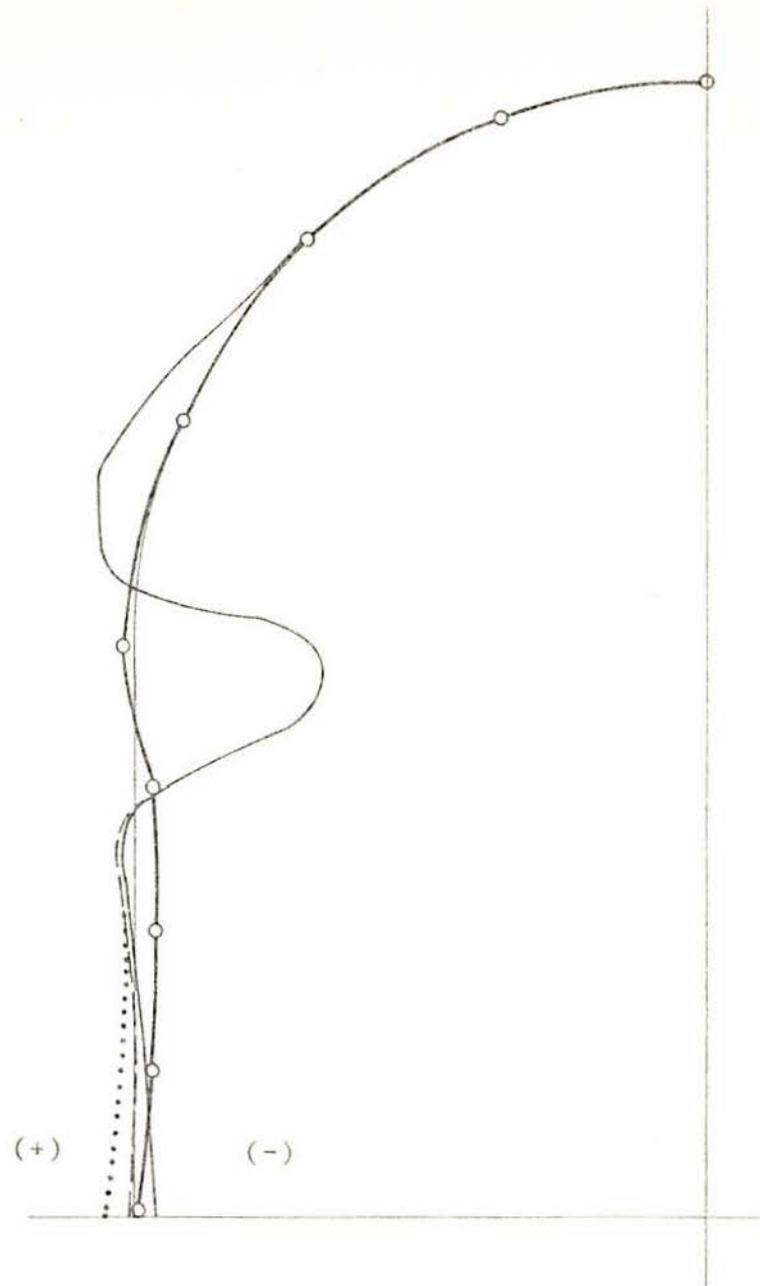


GRÁFICO 7.7 - Momentos fletores na
direção meridional (MS)

