

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

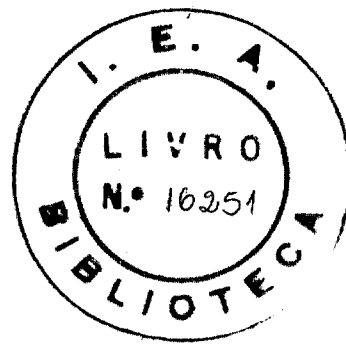
**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE RELAXAÇÃO DINÂMICA E ELEMENTOS
FINITOS NA ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM MODELO REDUZIDO DE VASO
DE PRESSÃO DE CONCRETO PROTENDIDO**

MASARU TAMURA

**Dissertação apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para obtenção do
grau de "Mestre - Área Reatores
Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear".**

Orientador: Dr. Roberto Yoshiyuti Hukai

**São Paulo
1979**



À Toshie e Caroline

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Roberto Yoshiyuti Hukai, os nossos melhores agradecimentos, pela orientação, estímulo e colaboração dispensados no transcorrer de nossas pesquisas.

Agradecemos, também, ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, na pessoa de seu Superintendente, Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni, pelo apoio financeiro e material.

Desejamos, ainda, externar os nossos agradecimentos, ao Prof. Pedro Bento de Camargo e ao Dr. José Antonio Dias Diegues, respectivamente Diretor e Coordenador do Centro de Engenharia Nuclear, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelos incentivos recebidos durante a execução deste trabalho.

Ao Engenheiro Ian Davidson, consultor deste Instituto e aos colegas Mário Nagamati e Daniel Miniquilo Meylan, do Centro de Engenharia Nuclear, somos imensamente gratos pelas sugestões e pela colaboração prestada no decorrer deste trabalho.

Ao Centro de Processamento de Dados pela presteza e auxílio na condução dos cálculos numéricos.

À Srta. Creusa Moreira Diniz, pelo trabalho de datilografia.

Finalmente, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, nos prestaram sua colaboração expressamos nossos agradecimentos.

SUMÁRIO

Foi feita uma análise de tensões e deformações de um modelo reduzido de vaso de pressão de concreto pretendido para reator BWR. Visou-se obter uma confirmação experimental da metodologia de cálculo utilizado presentemente no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN.

O modelo reduzido escolhido como objeto de análise teórica, foi construído e testado no Instituto Sperimentale Modelli e Structure, ISMES, Itália, e corresponde a um modelo em escala 1/10 do vaso real.

Foram utilizados o programa PV2-A que usa o método da relaxação dinâmica e o FEAST-1 que se baseia no método dos elementos finitos.

O confronto teoria-experiência foi feito e seus resultados foram analisados.

Uma análise preliminar foi realizada para o modelo simplificado, monocavidade, ora em desenvolvimento no IPEN, visando a confirmação de dados e método de cálculo utilizado.

ABSTRACT

A stress and strain analysis was made of a scale model of a Prestressed Concrete Pressure Vessel for a Boiling Water Reactor.

The aim of this work was to obtain an experimental verification of the calculation method actually used at IPEN.

The 1/10 scale model was built and tested at the Instituto Sperimentale Modelli e Structure, ISMES, Italy.

The dynamic relaxation program PV2-A and the finite elements programmas , FEAST-1 have been used.

A comparative analysis of the final results was made.

A preliminary analysis was made for a simplified monocavity model now under development at IPEN with the object of confirming the data and the calculation method used.

Í N D I C E

	Pag.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Evolução do Vaso de Pressão de Concreto proten- dido.....	1
1.2. Os Vasos de Oldbury, Wylfa e Fort St. Vrain....	5
1.3. Perspectivas Futuras.....	11
1.4. O Papel dos Modelos Reduzidos na Análise Estru- tural.....	14
1.5. Objetivos da Dissertação.....	15
1.6. Sumário da Dissertação.....	16
2. PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE VPCP.....	18
2.1. Introdução.....	18
2.2. Combinações das Ações	19
2.3. Condições de Projeto e Análise.....	28
3. VASOS DE PRESSÃO EM MODELOS REDUZIDOS.....	30
3.1. Introdução.....	30
3.2. Princípios Básicos do Estudo de Estruturas por Modelos.....	31
3.3. Testes com Modelos Reduzidos dos Vasos de Pres- são de Concreto Protendido.....	35
4. MODELOS REDUZIDOS UTILIZADOS.....	41
4.1. Modelos Reduzidos de ISMES	41
4.1.1. Introdução.....	41
4.1.2. Dados Gerais.....	42
4.2. Modelos Reduzidos do IPEN	55
4.2.1. Introdução.....	55

4.2.2. VPCP Multicavidade para GCFR.....	57
4.2.3. Modelos Monocavidades do IPEN	60
5. MÉTODOS DE CÁLCULO	63
5.1. Método da Relaxação Dinâmica.....	63
5.1.1. Introdução.....	63
5.1.2. Fundamentos da Relaxação Dinâmica.....	64
5.2. Método dos Elementos Finitos	69
5.2.1. Introdução.....	69
5.2.2. Análise Axissimétrica pelo Método dos Elementos Finitos.....	70
5.2.3. Função Deslocamento.....	72
5.2.4. Relações Deformação-Deslocamento.....	75
5.2.5. Deformação Inicial (Térmica).....	77
5.2.6. Relações Constitutivas.....	78
5.2.7. Matriz de Rigidez.....	80
5.2.8. Obtenção da Matriz de Rigidez por Integração Exata.....	81
5.2.9. Forças Nodais.....	83
5.2.10. Cálculo das Tensões.....	89
5.3. Programas de Computação Utilizada no Cálculo.....	89
5.3.1. Introdução.....	89
5.3.2. Programa PV2-A	93
5.3.3. Programa FEAST-1	96
5.4. Cálculos Realizados.....	97
5.4.1. Dimensionamento do Modelo de ISMES.....	97
5.4.2. Análise do Comportamento do Modelo Experimental do ISMES	102
5.4.3. Análise do Comportamento dos Modelos Experimen - tais do IPEN	109

6. RESULTADOS, CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	111
6.1. Introdução.....	111
6.2. Resultados do Dimensionamento do Modelo de ISMES..	111
6.3. Resultados da Análise do Modelo Experimental de ISMES	157
6.4. Resultados da Análise do Modelo Experimental do IPEN	169
6.5. Conclusões e Recomendações Finais.....	180
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185
APÊNDICE A - Equações Usadas no Programa PV2-A, pelo Método da Relaxação Dinâmica.....	194
APÊNDICE B - Equações dos Cabos de Protensão Utilizados no Cálculo do Vaso de ISMES, pelo Programa PV2-A	206

ÍNDICE DAS FIGURAS

	Pag.
FIG. 1.1 - Força de Protensão em Função de Tempo para VPCP de Fort St. Vrain.....	10
FIG. 2.1 - Valores do Fator C para a Compressão Triaxial.....	24
FIG. 4.1 - Disposição do Modelo durante a Prova.....	46
FIG. 4.2 - Sistema de Protensão Circunferencial.....	47
FIG. 4.3 - Detalhes das Penetrações do Modelo.....	48
FIG. 4.4 - Detalhes das Armaduras de Reforço.....	49
FIG. 4.5 - Características Físicas da Armadura de Reforço.....	50
FIG. 4.6 - Curva Granulométrica do Concreto.....	51
FIG. 4.7 - Disposição das Células de Carga (Load Cells).....	52
FIG. 4.8 - Disposição dos Transdutores de Deslocamento	53
FIG. 4.9 - Disposição dos Extensômetros a Resistência Elétrica (Strain Gages).....	54
FIG. 4.10- Corte Vertical do Reator GCFR	57
FIG. 4.11- Vista Superior do Vaso Multicavidade em Escala 1/20.	58
FIG. 4.12- Corte AA do Vaso Multicavidade em Escala 1/20.	59
FIG. 4.13- Dimensões em milímetros, do Vaso monocavidade do IPEN	62
FIG. 5.1 - Elemento de um Sólido Axissimétrico.....	71
FIG. 5.2 - Diagrama de Blocos do Programa PV2-A.....	95
FIG. 5.3.a- Malha do PV2-A para Dimensionamento.....	98
FIG. 5.3.b- Malha do FEAST para Dimensionamento	99
FIG. 5.4 - Malha do PV2-A - Modelo SC-8 do ISMES.....	100
FIG. 5.5 - Malha do FEAST - Modelo SC-8 do ISMES.....	101

FIG. 5.6 - Malha do PV2-A Utilizado na Análise Axissimétrica do Modelo Monocavidade do IPEN.....	110
FIG. 6.1 - Variação da Tensão Radial σ_r e Circunferencial σ_θ nos Pontos A e B do Eixo de Simetria das Lajes.....	113
FIG. 6.2 - Variação das Deformações Verticais nos Pontos A e B do Eixo de Simetria das Lajes.....	114
FIG. 6.3 - Malha adotada pelo Programa AXITEN-3	115
FIG. 6.4 - Malha Graduada numa Estrutura com Alta Concentração de Tensões.....	116
FIG. 6.5 - Viga Bi-apoiada sob Carregamento Uniforme....	117
FIG. 6.6 - Malhas Utilizadas para Análise da Viga Bi-apoiada	118
FIG. 6.7 - Deformação da Viga Bi-apoiada sob Carregamento Uniforme	119
FIG. 6.8 - Variação das Tensões Longitudinais e Transversais numa Viga Bi-apoiada sob Carregamento Uniforme	120
FIG. 6.9 - Malhas Retangulares num Problema de Tensões Plana	121
FIG. 6.10- Tensões Longitudinais no Eixo de Simetria da Viga	123
FIG. 6.11- Cilindro de Parede Espessa Submetido à Pressão Interna	124
FIG. 6.12- Malhas Utilizadas no Cálculo do Cilindro Espesso	125
FIG. 6.13- Deslocamento Radial no Cilindro de Parede Espessa	126
FIG. 6.14- Tensões Radiais e Circunferenciais num Cilindro de Parede Espessa	127
FIG. 6.15- Tensões Radiais no Eixo de Simetria da Laje..	129
FIG. 6.16- Deformações Radiais no Eixo Externo da Barra de Controle e Eixo Central da Bomba de Circulação Principal	130

FIG. 6.17-	Posição dos Conjuntos de Cabos.....	131
FIG. 6.18-	Efeito da Protensão dos Cabos de 1º Grupo Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	132
FIG. 6.19-	Efeito da Protensão dos Cabos de 2º Grupo Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	133
FIG. 6.20-	Efeito da Protensão dos Cabos de 3º Grupo Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	134
FIG. 6.21-	Efeito da Protensão dos Cabos de 4º Grupo Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	135
FIG. 6.22-	Efeito da Protensão dos Cabos de 5º Grupo Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	136
FIG. 6.23-	Efeito da Protensão dos Cabos Verticais Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	137
FIG. 6.24-	Efeito da Protensão dos Cabos da Laje Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm...	138
FIG. 6.25-	Efeito da Protensão dos Cabos do 1º Grupo Estado Triaxial de Tensões	150
FIG. 6.26-	Efeito da Protensão dos Cabos de 2º Grupo Estado Triaxial de Tensões	151
FIG. 6.27-	Efeito da Protensão dos Cabos de 3º Grupo Estado Triaxial de Tensões	152
FIG. 6.28-	Efeito da Protensão dos Cabos de 4º Grupo Estado Triaxial de Tensões	153
FIG. 6.29-	Efeito da Protensão dos Cabos de 5º Grupo Estado Triaxial de Tensões.....	154
FIG. 6.30-	Efeito da Protensão dos Cabos Verticais Estado Triaxial de Tensões	155
FIG. 6.31-	Efeito da Protensão dos Cabos da Laje Estado Triaxial de Tensões.....	156
FIG. 6.32-	Pressurização Interna na Fase Elástica.....	158
FIG. 6.33-	Deformações Radiais na Superfície Externa para Pressão Interna de 70 kg/cm ²	159

FIG. 6.34-	Pressurização Interna até o Início da Fissuração	161
FIG. 6.35-	Esquema de Fissuração Prevista pelo Cálculo à Pressão Interna de 154 kg/cm^2	165
FIG. 6.36-	Esquema de Fissuração prevista pelo Cálculo a Pressão Interna de 193 kg/cm^2	167
FIG. 6.37-	Deslocamentos Radiais e Verticais para Pressão Interna de 90 kg/cm^2 e 140 kg/cm^2 Calculados pelo PV2-A	171
FIG. 6.38-	Esquema de Fissuração do Modelo de IPEN para Diversas Pressões Internas	179
FIG. 6.39-	Processo de Determinação do Módulo de Elasticidade Médio do Concreto	182
FIG. A.1 -	Convenção de Sinal para um Bloco Normal	195
FIG. B.1 -	Curva Tensão-Deformação do Cabo de 7 mm	211
FIG. B.2 -	Curva Tensão-Deformação do Cabo de 8 mm	212

ÍNDICE DAS TABELAS

	Pag.
1.1. Dados Genéricos dos VPCPs Construídos até o momento, em diversos Países.....	7
1.2. Características Geométricas de alguns VPCP em Operação.....	8
1.3. Áreas e Volumes de alguns VPCP em Operação....	9
2.1. Tensões Limites Permissíveis segundo o Código ASMES	22
2.2. Tensões Limites Permissíveis para Aços de Protensão.....	25
2.3. Tensões Limites Permissíveis para Cisalhamento e Apoio do Concreto.....	25
2.4. Temperatura Limite para Concreto e Sistema de Protensão.....	26
2.5. Limite de Exposição à Radiação.....	27
3.1. VPCP em Modelos Reduzidos Construídos nos Diversos Países.....	38
4.1. Características de Projeto do GCFR de 300 MWe.	56
5.1. Capacidade de Alguns Programas Americanos com Fins Genéricos.....	91
5.2. Capacidade de Alguns Programas Estruturais Bidimensionais Inelásticos Existentes nos EUA...	92
5.3. Resultados de Cálculo da Força Distribuída de Protensão Circunferencial para Cabos de 7 mm de Diâmetro.....	104
5.4. Resultados de Cálculo da Força Distribuída de Protensão Circunferencial para Cabos de 8 mm de Diâmetro.....	105
6.1. Tensões Radiais, Circunferenciais e Deformações Radiais no Eixo de Simetria das Lajes para uma Pressão Interna de 85 kg/cm^2	112

6.2. Resultados das Tensões e Deformações numa Viga com Diferentes Número de Elementos Retangulares.....	122
6.3. Efeito da Protensão dos Cabos do 1º Grupo - Tensões Principais σ_{θ}	139
6.4. Efeito da Protensão dos Cabos do 1º Grupo - Tensões Principais Mínicas σ_{p1}	139
6.5. Efeito da Protensão dos Cabos do 1º Grupo - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	140
6.6. Efeito da Protensão dos Cabos do 2º Grupo - Tensões Principais σ_{θ}	140
6.7. Efeito da Protensão dos Cabos do 2º Grupo - Tensões Principais Mínicas σ_{p1}	141
6.8. Efeito da Protensão dos Cabos do 2º Grupo - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	141
6.9. Efeito da Protensão dos Cabos do 3º Grupo - Tensões Principais σ_{θ}	142
6.10. Efeito da Protensão dos Cabos do 3º Grupo - Tensões Principais Mínicas σ_{p1}	142
6.11. Efeito da Protensão dos Cabos do 3º Grupo - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	143
6.12. Efeito da Protensão dos Cabos do 4º Grupo - Tensões Principais σ_{θ}	143
6.13. Efeito da Protensão dos Cabos do 4º Grupo - Tensões Principais Mínicas σ_{p1}	144
6.14. Efeito da Protensão dos Cabos do 4º Grupo - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	144
6.15. Efeito da Protensão dos Cabos do 5º Grupo - Tensões Principais σ_{θ}	145
6.16. Efeito da Protensão dos Cabos do 5º Grupo - Tensões Principais Mínicas σ_{p1}	145
6.17. Efeito da Protensão dos Cabos do 5º Grupo - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	146
6.18. Efeito da Protensão dos Cabos Verticais - Tensões Principais σ_{θ}	146

6.19. Efeito da Protensão dos Cabos Verticais - Tensões Principais Mínimas σ_{p1}	147
6.20. Efeito da Protensão dos Cabos Verticais - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	147
6.21. Efeito da Protensão dos Cabos da Laje - Tensões Principais σ_0	148
6.22. Efeito da Protensão dos Cabos da Laje - Tensões Principais Mínimas σ_{p1}	148
6.23. Efeito da Protensão dos Cabos da Laje - Tensões Principais Máximas σ_{p2}	149
6.24. Deslocamentos Radiais Calculados pelos Programas PV2-A e FEAST-1	160
6.25. Tensões Radiais para Pressão Interna de 154,0kg/cm ² .	162
6.26. Tensões Radiais para Pressão Interna de 154,0kg/cm ² .	162
6.27. Tensões Verticais para Pressão Interna de 154,0kg/cm ² .	163
6.28. Tensões de Cisalhamento para Pressão Interna de 154,0 kg/cm ²	163
6.29. Tensões Principais Mínimas para Pressão Interna de 154,0 kg/cm ²	164
6.30. Tensões Principais Máximas para Pressão Interna de 154,0 kg/cm ²	164
6.31. Deslocamentos Radiais e Verticais Calculados pelo PV2-A, para Pressão Interna de 90 kg/cm ² e 140 kg/cm ²	170
6.32. Coeficiente Angular da Reta Deformação Radial - Pressão Interna	169
6.33. Coeficiente Angular da Reta Deformação Vertical- Pressão Interna	172
6.34. Tensões Radiais para Pressão Interna de 140,0kg/cm ² .	173
6.35. Tensões Tangenciais para Pressão Interna de 140,0 kg/cm ²	174
6.36. Tensões Verticais para Pressão Interna de 140,0kg/cm ² .	175

6.37.	Tensões de Cisalhamento para Pressão Interna de 140,0 kg/cm ²	176
6.38.	Tensões Principais Mínimas para Pressão Interna de 140,0 kg/cm ²	177
6.39.	Tensões Principais Máximas para Pressão Interna de 140,0 kg/cm ²	178
B.1.	Parâmetros Utilizados no Cálculo das Equações dos Cabos de 7 mm de Diâmetro	206
B.2.	Parâmetros Utilizados no Cálculo das Esquações dos Cabos de 8 mm de Diâmetro	207

1. INTRODUÇÃO

1.1- Evolução do Vaso de Pressão de Concreto Protendido

O vaso de pressão de reatores nucleares refrigerados por gás tem como finalidade principal confinar o caroço do reator, suportar as pressões de trabalho do gás refrigerante e servir como blindagem primária contra radia -
ções. Classifica-se, conforme o "Código ASME" (American So -
ciety of Mechanical Engineers), como componente estrutural das usinas nucleares de classe 1 de segurança / 2 /.

Os primeiros reatores de potência refrigerados por gás utilizavam-se de vasos de aço especial envolvidos por uma blindagem biológica de concreto armado. Em 1958, pela primeira vez, vasos de pressão de concreto protendido fo -
ram utilizados nos reatores franceses G2 e G3, em Marcoule. A necessidade de construção de reatores de maior porte, di -
tada pela economia de escala, e o aumento da eficiência e, conseqüentemente, da pressão do gás refrigerante, exigiam maiores dimensões para o vaso de pressão, o que levou a adoção dos vasos de concreto protendido.

O seu advento representou um avanço de maior impor -
tância no desenvolvimento da tecnologia dos reatores refri -
gerados por gás. Entre suas diversas vantagens podem ser citadas as seguintes:

- a) Possibilidade de construção dos vasos de pres -
são de grandes dimensões e alta pressão de tra -
balho do gás.

- b) Possibilidade de construção do vaso no próprio local de obra, sem os inconvenientes do transporte de grandes peças usinadas e posterior soldagem.
- c) Possibilidade de confinamento dentro do VPCP (Vaso de Pressão de Concreto Protendido), também, dos trocadores de calor e geradores de vapor que constituem o conjunto denominado ciclo primário integrado.
- d) As pressões internas são contrabalanceadas por intermédio de milhares de cabos de protensão, e a ruptura dos cabos individualmente não causará problemas para a integridade do VPCP.
- e) O VPCP permite inspeções periódicas desses cabos com o fito de prevenir-se contra qualquer acidente de ruptura desses cabos, permitindo inclusive a substituição de cabo acidentado.

A construção dos primeiros vasos de pressão de concreto protendido foi empreendida na França, devido provavelmente, ao estágio de desenvolvimento naquele país da tecnologia de concreto, graças aos trabalhos pioneiros em concreto armado, dos renomados mestres Considere e Hennibique, e em concreto protendido, Fressynet.

Após a construção dos vasos cilíndricos horizontais dos reatores plutonígenos de Marcoule, projetados por Coyne e Bellier /37/, construiu-se em seguida o vaso de pressão para a Central Nuclear EDF (Electricite de France) em Chinon, em França.

A Central de Oldbury, na Grã Bretanha, foi a sétima

ma do programa de construção de Centrais Nucleares da CEGB (Central Electricity Generating Board) e foi a primeira a utilizar o VPCP na Inglaterra. A pesquisa em modelos reduzidos desse vaso, em escala 1/8, iniciou-se em 1958 na firma Sir Robert McAlpine & Sons, Ltd, e a construção do vaso real foi iniciada em abril de 1962.

O vaso de Oldbury apresenta uma disposição simples de cilindro vertical, com sistemas de cabos helicoidais nas paredes laterais / 32/.

A concepção do sistema integrado das cavidades do reator com a dos geradores de vapor, adotada no vaso Oldbury, representou um dos importantes avanços na tecnologia dos reatores refrigerados por gás e moderados por grafita seguindo-se-lhe todos os VPCP subsequentes para reatores do mesmo tipo, tanto na Inglaterra como em França.

A Central Nuclear de Wylfa /64/ foi a última de uma série a usar os reatores do tipo MAGNOX, usando urânio natural como combustível e construídos na Inglaterra. A potência elétrica total dos dois reatores era de 1.180 MWe . A construção do seu vaso pela English Electric Co. Ltd. , Babcock & Wilcox Ltd. e Taylor Woodrow Construction Ltd. começou em outubro de 1963 e terminou em 1969. Devido às dimensões relativamente grandes e altas pressões de projeto dos dois reatores de Wylfa , adotou-se a forma esférica para a cavidade interna do vaso. Este formato permitiu uma notável economia, comparados com projetos equivalentes e cilíndricos, apesar das dificuldades técnicas construtivas.

Os desenvolvimentos em França foram orientados no sentido de integralizar os projetos dos vasos de St. Laurent,

Vandellos (Espanha) e em Bugey. Em todos os casos, os trocadores de calor foram dispostos sob o caroço do reator, minimizando-se assim o diâmetro do cilindro vertical. Este arranjo provocou a adoção do esquema de inversão da direção do fluxo de gás pelo reator, com conseqüentes complicações.

Os vasos de Dungeness B (Inglaterra) /68/, concretados em 1975, são cilíndricos e apresentavam secções de concreto bem menores do que os seus equivalentes em Oldbury e, como consequência, representou uma grande mudança nos conceitos de segurança.

O sucesso dos tendões helicoidais empregados em Oldbury levou a adotar o mesmo processo em Hinkley B, com uma forma geometricamente simplificada e alguns melhoramentos no sistema de ancoragem.

Os vasos de Hunterston B / 29,36/, também na Inglaterra são idênticos ao do Hinkley B, tanto na concepção quanto no projeto e construção.

Os vasos de Hartlepool /7/, e ultimamente Heysham, introduziram a concepção dos vasos multi-cavidades, pela contenção dos geradores de vapor nas cavidades cilíndricas, moldadas dentro das paredes do vaso. A resistência mecânica dos tampos das cavidades dos geradores de vapor propostos originalmente, levou a Autoridade Licenciadora a não aceitá-los, sendo os tampos substituídos por outros de concreto protendido. Esses vasos multicavidades têm o nome de "tele-dial" dado o formato semelhante ao de um discador de telefone. A principal característica construtiva do projeto Hartlepool foi o uso do sistema "wire winding" para protensão circunferencial.

Nos Estados Unidos, um dos últimos países a adotar

o concreto protendido para vasos de pressão de reatores nucleares, atingiu-se um bom nível de desenvolvimento desta tecnologia com a construção do vaso para reatores do tipo HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) de Fort St. Vrain de 300 MWe (Denver, Colorado)/24,46,49,50/.

As Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 mostram um resumo das principais características dos VPCP desenvolvidos e construídos até o momento.

1.2- Os Vasos de Oldbury, Wylfa e Fort St. Vrain

Com a construção de diversas centrais nucleares que usam VPCP e subseqüentes verificações experimentais e observações do seu funcionamento, aperfeiçoaram-se os métodos de obtenção de dados empíricos bem como os processos de cálculo numérico dos parâmetros de projeto. Nesta secção examinaremos, como exemplos, os VPCP de Oldbury, Wylfa e Fort St. Vrain.

Os VPCP do Oldbury, Wylfa e Fort St. Vrain foram pressurizados e testados quanto a possíveis vazamentos.

O vaso de Oldbury foi testado a partir de 1966 e a análise e obtenção de dados experimentais cobriram um período de aproximadamente 5 anos, após o término de protensão. Os resultados teóricos foram comparados com valores medidos por extensômetros embutidos no concreto do vaso. Estes resultados /9/ indicaram que a análise axissimétrica com a deformação lenta pode estimar com muita precisão o comportamento geral da estrutura.

A protensão dos vasos de Wylfa completou-se em 1968 /64/. Em 1971, iniciou-se um programa para obtenção

dos dados sobre o comportamento desses vasos a longo tempo e os resultados foram publicados em 1973. As medidas das deformações mostraram-se coerentes com os valores calculados. Essas medidas foram obtidas com extensômetros instalados nas quatro secções meridionais do vaso e indicaram a simetria do comportamento.

O VPCP de Fort St.Vrain foi submetido a testes combinados de pressurização e vazamento em 1971 /46,49,50/. O vaso foi pressurizado até 970 psig, após o pré-aquecimento da membrana interna de até $(49 \pm 3)^\circ\text{C}$. O gradiente de temperatura foi mantido por um mês para se conseguir o equilíbrio térmico.

Durante os testes de pressurização, as deflexões medidas à meia-altura do vaso excederam ligeiramente aos valores calculados pelo método dos elementos finitos, com programa tridimensional linear.

A resposta do vaso foi essencialmente linear até uma pressão de 970 psig. Foram comparados, também, os valores medidos das forças de protensão com os resultados obtidos com um programa de computação axissimétrico bidimensional visco-elástico. Conforme indica a Figura 1.1, as forças medidas de protensão diferiram muito dos níveis de projeto, mas houve boa concordância em relação à análise axissimétrica com deformação lenta.

REATOR	PAIS	INICIO DA OPERAÇÃO	POTENCIA		QUANTIDADE DE VASOS	PRESSÃO DE TRABALHO MN/m ² (PSI)	PRESSÃO DE PROJETO MN/m ² (PSI)	PRESSÃO DE TESTE MN/m ² (PSI)	PRESSÃO LIMITE DE PROJETO MN/m ² (PSI)
			Mwt	Mne					
MARCOULE G2,G3	FRANÇA	1958 (G2) 1959 (G3)	200	37	2	1,47 (213)	1,96 (284)	2,24 (326)	6,37 (924)
CHINON EDF-3	FRANÇA	1967	1560	480	1	3,04 (442)	-	3,29 (478)	7,60 (1105)
OLDBURY	INGLATERRA	1968	834	300	2	2,41 (350)	2,65 (385)	3,04 (442)	7,85 (1155)
ST.LAURENT 1	FRANÇA	1969	1652	487	1	2,60 (377)	2,94 (427)	3,24 (470)	7,35 (1065)
WILFA	INGLATERRA	1971	1875	590	2	2,64 (384)	2,94 (427)	3,35 (486)	7,71 (1120)
ST.LAURENT 2	FRANÇA	1971	1652	515	1	2,76 (400)	2,94 (427)	3,24 (470)	7,35 (1065)
BUGEY 1	FRANÇA	1972	1880	540	1	4,48 (650)	4,76 (690)	4,92 (715)	11,87 (1720)
VANDELLOS	ESPAÑA	1972	1750	480	1	2,76 (400)	2,94 (427)	3,24 (470)	7,35 (1065)
FORT ST.VRAIN	ESTADOS UNIDOS	1973	837	330	1	4,86 (704)	5,82 (845)	6,79 (985)	12,11 (1760)
HINKLEY POINT B	INGLATERRA	1976	1500	625	2	4,03 (585)	4,44 (644)	4,89 (709)	10,60 (1540)
HUMBERSTON B	INGLATERRA	1976	1500	625	2	4,03 (585)	4,44 (644)	4,89 (709)	10,60 (1540)
HARTLEPOOL	INGLATERRA	1976	1640	625	2	4,03 (585)	4,44 (644)	5,10 (740)	11,09 (1609)
DUNGENESS B	INGLATERRA	1976	1460	607	2	3,30 (478)	3,58 (520)	3,79 (550)	8,99 (1305)
HEYSHAM A	INGLATERRA	1977	1640	625	2	4,03 (585)	4,44 (644)	5,10 (740)	11,09 (1609)

Tabela 1.1 - Dados Genéricos dos VPCs construídos até o momento, em diversos países.

REATOR	DIÂMETRO INTERNO	ALTURA INTERNA	DIÂMETRO EXTERNO	ALTURA EXTERNA	ESPESSURA MÍNIMA DA PAREDE	ESPESSURA MÍNIMA DA LAJE SUPERIOR	ESPESSURA MÍNIMA DA LAJE INFERIOR
MARCOULE G2,G3	13,69	15,63	20,00	27,50	2,99	2,99	2,99
CHINON 3	19,00	21,25	29,00	33,10	5,04	6,91	5,00
OLDBURY	23,45	18,30	33,85	32,35	4,58	6,40	6,71
ST.LAURENT 1 e 2	19,00	36,30	28,50	48,00	4,75	5,70	6,00
WYLEA	29,25	29,25	35,50	36,30	3,36	3,66	3,36
BUGEY 1	17,08	38,25	28,00	53,15	5,49	7,46	7,46
FORT ST.VRAIN	9,45	22,85	18,60	32,30	2,74	4,73	4,73
HINKLEY POINT B	18,90	19,40	28,95	35,65	5,03	5,49	7,51
DUNGENESS B	19,95	17,70	27,60	29,95	3,81	6,33	5,95
HARTLEPOOL, HEXSHAM	13,10	18,30	25,90	29,25	6,40	5,49	5,49

Tabela 1.2 - Características geométricas de alguns VFCP em operação.

Unidade: metro

REATOR	VOLUME INTERNO DO VASO M ³	SUPERFÍCIE PRESSURIZADA M ²	VOLUME DO CONCRETO M ³
MARCOULE G2,G3	3000	967	6660
CHINON 3	6026	1836	18900
OLDBURY	7905	2210	18500
ST.LAURENT 1 e 2	10293	2734	25000
WYLFA	13100	2690	21200
BUGEY 1	8765	2511	10500
FORT.ST.VRAIN	1603	819	3250
HINKLEY POINT B	5440	1715	22600
DUNGENESS B	5540	1750	12500
HARTLEPOOL, HEYSHAM	3820	1020	11600

Tabela 1.3 - Áreas e volumes de alguns VPCP em operação.

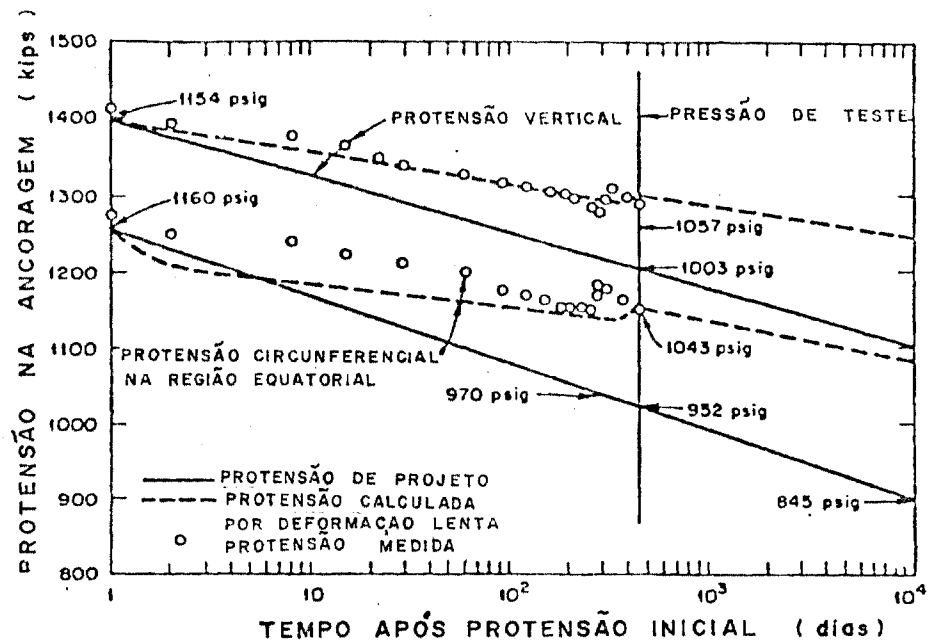


FIGURA 1.1 - Força de Protensão em Função de Tempo para VPCP de Fort St. Vrain

Os resultados dos testes de pressurização dos VPCP, em escala natural, indicam que até mesmo análises elásticas menos refinadas dão resultados razoáveis para a operação normal em condições de pequena sobrepressão do vaso. Entretanto, esses resultados referem-se ao comportamento geral do vaso durante um período de testes relativamente curto e somente observações continuadas dos vasos em operação poderá comprovar as estimativas das análises a longo prazo.

É de extrema importância, a coleta contínua dos dados fornecidos pelo sistema de instrumentação dos vasos em operação. Esses dados servirão para realizar avaliações das

técnicas existentes e de novas teorias, em confronto com o comportamento real.

O presente estado de desenvolvimento dos métodos numéricos de análise de estruturas, permite afirmar que a análise teórica sobrepõe os conhecimentos de engenharia com respeito a propriedades de materiais e critérios de resistência requeridos em vários métodos de análise e programas de computação.

Portanto, pode-se inferir que a prioridade futura dos trabalhos nesta área deve ser a pesquisa de propriedades dos materiais e o estabelecimento da teoria sobre ruína. As técnicas resultantes e as equações correspondentes deverão ser introduzidas nos métodos analíticos e então os resultados previstos em cálculo poderão ser verificados e confrontados com o comportamento real dos vasos e modelos.

Outros exemplos, em grande número, podem ser encontrados na literatura especializada/5,6,7,27,48,51,58/, e sua avaliação historiada. Contudo, restringimo-nos aos três casos acima descritos visando somente fornecer ilustrações do estado atual de desenvolvimento nesse setor.

1.3- Perspectivas Futuras

Os vasos de pressão de concreto protendido tem demonstrado desempenho satisfatório por um período de operação bastante longo (cerca de 20 anos). Dado o fato que a sua resistência é derivada da ação de um sistema de cabos de protensão independentes, eles apresentam boa margem de segurança.

A potencial vulnerabilidade dos vasos de concreto reside na membrana metálica interna juntamente com a barreira térmica e o sistema de refrigeração da parede interna. Com a localização ou reparo de qualquer defeito desses componentes seria muito difícil, os recursos de inspeção e manutenção da membrana devem ser previstos no projeto.

Pode-se dizer que, em função do atual estágio de desenvolvimento da tecnologia dos VPCP, a opção pelo tipo de vaso de pressão tornou-se uma opção econômica, dado a confiabilidade desses vasos e a inexistência de qualquer dificuldade maior na sua construção.

A potencial possibilidade de substituir a estrutura independente de contenção e a barreira biológica de concreto por um sistema único de vaso de concreto poderia reduzir sensivelmente os custos de construção da central. Essa alternativa, contudo, não é considerada viável, no momento, pelas autoridades do setor de licenciamento na Europa e Estados Unidos.

Do ponto de vista de redução do custo, para uma otimização futura do projeto, deve-se considerar:

- a) O desenvolvimento de vasos em configuração de superfície mínima para a membrana interna e mínimo volume de concreto, sem contudo prejudicar o seu desempenho ou construção.
- b) Introdução de novos materiais tais como concreto fibroso para substituição parcial das armaduras convencionais de reforço nas regiões das penetrações.

c) Otimização dos sistemas de penetração e tampa.

d) Desenvolvimento de métodos de análise sistemática das regiões perfuradas da laje.