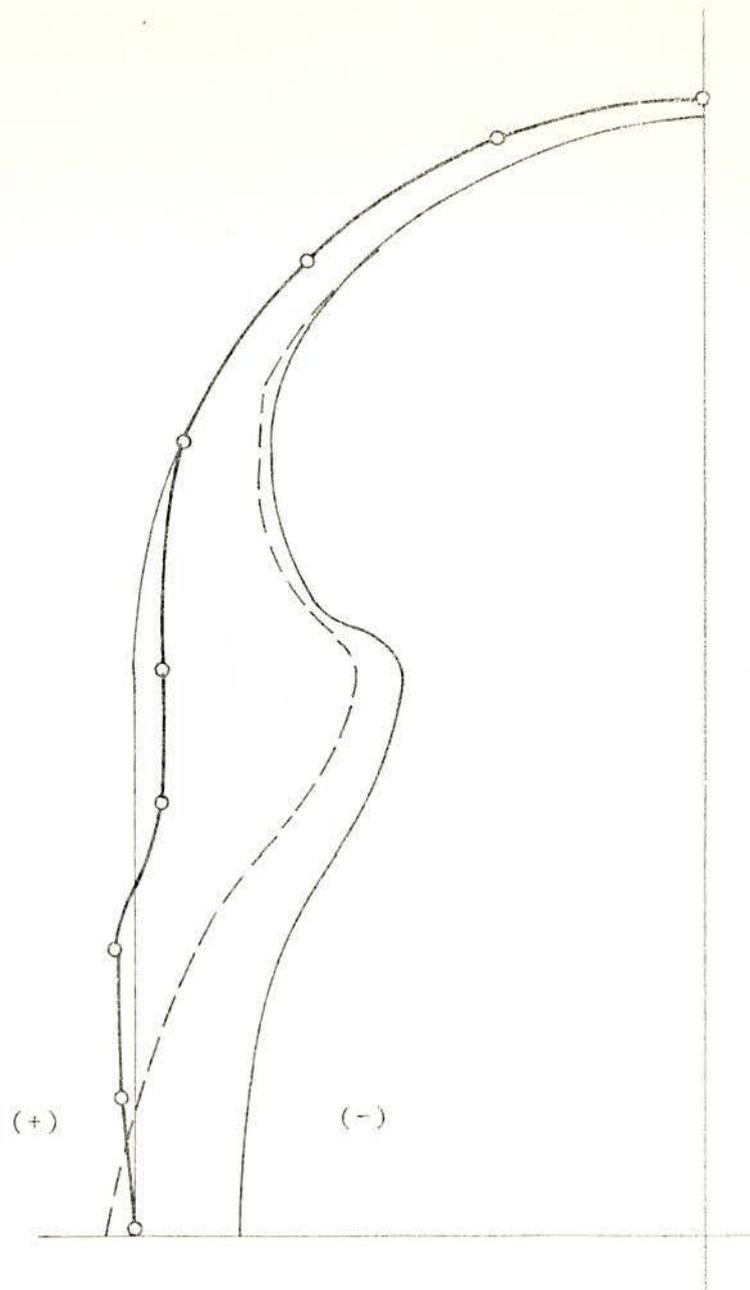


GRÁFICO 7.8 - Esforços normais
na direção meridional (NS)

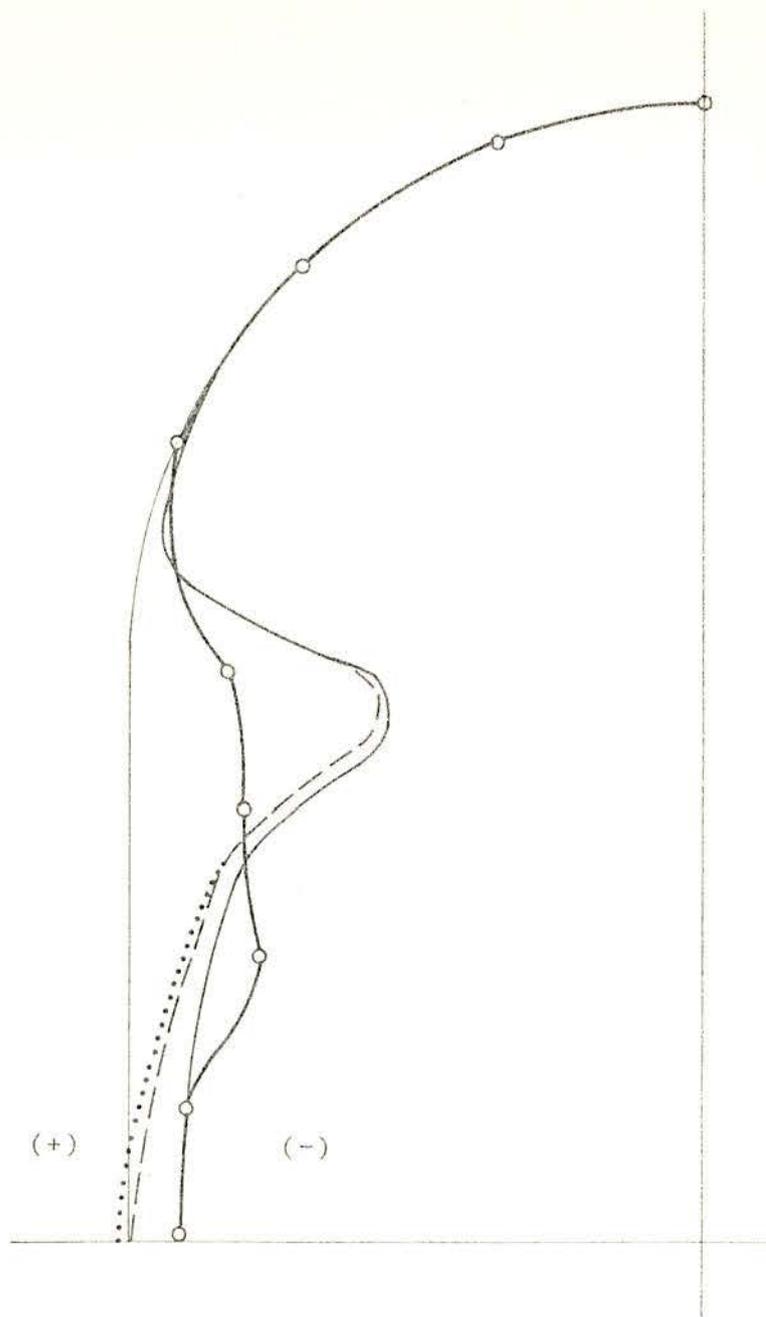


GRÁFICO 7.9 - Momentos fletores na
direção circunferencial (M_{ϕ})

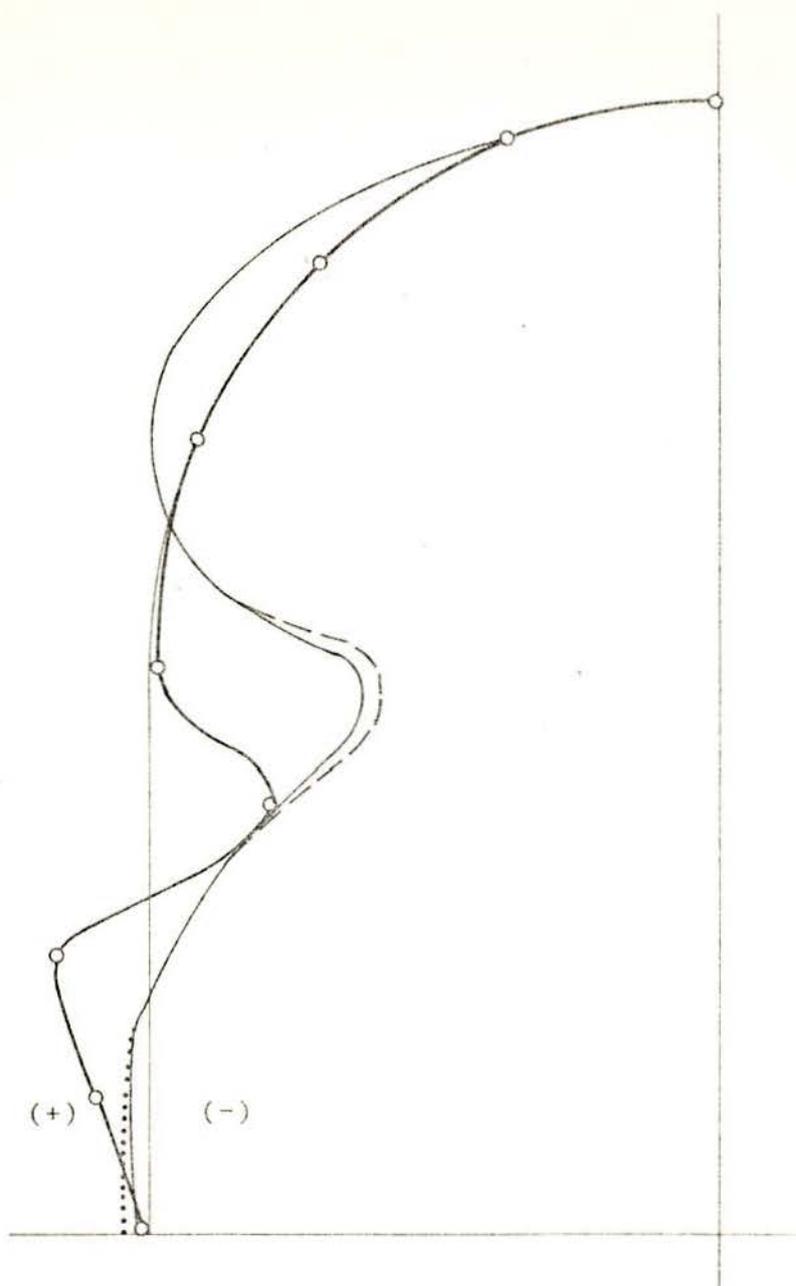


GRÁFICO 7.10 - Esforços normais na
direção circunferencial (N_{ϕ})