Adicionalmente, é necessário mencionar os trabalhos de pesquisas e desenvolvimento, sendo levados a efeito na Itália /15,18,34,58) e Suécia /3,4/ sobre utilização de vasos de concreto protendido em reatores de água leve, notadamente em BWR (Boiling Water Reactor), dado a sua dimensão ser maior que os de PWR (Pressurized Water Reactor). Caso esta possibilidade se concretize, pode-se visualizar um aumento da pressão interna dos BWR com os consequentes benefícios em eficiência térmica e, portanto, na economia desse tipo de reator de potência.

Outro desenvolvimento futuro refere-se aos vasos dos reatores superconversores (procriadores ou regeneradores) refrigerados por gás hélio. Nesses reatores, os GCFR (Gás Cooled Breeder Fast Reactors), como consequência da maior densidade de potência, é requerido uma pressão interna da ordem de 90 atmosferas, ou seja, o dobro da pressão para o caso dos reatores térmicos de alta temperatura (por exemplo, o reator de Fort St.Vrain) que é do tipo High Temperature Gas Cooled Reactor. Para esses reatores, a utilização dos VPCP torna-se compulsória dado os requisitos de segurança envolvidos. O seu desenvolvimento, ainda em estágio de modelos reduzidos estão sendo levados a efeito na General Atomic (San Diego, EUA) /21,22,25,43,44,45,56/ na Kajima Corp. (Japão) / 30 / e no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (ver Tabela 3.1, Cap. 3). Finalmente, os VPCPs estão sendo cogitados para utilização na indústria convencional como é o caso de gaseificadores na indústria siderúrgica /26/.

1.4- O Papel dos Modelos Reduzidos na Análise Estrutural

No desenvolvimento da tecnologia dos vasos de pressão de concreto protendido, o estudo de modelos reduzidos desempenha papel crucial na viabilização técnica dos projetos de engenharia.

O confronto entre a teoria e experiência fornece a certeza necessária para a extrapolação de parâmetros de unidades piloto para as unidades de porte comercial. Aplica-se aqui a teoria da semelhança na modelação dos vasos de porte comercial. A lei de modelação é relativamente simples, quando o modelo for geometricamente similar e se for construído do mesmo material. As tensões no modelo, correspondentes às do vaso real são as mesmas; as deformações são proporcionais às dimensões lineares e as forças são proporcionais ao quadrado das dimensões lineares.

Desde a introdução inicial dos VPCPs em reatores de potência, foram construídos diversos modelos, em diversos países, subsidiando os projetos estruturais na construção das principais centrais nucleares espalhadas pelo mundo inteiro.

Tal importância dos modelos reduzidos, que a norma americana, por exemplo, além dos procedimentos analíticos usuais, recomendam executar testes com modelos reduzidos, principalmente para previsão do comportamento da estrutura sob ruína e determinação do seu coeficiente de segurança.

Os modelos descritos neste trabalho também foram construídos visando-se esses mesmos objetivos, eliminando as incertezas dos resultados analíticos baseados em modelos matemáticos com hipóteses simplificadoras.

1.5- Objetivos da Dissertação

A presente dissertação tem como objetivo a avaliação dos métodos de cálculo pela técnica de elementos finitos e de relaxação dinâmica na análise estrutural de modelos reduzidos de vasos de pressão de concreto protendido. Tomou-se como referencial experimental, os dados das experiências conduzidas nos laboratórios do Instituto Sperimentale Modelli e Strutture, em Bérgamo, Itália, com o modelo SC-8.

A análise objetivada foi feita utilizando-se dos programas de cálculo numérico em computador FEAST-1 que se utiliza da técnica de elementos finitos, em PV2-A, de relaxação dinâmica, ambos com opção de geometria axissimétrica.

O confronto teoria-experiência foi feita e seus resultados foram analisados.

Pretendeu-se apresentar, também, os princípios dos procedimentos envolvidos no projeto e análise estrutural de vasos de pressão de concreto protendido utilizado em reatores de potência.

O modelo reduzido de ISMES foi escolhido devido a disponibilidade de dados experimentais no IPEN, e por apresentar as principais características de complexidade envolvidas em projetos de vasos reais de concreto protendido: armaduras de reforço, sistemas de cabos de protensão em três níveis diferentes, malha de reforço nas superfícies e penetrações para barras de controle e bomba de circulação principal.

Um pequeno estudo foi realizado com referência ao modelo simplificado (monocavidade), ora em desenvolvimento no IPEN com a intenção de avaliar o grau de confiabilidade na extrapolação de alguns parâmetros para o futuro projeto do vaso de multicavidades do reator GCFR.

1.6- Sumário da Dissertação

No próximo Capítulo são descritos os principais aspectos pertinentes ao projeto dos VPCPs, dando ênfase às considerações impostas pela norma americana de projeto.

No Capítulo III descrevemos alguns tópicos da técnica de modelação e os princípios básicos do estudo de estruturas por modelos.

No Capítulo IV descrevemos os modelos reduzidos utilizados no cálculo estrutural .

Os métodos de cálculo e programas de computação utilizados na análise estrutural são apresentados no Capítulo V.

Os cálculos realizados estão descritos no final do Capítulo V, sendo os resultados apresentados no Capítulo VI e seus comentários distribuídos no texto, à medida em que são apresentados.

No Capítulo VII são apresentadas as principais referências bibliográficas consultadas.

O Apêndice A contem as equações usadas no programa PV2-A e no Apêndice B, as equações dos cabos de protensão introduzidas nesse programa.

2. PROJETO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE VPCP

Neste Capítulo descreveremos os principais aspectos pertinentes ao projeto dos VPCPs, referentes a esta dissertação. Restringimo-nos às considerações impostas pelas normas americanas de projeto desses vasos dado a abrangência desses guias regulatórios e sua disponibilidade no IPEN.

2.1- Introdução

Os VPCPs têm sido projetados e construídos em diversos países, mas os procedimentos adotados no projeto e análise variam de acordo com as normas vigentes em cada país.

Nos Estados Unidos da America, o projeto e construção de vasos de concreto para reatores seguem o Código da ASME (American Society of Mechanical Engineers), "Boiler and Pressure Vessel Code", Secção III, Divisão 2.

Publicado em janeiro de 1975, o código americano para vasos de pressão e contenção de concreto tornou-se de uso mandatório a partir de 1º de julho de 1975. A Divisão 2 é subdividida em três subsecções, dois grupos de apêndices e uma outra que contem referências sobre os materiais. A subsecção CA trata dos requisitos gerais; a subsecção CB, dos vasos de pressão de concreto e subsecção CC, das contenções de concreto.

No caso dos VPCPs, o código apresenta especificações detalhadas onde o projeto é similar a estruturas tradicionais tais como: emenda para armaduras (CB-3531, CB-4300) e solda do liner (CB-3840, CB-4500). Entretanto,

nas áreas onde os VPCPs diferem dos vasos de pressão tradicionais, a especificação não apresenta muitos detalhes, por exemplo, as secções sobre o concreto (CB-3440, CB-3450, CB-4200) e cabos de protensão (CB-3510, CB-3520, CB-4400) descrevem somente generalidades.

Nos ítems 2 e 3, a seguir, descreveremos os tópicos mais importantes contidos nas normas da ASME.

2.2- Combinações das Ações

Diversas ações e suas combinações devem ser consideradas no projeto de um VPCP. O código americano /2/ as classifica em seis categorias e lista numerosas combinações das ações em cada categoria.

Nestas categorias, as tensões limite permissíveis estão especificadas nas Tabelas CB-3421-1, CB-3420-2 e CB-3422-1, e foram aqui reproduzidos nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3, respectivamente.

As categorias são as seguintes:

a) Combinações das ações na fase construtiva.

São as combinações que incluem ações resultantes da fabricação, construção ou testes pré-operacionais do VPCP.

Os exemplos das ações nesta categoria são: carga permanente do vaso e seus equipamentos, força de protensão (incluindo diversas fases de protensão e suas perdas), retração e deformação lenta do concreto, temperatura, pressão de teste do vaso e efeito dos ventos.

b) Combinações das ações normais.

São as combinações que incluem ações resultantes da partida do sistema, operações normais e desligamentos (na ausência das condições anormais de ruína), e das operações de manutenção e recarregamento do reator.

Os exemplos das ações nesta categoria são: pressão das cavidades do reator e das penetrações, temperatura das paredes do vaso, carga permanente do vaso e equipamentos internos, carga móvel dos equipamentos de recarregamento e de serviços, condições de deformação lenta e retração do concreto do VPCP e relaxação do sistema de protensão, reações estáticas e cargas de tubulações, ações dinâmicas provenientes dos equipamentos de operação e das tubulações, ações provenientes das dilatações térmicas das tubulações.

c) Combinações das ações anormais.

São combinações que incluem ações resultantes dos eventos não programados dentro de um intervalo de ocorrência de 20 anos, ou menos, devido a causas como: falha do operador, falha do equipamento, problemas no desligamento elétrico e outras combinações similares. As combinações desta categoria são aquelas que requerem uma ação corretiva imediata ou desligamento da usina e reparo dos danos.

d) Combinações das ações severas.

São combinações que incluem ações resultantes dos efeitos ambientais severos que são postulados como ocorrência de baixa frequência no local da usina.

Os exemplos das ações nesta categoria são: terremoto básico de operação (Operating Basis Earthquake) escolhido para o local; vento básico de operação (Operating Basis Wind) com características apropriadas para a região.

e) Combinações das ações ambientais extremas.

São combinações que incluem ações com intervalo de ocorrência extremamente longa.

Os exemplos das ações nesta categoria são : Terremoto para desligamento seguro (Safe Shutdown Earthquake), tornado de característica apropriada para a região, tsunamis e acréscimo de temperatura no VPCP.

f) Combinações das ações de ruína.

São combinações que incluem ações resultantes da ruína dos componentes com possibilidade extremamente remotas de ocorrência.

Os exemplos das ações nesta categoria são: condições de fissuras pressurizadas, aumento de temperatura no concreto do vaso onde sua capacidade de resistência estrutural é requerida, ruína da tampa de penetração, vapores sobre dispositivos de ancoragem da protensão, ruína dos tendões ou degradação de até 50% dos valores básicos de projeto.

CATEGORIA DE TENSÃO	CATEGORIA DE AÇÃO	TENSÃO MÉDIA		TENSÃO LOCAL	
		Tensão Primária	Tensão Primária + Tensão Secundária	Tensão Primária	Tensão Primária + Tensão Secundária
Construção	Construção	$f_{cc}=0,40Cf_{cua}$ $f_{ct}=0$ $f_s=0,50 f_y$	$f_{cc}=0,53Cf_{cua}$ $f_{ct}=3,0 f_{cua}$ $f_s=0,67 f_y$	$f_{cc}=0,50Cf_{cua}$ $f_{ct}=6,0 f_{cua}$ $f_s=0,50 f_y$	$f_{cc}=0,67Cf_{cua}$ $f_{ct}=7,5 f_{cua}$ $f_s=0,67 f_y$
Normal	Normal, Anormal e Ambiental Severa	$f_{cc}=0,30Cf_{cua}$ $f_{ct}=0$ $f_s=0,50f_y$	$f_{cc}=0,40Cf_{cua}$ $f_{ct}=3,0 f_{cua}$ $f_s=0,67f_y$	$f_{cc}=0,45Cf_{cua}$ $f_{ct}=6,0 f_{cua}$ $f_s=0,50f_y$	$f_{cc}=0,60Cf_{cua}$ $f_{ct}=7,5 f_{cua}$ $f_s=0,67f_y$
Emergência	Ambiental Extrema	0,75 (Capacidade Limite da Seção Crítica ou do Mecanismo)			
Falha	Ruína	0,90 (Capacidade Limite da Seção Crítica ou do Mecanismo)			

Tabela 2.1 - Tensões limites permissíveis segundo o código ASME.