ga, pela impossibilidade de serem colados strain gages. Não pu-
deram ser determinados valores extremos, tendo-se somente, co-
mo se vê nos gráficos, pontos acima e abaixo desta região.

Quanto aos deslocamentos, gráfico 7.6, estes apre-
sentam-se de uma forma bastante definida e distinta daqueles
obtidos numericamente, parecendo comporem uma deformada de uma
casca de média ou grossa espessura, e não de uma casca fina;
entretanto, como visto no Cap. 3, os resultados dos elementos
finitos, considerando-se ou não os efeitos de corte, são prati-
camente os mesmos.

Este tipo de deformada, com uma curvatura bem me-
nos acentuada que a obtida numericamente, pode explicar em par-
te o fato de serem encontrados momentos fletores também bastan-
te menores.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Examinando-se este trabalho de uma forma bastante crítica, pode-se chegar a algumas conclusões sobre cada etapa do mesmo e também algumas de ordem geral, analisando-se o que foi feito, como se comportaram e que resultados produziram estas etapas.

Iniciando pela confecção do modelo, o sistema de fôrmas parece-nos ter produzido resultados razoáveis, dando ao modelo uma forma suficientemente simétrica e homogênea, a menos de certas imperfeições na parte externa da superfície semi-esférica, mencionadas nos itens 4.4 e 4.5, que foram sanadas de forma bem rudimentar, na medida de nossas possibilidades na época.

Sobre os sistemas de carregamento, excluindo-se o sistema de aplicação da pressão interna, os demais apresentaram um desempenho razoavelmente bom, como se poderia esperar, visto que a grande maioria dos problemas ocorridos com estes carregamentos foram causados pelo sistema de apoio, influenciando também o sistema de medição, e não propriamente com os de carregamento.

Quanto aos sistemas de medição, tanto na parte de deformações específicas como na de deslocamentos, cremos ter sido também de desempenho aceitável, posto que novamente os maiores problemas sentidos foram relativos a sustentação do próprio modelo.

Obviamente, também o fato de não ser possível a leitura de todos os strain gages e de certas perturbações causadas pelos próprios aparelhos, afetaram este processo de determinação de resultados.

A análise numérica, descrita no Cap. 3, apesar de

algumas dificuldades encontradas, apresentou resultados bastante bons, tanto na parte do carregamento lateral quanto na de pressão interna. Na análise das protensões, entretanto, as simplificações foram bastante acentuadas e, talvez, com um grande gasto de tempo e custo de computação, se pudesse ter obtido resultados mais precisos, o que seria interessante como informação, pois para comparação com os resultados experimentais não traria grandes melhoras.

Fruto de todas estas etapas, os resultados obtidos parecem-nos ter sido muito escassos tanto em quantidade como em qualidade, uma vez que somente 50% dos resultados almejados foram conseguidos e ainda estes não foram tão bons quanto se poderia esperar, logicamente por causa de toda a gama de problemas encontrados e descritos no desenrolar deste trabalho.

Entretanto, estes mesmos problemas conseguiram trazer uma boa experiência, tanto no que se refere à parte de construção do próprio modelo, como no projeto e operação dos sistemas de carregamento e medição e ainda também na escolha, elaboração e análise da parte numérica.

Tendo-se acompanhado e observado de bem perto as falhas ocorridas no desenrolar deste estudo, podemos agregar algumas sugestões, que se não tentam resolver todos estes problemas, pelo menos podem ser úteis no caso de continuação deste trabalho ou mesmo para que trabalhos similares não incorram nos mesmos erros.

- Que seja melhorado o sistema de fôrmas, talvez utilizando-se uma fôrma externa única, reaproveitável, e também que a concretagem se proceda com as fôrmas invertidas, possibilitando um melhor acabamento na base do modelo.

- Que haja um melhor controle do microconcreto, possibilitando uma menor dispersão nos resultados de suas características físicas, e também que a mistura seja procedida não manualmente, mas com o auxílio de uma betoneira de eixo vertical.

- Que se estude a possibilidade de ser usada uma

espessura menor nas paredes do modelo, proporcionando-lhe menos rigidez, possibilitando, então, a obtenção de deslocamentos e deformações mais acentuadas, o que facilitará bastante a determinação destes resultados e com uma precisão bem maior. Isto conseqüentemente aumentará a proporção raio-espessura e proporcionará à estrutura uma definição maior como casca fina.

- Que o modelo tenha uma condição de contorno mais definida, preferivelmente que seja engastado na chapa de apoio o que trará uma melhor determinação das deformações específicas, obtidas dos strain gages, principalmente dos que se posicionam na direção dos meridianos.

- Que a chapa de aço que serve como apoio ao modelo seja bem mais rígida, comparada à rigidez do próprio modelo, e que por sua vez também se apoie de forma melhor sobre a mesa de ensaios, não trazendo, então, tantos problemas para o sistema de medição.

- Que o sistema de aplicação da pressão interna possua uma câmara de borracha bem mais reforçada, de preferência feita em uma peça única, sem emendas, diminuindo assim a possibilidade de ocorrerem rupturas ou vazamentos.

- Que o sistema de protensão vertical seja controlado por três macacos de acionamento simultâneo, diminuindo assim o desequilíbrio entre as cargas que se distribuem às três células de carga.

- Que também o sistema de protensão horizontal seja controlado desta forma, descartando a possibilidade de deslocamentos do modelo e diminuindo também a ação das perdas por atrito nos cabos.

- Que o sistema de aplicação da carga lateral possibilite a atuação de uma só carga e não duas como foi utilizado, permitindo, então, o estudo dos efeitos localizados e globais desta carga sobre a estrutura. Também, se possível, que este sistema permita a aplicação desta carga em várias regiões para que possa haver um estudo mais completo dos efeitos de uma carga accidental.

- Que o sistema de fixação dos deflectômetros se

dê através de um arco bem mais rígido, externo a todo o conjunto, e que conseqüentemente não seja influenciável pelos sistemas de carregamento.

- Que o sistema de leitura dos strain gages possibilite a leitura simultânea de um número bem maior destes sensores, não sendo necessário o uso de religação dos mesmos, entre ensaios ou dentro de um mesmo ensaio.

- Que o posicionamento destes strain gages seja estudado objetivando-se a possibilidade de vários carregamentos, diminuindo assim o número de resultados não aproveitáveis em cada estudo.

- Que sejam feitos estudos nos quais se utilize a superposição de dois ou mais carregamentos, possibilitando uma gama maior de resultados e conclusões.

- Que seja pensada a possibilidade de serem feitos estudos sobre o comportamento plástico da estrutura, assim como também dos efeitos de deformação lenta.

- Que na análise numérica se faça também um estudo da estrutura dentro do regime plástico e viscoelástico.

- Que a análise numérica das protensões se faça sem tantas simplificações, considerando-se-as não como pressões distribuídas, mas como carregamentos lineares imprimidos pelos cabos de protensão, considerando-se também que sua simetria é parcial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - AMARAL, A.A. do. A tecnologia do micro-concreto e sua aplicação em modelos. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1976. 88p. |Tese (M.C.)-Esc. Eng.]
- 2 - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Code for concrete reactor vessels containments. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1975.
- 3 - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. Concrete radiation shields. Hinsdale, III., American Nuclear Society, 1973. 40p.
- 4 - BAKER, A.L.L. et alii. The design, construction and testing of prestressed concrete reactor pressure vessel model. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, London, 21:555-86, Dec. 1961.
- 5 - BENDER, M. Engineering practice for prestressed concrete structures in nuclear containment applications. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1968.
- 6 - BENDER, M. & WRITMAN, G.D. Concrete containment: a 1970 assessment. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON CONCRETE FOR NUCLEAR REACTORS, 1., Berlin, 1970. Proceedings. Detroit, American Concrete Institute, 1972. p.29-54.
- 7 - BIGNON, P.G. Análise dinâmica para reatores nucleares submetidos a força de impacto. In: CONFERENCIA SOBRE ANÁLISE, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CENTRAIS NUCLEARES, 1., Porto Alegre, abr. 1978. Anais. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1978. v.3, p.1125-40.
- 8 - BRUSCHI, S. & ZIEGLER, A. Estructura de contencion para la central nuclear en embalse - Cordoba. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 18., Salvador, dic. 1976. 16p.