Onde:

f_{cc} = Tensão limite de compressão do concreto , psi

f_{ct} = Tensão limite de tração do concreto, psi

f_{cua} = Resistência à compressão de projeto do concreto, psi

f_y = Tensão de tração de escoamento da armadura de reforço , psi

f_s = Tensão no aço, psi

f_{su} = Resistência limite de tração do aço, psi

f_{sy} = Resistência à tração de escoamento do cabo de protensão.

O procedimento para determinação do fator C da Tabela CB-3421-1 é especificado no Apêndice II do Código ASME. A Fig. 2.1 fornece estes valores de C para compressão triaxial, onde : f_{c1} , f_{c2} , f_{c3} são as tensões principais de compressão no concreto máxima, intermediária e mínima, respectivamente.

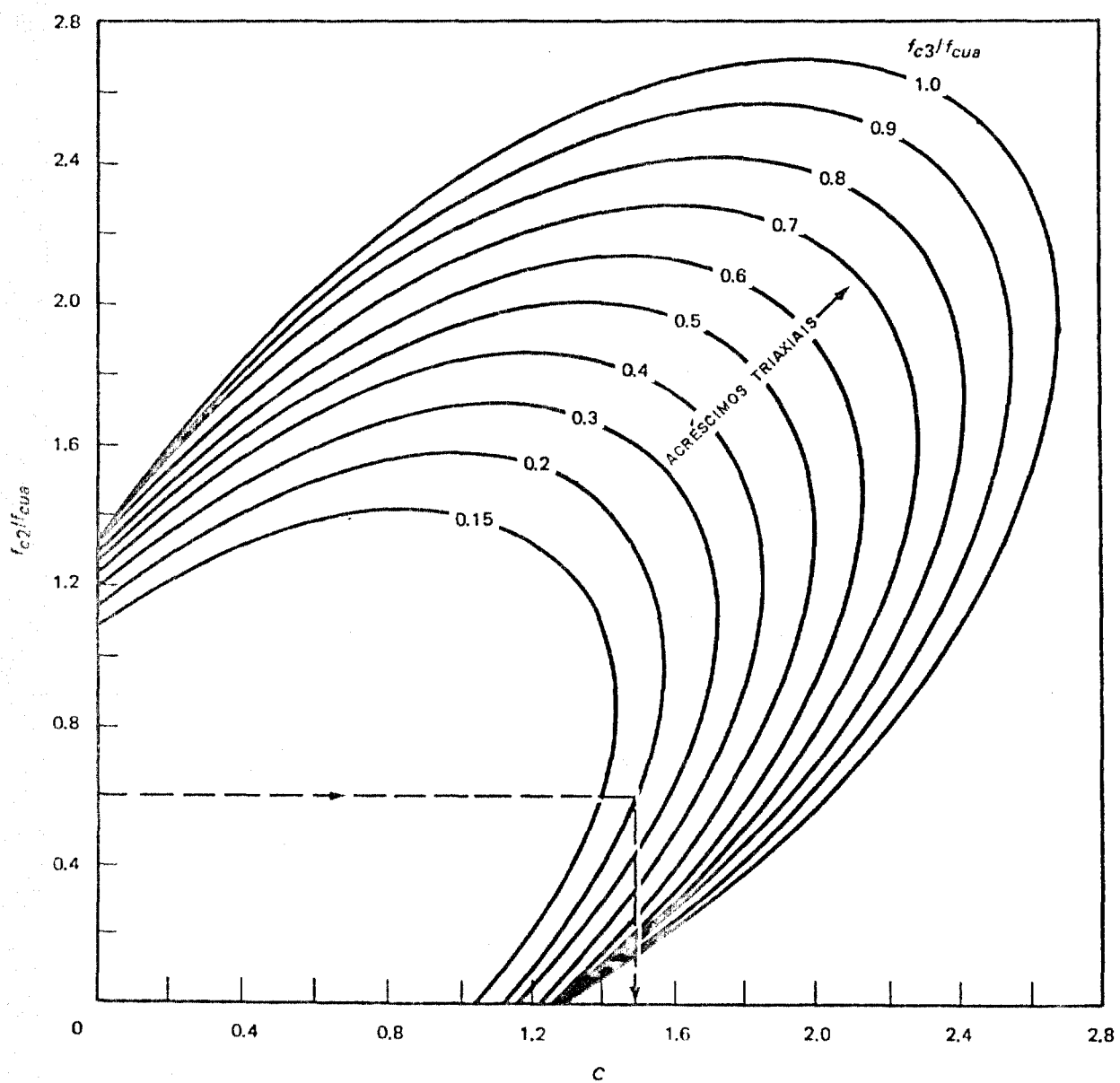


FIGURA 2.1- Valores do Fator C para a Compressão Triaxial

Tabela 2.2 - Tensões Limites Permissíveis para Aços de Protensão.

Categoria de Tensão	Categoria de Ação	Tensões Limites
Construção	Construção	$f_s = 0,80 f_{su}$ e $f_s = 0,90 f_{sy}$
Normal	Normal, anormal, e ambiental severa	$f_s = 0,70 f_{su}$ e $f_s = 0,80 f_{sy}$
Emergência	Ambiental extrema	$f_s = 0,80 f_{su}$ e $f_s = 1,0 f_{sy}$
Falha	Ruína	$f_s = 1,0 f_{su}$

Tabela 2.3 - Tensões Limites Permissíveis para Cisalhamento e Apoio do Concreto

C o n d i ç ã o	T e n s ã o
Tensão de Cisalhamento:	
Não confinado	$3 \sqrt{f_{cua}}$
Confinado	$0,075 f_{cua}$
Tensões de Apoio:	
Concreto confinado	$0,6 f_{cua}$
Concreto não confinado	$0,2 f_{cua}$

Os limites de temperatura para estas categorias estão relacionadas na Tabela 2.4 abaixo .(CB-3430-1).

Tabela 2.4- Temperatura Limite para Concreto e Sistema de Protensão.

<u>Categoria da Ação</u>	<u>Área</u>	<u>Temperatura limite</u> (°F)
Construtiva Normal	Concreto	130
	Membrana interna	
	Interface membrana -concreto	150
	Entre tubos de refrigeração	200
	Concreto	150
	Concreto sob aquecimento nuclear	160
	Pontos locais de aquecimento	250
	Cabos de protensão	150
Anormal, Ambiental severa	Membrana interna	
	Interface membrana-concreto	200
	Entre tubos de refrigeração	270
	Concreto	200
	Pontos locais de aquecimento	375
Ambiental Extrema	Cabos de protensão	175
	Membrana interna	
	Interface membra-concreto	300
	Entre tubos de refrigeração	400
	Concreto	300
Ruína	Pontos locais de aquecimento	500
	Cabos de protensão	300
	Concreto	
	Condição não pressurizada	400
	Condição pressurizada	600

Os limites de exposição à radiação estão relacionados na Tabela 2.5 abaixo.

Tabela 2.5 - Limite de Exposição à Radiação

<u>Material</u>	<u>Exposição</u>
Concreto	10×10^{20} nvt
Armaduras de reforço	1×10^{18} nvt 1 Mev
Cabos de protensão	1×10^{17} nvt 1 Mev
Membrana interna	conforme a especificação do projeto.

2.3- Condições de Projeto e Análise

Um VPCP típico apresenta penetrações, membrana interna, isolamento, sistemas de refrigeração, armadura de reforço e sistemas de alívio de pressão interna. O concreto é mantido sob compressão por cabos de protensão para principais condições de carregamento conforme estabelecidas na Tabela CB-2421-1 do Código da ASME.

Duas diferentes condições de projeto e análise são consideradas.

- a) O VPCP é projetado para responder elasticamente a pressões durante a operação normal do reator.

A análise para as condições normais de trabalho deve levar em conta as características dependentes do tempo e da temperatura do concreto. Para as ações de protensão e peso próprio durante a fase construtiva e até a data do início de teste do vaso, o concreto é suposto apresentar um comportamento elástico linear. Para outras condições de carregamento de trabalho, a relação tensão - deformação do concreto deve-se levar em conta a idade, temperatura e tempo sob o efeito do carregamento.

Sob condições de trabalho normal, o concreto deve-se manter totalmente comprimido; permitindo limitadas fissuras se houver armadura passiva de reforço nessas regiões e se a integridade da membrana não for prejudicada.

- b) O VPCP deve apresentar um adequado coeficiente de segurança contra ruína.

O limite de projeto, levadas em conta as hipóteses do mecanismo de ruína é usado para estabelecer a capacidade de resistência estrutural limite.

O código americano /2,26,27/ somente requer que a pressão limite seja duas vezes a pressão máxima da cavidade interna e não específica onde ou que tipo de ruína deve apresentar-se. Mas, este deve ser gradual e previsível. Geralmente, os projetistas têm proposto uma prioridade na ocorrência de uma ruína dúctil na região da parede anterior sobre a ruína instantânea nas regiões da laje superior.

Após o término da construção, com intuito de garantir integridade do vaso, o código americano requer uma pressão de teste 1,15 vezes o valor do projeto e, quando aplicado ao vaso, não cause:

- a) Escoamento de quaisquer reforços convencionais.
- b) Sinais de danos permanentes.
- c) Mais de 20% de deflexão residual após 24 horas de -
pois da despressurização.
- d) Deflexões medidas excedendo os valores calculados em
mais de 30%.

A norma recomenda testes com modelos reduzidos para de-
terminação do coeficiente de segurança contra ruína, os
quais descreveremos no Capítulo 3.

Os principais métodos de análise são descritos no
Capítulo 5.

3. VASOS DE PRESSÃO EM MODELOS REDUZIDOS

3.1 - Introdução

O estudo de modelos reduzidos é parte essencial da viabilização técnica de projetos de engenharia onde ainda permanecem dúvidas quanto a processos de cálculo ou a viabilidade física do elemento em estudo. Em obras de engenharia civil não convencional, a construção e verificação experimental de modelos reduzidos é tarefa comum para o estabelecimento da viabilidade técnica da obra objetivada.

Assim, o modelo reduzido serve como "bancada de testes" para a verificação experimental dos parâmetros de entrada e dos modelos de cálculo. O confronto entre a teoria e a experiência representa assim a única garantia real da viabilidade da obra ensejada.

Portanto, o estudo de modelos representa um instrumento de grande potencialidade para o projetista fornecendo-lhe o conhecimento das estruturas reais sem o dispêndio de grandes investimentos.

Na sua construção relaciona-se diversos problemas como os materiais a empregar, as relações de semelhança entre protótipos e modelo, as técnicas construtivas e de ensaio, as medidas a realizar, a instrumentação e a elaboração de resultados.

A escolha do tipo de modelo mais adequado para uma determinada estrutura depende fundamentalmente do tipo de análise desejada e das ações atuantes na estrutura e que de

verão ser representadas no modelo. Construído o modelo da estrutura real em escala, aplicam-se as cargas, medem-se as deformações e extrapolam-se os resultados para o modelo real, obedecendo aos princípios da semelhança física.

3.2- Princípios Básicos do Estudo de Estruturas por Modelos

Existem inúmeros estudos / 6,11,18,20,29 / referentes à teoria da semelhança. As principais características de modelação de estruturas de engenharia civil são:

- 1^a) Duas estruturas são semelhantes quando suas grandezas, de maior interesse estão relacionadas por fatores de proporcionalidades constantes. Para isso, a teoria da semelhança física exige que parâmetros adimensionais envolvendo as grandezas físicas em jogo tenham o mesmo valor, em ambos os sistemas ou em ambas as estruturas. Tais parâmetros são os grupos de fatores π do Teorema de Buckingham.

Os mais simples, evidentemente, são os parâmetros geométricos, onde concluímos que as estruturas devem ser geometricamente semelhantes, em todos os detalhes.

- 2^a) Se as deflexões em dois pontos A e B da estrutura real, e de seus homólogos A_m e B_m do modelo forem proporcionais para carregamentos unitários semelhantes, ou seja:

$$\frac{y_A}{y_m} = \frac{y_B}{y_{Bm}} *$$

* Índices m representam modelo.

E quando houver uma carga unitária nos pontos homólogos J e J_m , então, as respectivas matrizes de flexibilidade devem ser proporcionais:

$$[F] = K [F_m] , \text{ sendo } K \text{ uma constante}$$

$$\text{De fato } y^A = f_{A_j} \cdot u_j \quad y^A_m = f_{A_{j_m}} \cdot u_j$$

(u_j é a carga unitária no ponto j , $|u_j| = 1$)

$$y^B = f_{B_j} \cdot u_j \quad y^B_m = f_{B_{j_m}} \cdot u_j$$

Se $\frac{y^A}{y^A_m} = \frac{y^B}{y^B_m} = K$ é preciso que

$$\frac{f_{A_j}}{f_{A_{j_m}}} = \frac{f_{B_j}}{f_{B_{j_m}}} = K$$

3ª) Os parâmetros adimensionais $\frac{E}{G}$ e $\frac{E_m}{G_m}$ devem ser iguais.

Sendo $E, E_m =$ módulo de elasticidade

$G, G_m =$ módulo de elasticidade transversal

Tal igualdade acarreta em igualdade entre os módulos de Poisson na estrutura real e no modelo:

$$\nu = \nu_m$$

4ª) A distribuição das cargas, envolvendo pontos de carregamento e direções das forças devem ser semelhantes.

5^a) O teorema de BUCKINGHAM , modificado por VAN DRIEST, limita o número de parâmetros significativos, para haver semelhança física.

No caso de problemas estruturais estáticos o outro parâmetro adimensional é dado por:

$$\frac{F}{E \cdot d^2} = \frac{F_m}{E_m \cdot d_m^2}$$

Sendo: F = força externa qualquer
E = módulo de elasticidade
d = dimensão típica.

As reproduções em escalas reduzidas impõem algumas limitações na modelação. Por exemplo, o modelo de concreto não reproduzirá corretamente as tensões devidas a carga própria, pois:

Se E_m = módulo de elasticidade do material escolhido para a fabricação do modelo.

γ_m = densidade específica deste material.

$$E \quad \lambda = \frac{L}{L_m}, \text{ escala geométrica} \quad 3.1$$

Por outro lado:

A relação entre as forças de superfície:

$$\tau = \frac{E}{E_m} \quad 3.2$$

A relação entre as densidades específicas:

$$\rho = \frac{\gamma}{\gamma_m} \quad 3.3$$

A semelhança de todas as grandezas dimensionais do problema é definida em função das relações λ , τ e ρ .

Em particular, temos:

A relação entre as forças:

$$\psi = \frac{F}{F_m} = \tau \cdot \lambda^2 \quad 3.4$$

A relação entre as massas:

$$u = \frac{M}{M_m} = \rho \cdot \lambda^3 \quad 3.5$$

Como as forças peso são também reproduzidas pela relação ψ , temos:

$$\psi = u \cdot a = a \cdot \rho \cdot \lambda^3 \quad 3.6$$

onde \underline{a} é a escala das acelerações.

Consequentemente:

$$\tau \cdot \lambda^2 = a \cdot \rho \cdot \lambda^3$$

$$\text{Portanto: } a = \frac{\tau}{\rho \cdot \lambda} \quad 3.7$$

A reprodução das forças-peso conduz a tomar o valor da escala de aceleração $a = 1$.

$$\text{Portanto temos: } \tau = \rho \cdot \lambda \quad 3.8$$

Em particular, quando as propriedades dos materiais usados na construção do modelo são as mesmas dos materiais do protótipo, então: $\tau = 1$.

E, pela Eq. 3.8, tem-se: $\rho = 1/\lambda$, isto é, as forças de massa do modelo devem ser λ vezes maiores. Entretanto, as tensões causadas pelas cargas próprias são desprezíveis. /18/.

3.3- Testes com Modelos Reduzidos dos Vasos de Pressão de Concreto Protendido

Os testes com modelos reduzidos são partes essenciais no procedimento do projeto de um VPCP.

A norma americana especifica testes com modelos, quando os procedimentos analíticos dos cálculos do VPCP não estabelecerem com devida precisão o comportamento do vaso na ruína, ou quando protótipos com características similares não tenham sido testados. Especifica também as diversas escalas para os modelos conforme o objetivo do teste /2/.

Os modelos usados para correlação com o projeto dos VPCP podem ser divididos em quatro categorias:

- a) Modelos de resina epoxi em pequena escala usados para testes no campo elástico.
- b) Modelos de microconcreto para determinação dos mecanismos de ruína.
- c) Modelos em escala maior de concreto convencional com dimensão máxima do agregado de 1 cm.

d) Modelos de partes ou regiões específicas do VPCP.

A Tabela 3.1 lista os principais modelos testados nos diversos países, ao longo dos 20 anos, os tipos dos testes e as respectivas organizações condutoras desses testes.

Muitas pesquisas estão sendo realizadas nas diversas instituições em nível bastante sofisticado com respeito a escolha do concreto para modelos, pois isto requer uma redução das dimensões dos agregados. Entretanto, há algumas limitações nas aproximações da realidade física, propostos pela natureza e objetivo dos testes.

Geralmente, considera-se suficiente que as características do concreto escolhido para o modelo caiam dentro do campo de dispersão das propriedades do concreto normal. Além disso, dentro dos limites e objetivos da pesquisa, não se exige necessariamente a reprodução completa das propriedades dos materiais. Por exemplo, a redução das dimensões dos grãos dos agregados numa escala real é ilógica, pois isto implicaria em piores condições ao modelo, no que diz respeito à distribuição de fissuras. Pelo contrário, as propriedades mecânicas devem ser rigorosamente respeitadas. /6,18/.

Uma redução correta dos agregados implicaria em aumento na porcentagem da argamassa de cimento e isto, por sua vez, implicaria no aumento da deformação lenta e retração do material, devido ao alto teor de água. Portanto, não se consegue na prática, uma reprodução teoricamente correta dos conglomerados e a dimensão máxima dos agregados é geralmente determinada em função dos espaçamentos existentes entre as armaduras.

Além disso, a correlação entre o modelo e o protótipo se torna cada vez mais difícil devido a idades diferentes das duas estruturas. De fato, durante a fase de projeto, o modelo é testado necessariamente em curto prazo, enquanto que o protótipo entrará em funcionamento alguns anos após sua construção. Portanto, é impossível levar em conta, para um modelo, as mudanças que surgem nas propriedades do material ao longo do tempo. /6,8,18,26/.

As pesquisas sobre os efeitos da deformação lenta e retração nos modelos não atingiram um grau máximo de confiabilidade até o presente momento.

Tabela 3.1.1 - VPCP em Modelos Reduzidos Construídos nos Diversos Países .

Organização, País	Tipo de Modelo	Escala	Projeto	Nº de Modelos	Testes Realizados (*)
1. AEC Francesa, França	Laje do Vaso	-	G2, G3	2	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	1/10	G2, G3	3	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	-	Segurança	25	C,D
	Vaso Cilíndrico	-	G2, G3	2	A,B,C
2. Societé d'Etudes et d'Equipments d'Entreprises (SEEE), França	Vaso Cilíndrico	1/6	EDF-3	3	A,B,C,D
	Vaso Cilíndrico	1/10	EDF-3	1	T
	Vaso Cilíndrico	1/5	EDF-4	2	A,B,C,T
	Vaso c/Liner Quente	-	Geral	1	A,B,C,T
	Vaso Cilíndrico	1/5	Bugey I	2	A,B,C,T
3. Eléctricité de France (EDF), França	Cilindro 2 Camadas	1/3	Geral	1	A,B,C,T
	Vaso Cilíndrico	1/8	Oldbury	1	A,B,C,T
4. Central Electric Research Laboratory, Inglaterra	Vaso Cilíndrico	1/8	Pre-Oldbury	1	B,C
	Vaso Cilíndrico	1/7	Oldbury	1	A,B,C,T,D
5. Sir Robert McAlpine & Sons, Inglaterra	Vaso Cilíndrico	1/10	Hinkley Pt B	1	A,B,C
	Vaso Multicavidade	1/14	HTR	1	A,B,C
	Vaso Esférico	1/12	Wylfa	1	A,B,C
6. Taylor Woodrow Construction Ltd. (TWC), Inglaterra	Vaso Esférico	1/40	Wylfa	1	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	-	Wylfa	3	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	1/10	Hunterston B	1	A,B
	Laje do Vaso	1/24	Diversos	12	A,B,C
	Vaso Multicavidade	1/10	Hartlepool	1	A,B,C
	Laje do Vaso	1/13	Ft.St.Vrain	2	A,B,C,D
	Vaso Multicavidade	1/30	HTGR	2	A,B,C
	Vaso Esférico	1/12	Wylfa	1	A,B,C,T
	Vaso Esférico	1/12	Wylfa	1	A,B,C,T
	Vaso Multicavidade	1/12	Wylfa	1	A,B,C,T

Tabela 3.1 (Continuação)

Organização País	Tipo de Modelo	Escala	Projeto	Nº de Modelos	Testes (*) Realizados
8. Atomic Power Construction, Inglaterra	Vaso Cilíndrico	1/10	Dungeness B	1	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	1/26	Dungeness B	1	B,C
	Laje do Vaso	1/72	Dungeness B	1	B,C
	Laje do Vaso	1/24	Dungeness B	3	B,C
	Laje do Vaso	1/26	Dungeness B	2	B,C
9. Building Research Station, Inglaterra	Vaso Cilíndrico	1/10	Hinkley Pt B	1	T
	Vaso Cilíndrico	1/20	Hinkley Pt B	4	T
10. Foulness, Inglaterra	Vaso Cilíndrico	1/20	Segurança	30	C,D
11. General Atomic, Estados Unidos	Vaso Cilíndrico	1/4	Geral	1	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	1/4	Ft. St. Vrain	1	A,B,C,D,T
	Vaso Multicavidade	1/20	HTR	1	A,B,C
12. Laboratório Nacional de Oak Ridge, Estados Unidos	Vaso Cilíndrico	-	Geral	4	A,B,C
	Parede do Vaso	1/6	Geral	1	A,T
13. Universidade de Illinois, Estados Unidos	Vaso Cilíndrico	-	Geral	35	C,D
	Laje do Vaso	1/20	Geral	21	C,D
14. Universidade de Sydney, Australia	Vaso Cilíndrico	1/3	-	1	A,B,C
16. Krupp, Alemanha	Vaso Cilíndrico	1/20	GCR	1	A,B,C
	Laje do Vaso	1/20	GCR	1	A,B,C

Tabela 3.1 (Continuação)

Organização País	Tipo de Modelo	Escala	Projeto	Nº de Modelos	Testes Realizados (*)
17. ENEL/ISMES, Itália	Vaso Cilíndrico	1/10	BWR	1	A,B,C
	Vaso Cilíndrico	1/20	HTGR	2	A,B,C
	Laje do Vaso	1/20	HTGR	-	C
18. Ohbayashi-Gumi, Japão	Vaso Cilíndrico	1/20	HTGR	1	A,B,C
	Vaso Multicavidade	1/20	HTGR	1	A,B,C
19. Cement & Concrete Inst. Trondheim, Noruega	Vaso Cilíndrico	1/3.6	LWR	4	A,B,C
20. A.B. Atomenergi, Studsvik, Suécia	Vaso Cilíndrico	1/2.6	LWR	1	A,B,T
21. Electric Power Development Co., Ltd. & Shimizu Construction Co. Ltd., Japão	Vaso Cilíndrico	1/10	Hinkley Pt B	1	A,B,C
22. Nuclear Power Development Lab. & Kashimi Kenetsu, K.K, Japão	Vaso Cilíndrico	1/20	-	3	A,B,T
23. PCRV Research & Development Group, Kajima Corporation, Japão	Vaso Cilíndrico	-	Modelo ORNL	3	A,B,C,T
	Vaso Multicavidade	1/20	GA 1100 MWe	2	A,B,C
24. Takenaka Technical Research Laboratory, Japão	Laje do Vaso	1/20	Geral	14	A,B,C
25. Instituto de Pesquisas Energé- ticas e Nucleares, Brasil	Vaso Cilíndrico	1/20	CCFR	3	A,B

(*) A, Resposta Elástica; B, Sobrepressão; C, Ruína; D, Condições Anormais; T, Deformação Lenta e Temperatura.

4. MODELOS REDUZIDOS UTILIZADOS

Neste Capítulo descreveremos com mais detalhes o modelo reduzido de ISMES e o arranjo experimental nele utilizado. Este modelo foi o objeto principal de nossas considerações. Descreveremos, também, de modo menos detalhado, os modelos de VPCP e em estudo no IPEN. Os cálculos referentes aos modelos do IPEN tiveram como objetivo apenas referendar as técnicas de cálculo utilizados no modelo de ISMES.