- 9 - CREUS, G.J. Programa de pesquisa em concreto para reatores nucleares. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1976.
- 10 - _____ . Uso do concreto em reatores nucleares. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 18, Salvador, dic.1976, 20 p.
- 11 - DEGEN, P.; FURRER, H.; JEMIELEWSKY, J. Structural analysis and design of a nuclear power plant building for aircraft crash effects. In: ELCALAP SEMINAR, in connection with the 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, Berlin, Sep. 1975. 25p.
- 12 - FERRANTE, A.J. et alii. A linguagem LORANE linear para análise estrutural por computador. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1977.
- 13 - HALLIGAN, D.W. Prestressed concrete nuclear plant containment structures. Journal of the prestressed Concrete Institute, Chicago, 21(5):158-75, Sep./Oct.
- 14 - JIMENEZ MONTOYA, P.; GARCIA MESENER, A.; MORAN CABRE, F. Hormigón armado. 7.ed. Barcelona, Gustavo Gili, 1973.
- 15 - KLEIN, D.L. Medida experimental de deformações. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1975.
- 16 - LEONHARDT, F. & MÖNNIG, E. Construções de concreto. Rio de Janeiro, Interciência, 1977-79.
- 17 - NUCLEAR power plant Angra dos Reis - Units 2 and 3; information for conceptual approval of containment. s.n.t. 29p. datilografadas.
- 18 - PERRY, C.C. & LISSNER, H.R. The strain gage primer. New York, McGraw-Hill, 1955.
- 19 - PRESSER, F.F. Elementos isoparamétricos quadráticos para análise de placas e cascas. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1979. [Tese (M.C.) - Esc. Eng.]
- 20 - REBORA, B. & ZIMMERMANN, Th. Dynamic rupture analysis of reinforced concrete shells. Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, 37(2):269-97, 1976.

- 21 - RIERA, J.D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, 8(4):415-26, Nov./Dec. 1968.
- 22 - SANTOS, M.I.G. dos. Implantação de elementos para cascas axissimétricas na linguagem LORANE. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1974. 74p. [Tese (M.C.)-Esc. Eng.]
- 23 - TAN, Chen Pang. Concrete containments for reactor - state of art. Journal of the Structural Division, New York, ASCE, 96(7):1543-66, July 1970.
- 24 - YANG, H.T.Y. & GODFREY, D.A. Structural analysis of aircraft impact on a nuclear containment vessel and associated structures. Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, 11(2):295-307, Mar. 1970.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- 1 - BAKER, E.H.; KOVALEVSKY, L.; RISH, F.L. Structural analysis of shells. New York, McGraw-Hill, 1972.
- 2 - BILLINGTON, D.P. Thin shell concrete structures. New York, McGraw-Hill, 1965.
- 3 - FLÜGGE, W. Handbook of engineering mechanics. New York, McGraw-Hill, 1962.
- 4 - FUNG, Y.C. A first course in continuum mechanics. Englewood Cliffs, N.J., 1969.
- 5 - HASS, A.M. Thin concrete shells. New York, John Wiley, 1962. v.1 e 2.
- 6 - HORNBY, I.W.; VERDON, G.F.; WONG, Y.C. Elastic tests on a model of the oldbury nuclear station prestressed concrete pressure vessel. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, p.347-67, 1967.

- 7 - KRAUS, H. Thin elastic shells. New York, John Wiley, 1967.
- 8 - LOVE, A.E.H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. 4.ed. New York, Dover, 1944.
- 9 - RAMASWAMY, G.S. Design and construction of concrete shell roofs. New York, McGraw-Hill, 1968.
- 10 - SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE handbook; standards, information reports, recommended practices. New York, 1969.
- 11 - SYMPOSIUM ON THIN SHELL STRUCTURES, Pasadena, Calif. Jun. 1972. Proceedings. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1974.
- 12 - TIMOSHENKO, S.P: & WOINOWSKY-KRIEGER, S. Theory of plates and shells. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1959.
- 13 - WAHL, A.M. Mechanical springs. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1963.