4.1- Modelo Reduzido de ISMES

4.1.1- Introdução

Um programa de pesquisas em modelos reduzidos de vasos de concreto protendido foi realizado no Instituto Experimental de Modelo e Estrutura - ISMES, em Bêrgamo, na Itália, sob a direção da Organização Nacional de Energia Elétrica, Roma, como parte de um projeto de pesquisas para a aplicação do vaso de pressão de concreto protendido num reator BWR.

Os principais objetivos deste estudo foram os seguintes:

- Determinar as condições de deformação da estrutura induzida por:
 - a) Força dos cabos de protensão.
 - b) Pressão interna correspondente a condição normal de trabalho (75 kg/cm^2).
 - c) Pressão interna com a presença de um gradiente térmico entre a superfície interna e externa do concreto de 10°C .
- Verificar a deformabilidade dentro das condições normais de trabalho na área central da laje inferior, onde existe grande número de penetrações.

- Verificar a margem de segurança da estrutura, sob o incremento da pressão interna.
- Verificar a sequência de ruptura dos sistemas de cabos de protensão em confronto com o projeto.

4.1.2- Dados Gerais

O vaso reduzido de BWR, em escala 1:10, é cilíndrico e a disposição para teste é apresentada na Figura 4.1.

Os sistemas de protensão referentes ao vaso do protótipo e do modelo são as seguintes:

a) Protensão Circunferencial

Consiste de cabos de 7mm de diâmetro, equipados com ancoragem do tipo BBR. Os cabos são ancorados em 12 suportes de concreto espaçados em 30°.

Cada sistema circunferencial é formado de quatro camadas de cabos tipo (a-b-c-d) defasados de 90°. Estas, por sua vez, são formados pelos três cabos com diferentes raios de curvatura (Fig. 4.2).

As características dos sistemas nas regiões da lage e parede são:

L A J E :

P R O T Ó T I P O	M O D E L O
Três sistemas circunferenciais, espaçamento: 88 cm	Quatro sistemas circunferenciais, sendo três sistemas de cabos monofio, diâmetro $\phi = 8\text{mm}$.
Altura total de protensão: 264 cm (3 x 88)	- UTS. (Ultimate Tensile Stress) = 890 kg.
Tipo do cabo :163 fios, $\phi = 7\text{mm}$ UTS = 1129 ton	Um sistema de cabo monofio $\phi = 7\text{mm}$
Área transversal total dos cabos = 2.258 cm ²	Carga de trabalho: $\phi = 8\text{ mm} - 6333\text{ kg}$ $\phi = 7\text{ mm} - 4848\text{ kg}$ (por cabo)
	Área transversal total dos cabos : 22,70 cm ²

P A R E D E:

<u>P R O T Ó T I P O</u>	<u>M O D E L O</u>
14,5 sistemas circunferenciais	16 sistemas circunferenciais:
Espaçamento : 100 cm	Espaçamento : 90,62 mm
Tipo do cabo: 109 fios $\phi = 7\text{mm}$	Tipo do cabo: Monofio $\phi = 7\text{mm}$
UTS = 755 ton	
4 sistemas circunferenciais:	5 sistemas circunferenciais:
Espaçamento : 141,5 cm	Espaçamento: 113,2 mm
Tipo do cabo: 121 fios, $\phi = 7\text{mm}$	Tipo do cabo: Monofio, $\phi = 7\text{mm}$
UTS = 838 ton	Altura total de protensão: 2016mm
Altura total de protensão: 2016cm	Área transversal total dos
Área transversal total dos	cabos : 96,97 cm ² .
cabos : 9533 cm ²	

Coeficiente médio de atrito dos cabos : 0,15 (determinado experimentalmente).

Bainha : Aço doce . Aq-42.

b) Protensão Vertical:

<u>P R O T Ó T I P O</u>	<u>M O D E L O</u>
96 cabos de 139 fios, $\phi = 7\text{mm}$	96 cabos monofios, $\phi = 8\text{mm}$
Ancoragem do tipo BBR	distribuídos como no protótipo.
UTS = 962 ton	
Protensão Nominal: 0,7 x UTS	Carga de trabalho: 6333 kg (por cabo)

OBS.: Todos os cabos de protensão são do tipo sem aderência.

c) Membrana Interna:

A membrana interna é simulada no modelo, por um de cobre recozido de 3 mm de espessura, previsto para resistir -

sem vazamento da água, até a ruptura dos cabos de protensão.

A membrana não foi ancorada no concreto.

d) Penetrações:

As penetrações foram reproduzidas na laje inferior . São 161 penetrações para barras de controle e 8 cavidades para bomba de circulação principal. (Fig. 4.3).

e) Armaduras de Reforço:

No modelo, bem como no protótipo, há reforços nas regiões especiais que consistem de malhas com fios de pequenos diâmetros (3 a 5 mm).

Nas superfícies internas e externas há também rede de fios eletricamente soldados para melhor distribuição das fissuras nas condições limites. (Fig. 4.4).

As características mecânicas dessas armaduras , podem ser vistas na Fig. 4.5.

f) Concreto:

A composição do concreto do modelo é apresentada na Fig. 4.6. A dimensão máxima do agregado é de 6mm. O teste foi realizado 90 dias após a concretagem , apresentando os seguintes resultados:

- Resistência à compressão (Corpo de prova: 16x16x16cm : $R_{cc} = 570 \text{ kg/cm}^2$.)
- Resistência à tração (Corpo de prova cilíndrico : diâmetro = 10 , altura = 20 cm, $R_{ct} = 40,5 \text{ kg/cm}^2$)

- Módulo de Young : $E_c = 370.000$ a 350.000 kg/cm^2

- Coeficiente de Poisson = 0,18

A concretagem do modelo foi executada numa só etapa.

g) Instrumentação:

As instrumentações para medidas estão esquematizadas na seguinte Tabela:

TIPO DE MEDIDA	INSTRUMENTO	QUANT.
- Deslocamento das paredes	Transdutores de deslocamento	
Cilíndricas e das lajes	Tipo Hottinger - W1 e W5 TK	88
- Deformações medidas nas superfícies externas	Strain-Gauges Sokki Kenkyujo	116
- Tração nos cabos de protensão	Load Cells Tipo ISMES	47
- Distribuição de temperatura no concreto	Termopares do tipo Termoelétrica	28
- Pressão interna no modelo	Hottinger P3M 100	
	P3M 200	3
	P3M 500	

Tais instrumentações foram dispostas conforme mostram as Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

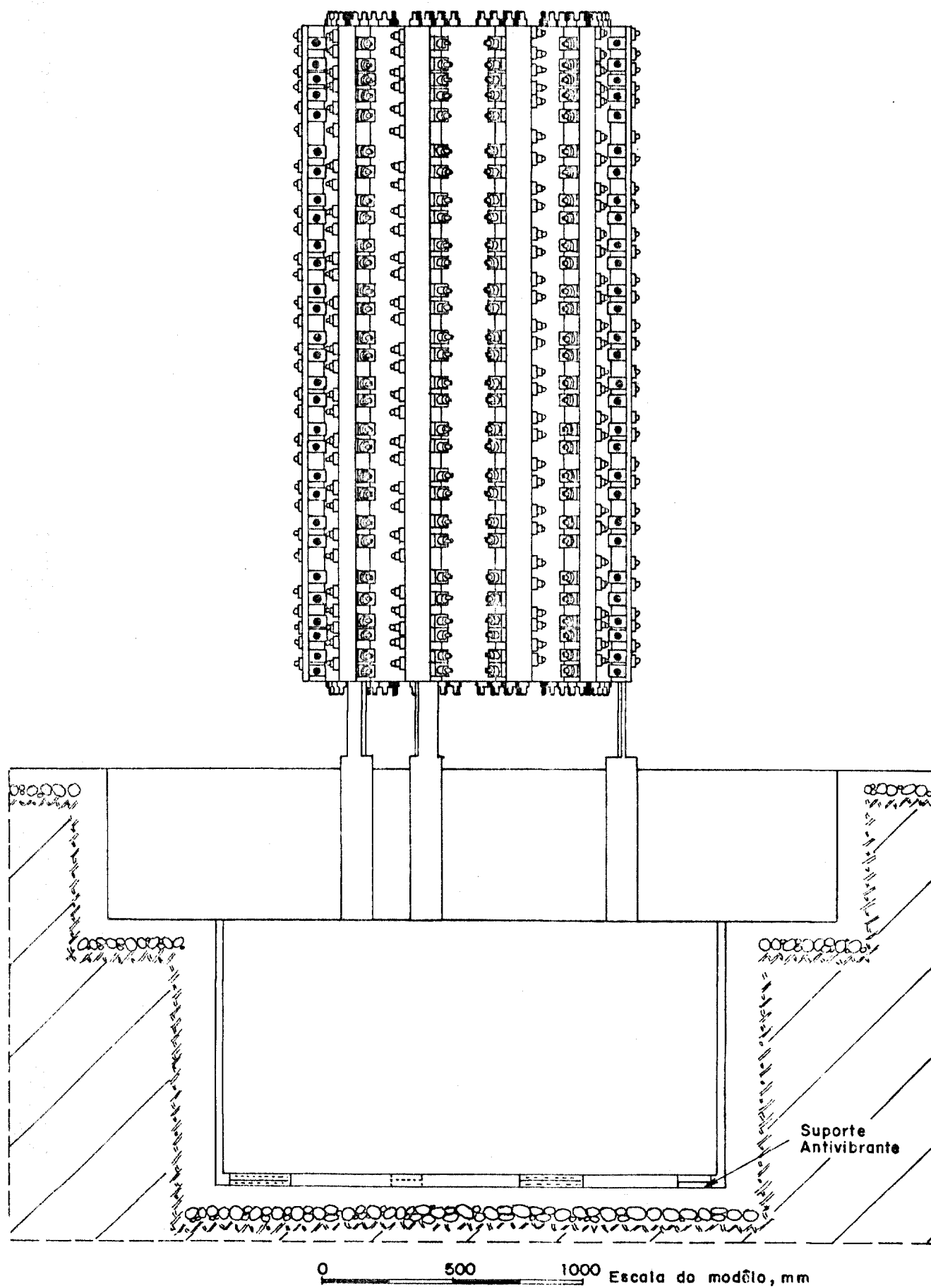
DISPOSIÇÃO DO MODELO DURANTE A PROVA

FIG. 4.1 - Disposição do Modelo durante a Prova

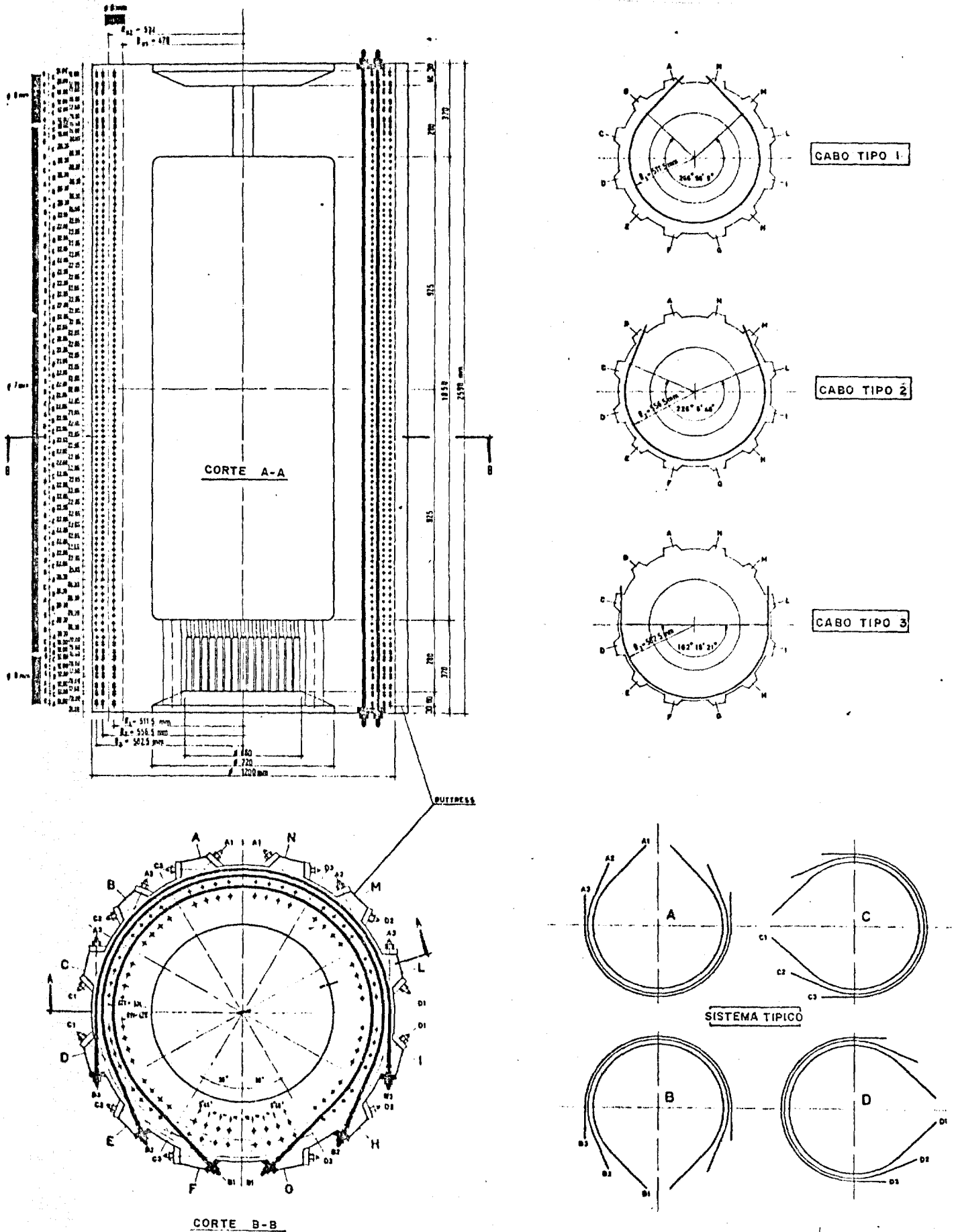
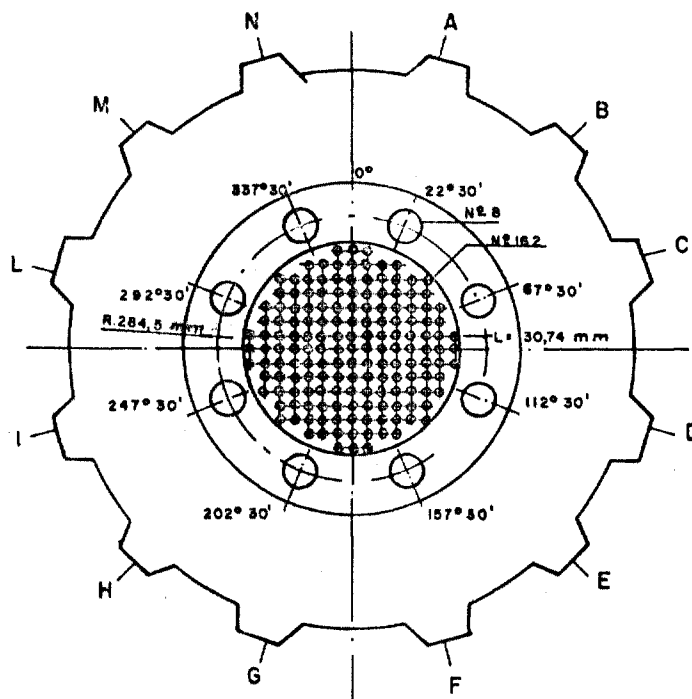
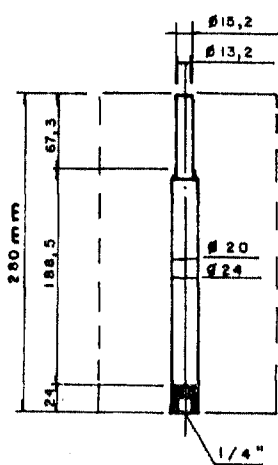


FIG. 4.2 - Sistema de Protensão Circunferencial

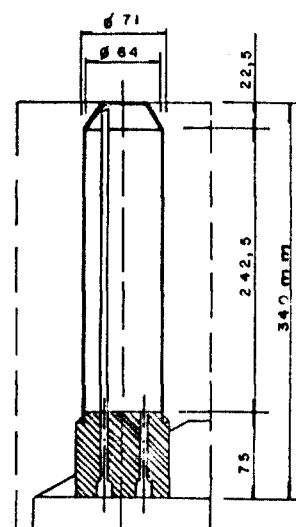
DETALHES DAS PENETRAÇÕES DO MODELO



LAJE INFERIOR



PENETRAÇÕES DAS BARRAS DE CONTROLE



BOMBA DE CIRCULAÇÃO PRINCIPAL

FIG. 4.3- Detalhes das Penetrações do Modelo

ARMADURA DE REFORÇO

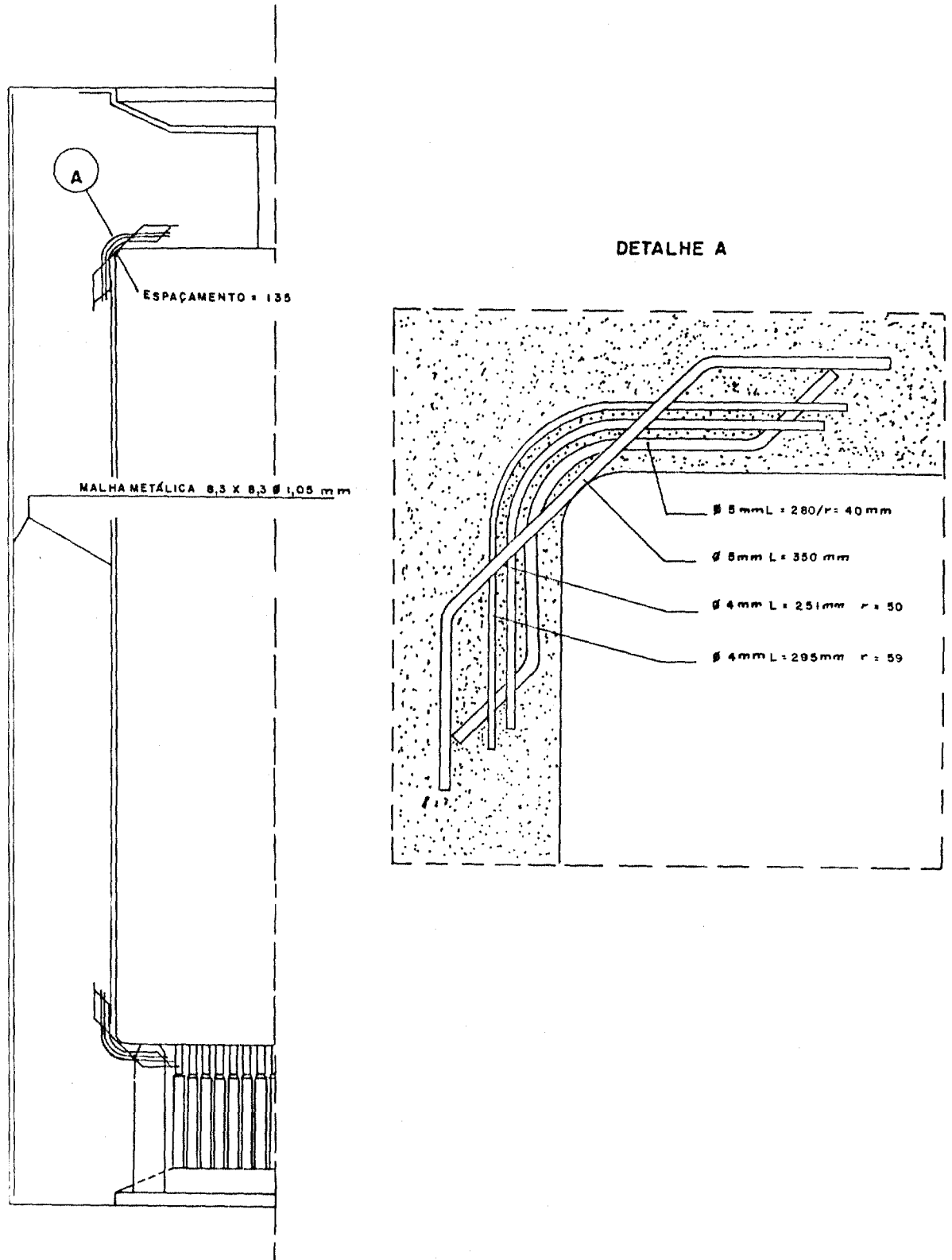
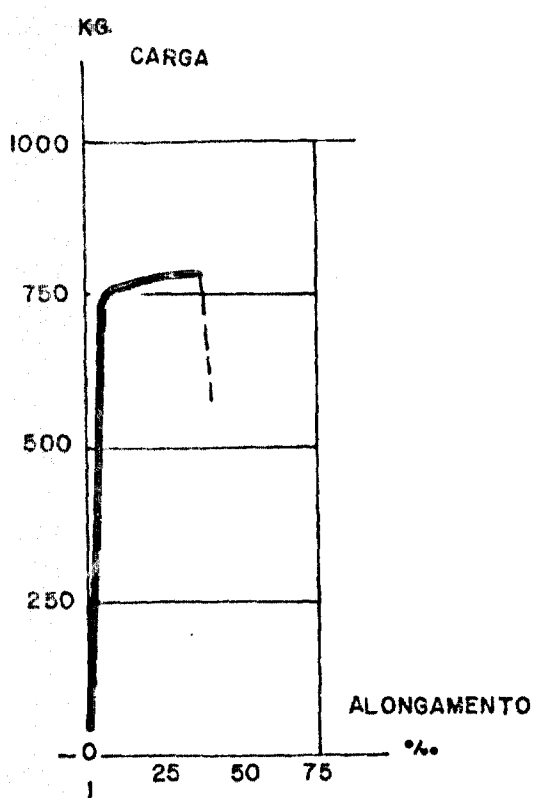


FIG. 4.4 - Detalhes das Armaduras de Reforço

ARMADURA DE REFORÇO

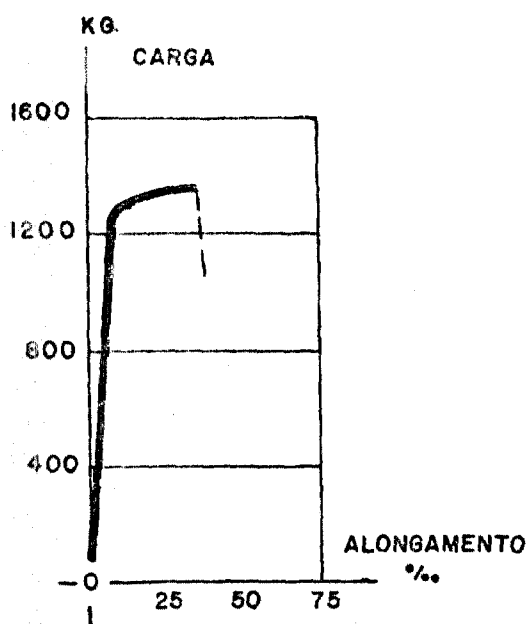


$$\varnothing = 4,05 \text{ mm}$$

$$\Omega = 12,88 \text{ mm}^2$$

$$\nabla_{0,2\%} = 58,6 \text{ KG/mm}^2$$

$$\nabla_R = 64,4 \text{ KG/mm}^2$$



$$\varnothing = 5,00 \text{ mm}$$

$$\Omega = 19,63 \text{ mm}^2$$

$$\nabla_{0,2\%} = 62,1 \text{ KG/mm}^2$$

$$\nabla_R = 67,5 \text{ KG/mm}^2$$

MALHA METÁLICA

ESPAÇAMENTO 8,3 x 8,3 $\varnothing = 1,05 \text{ mm}$

$$\Omega = 0,86 \text{ mm}^2$$

$$\nabla_{0,2\%} = 25,5 \text{ KG/mm}^2$$

$$\nabla_R = 35,0 \text{ KG/mm}^2$$

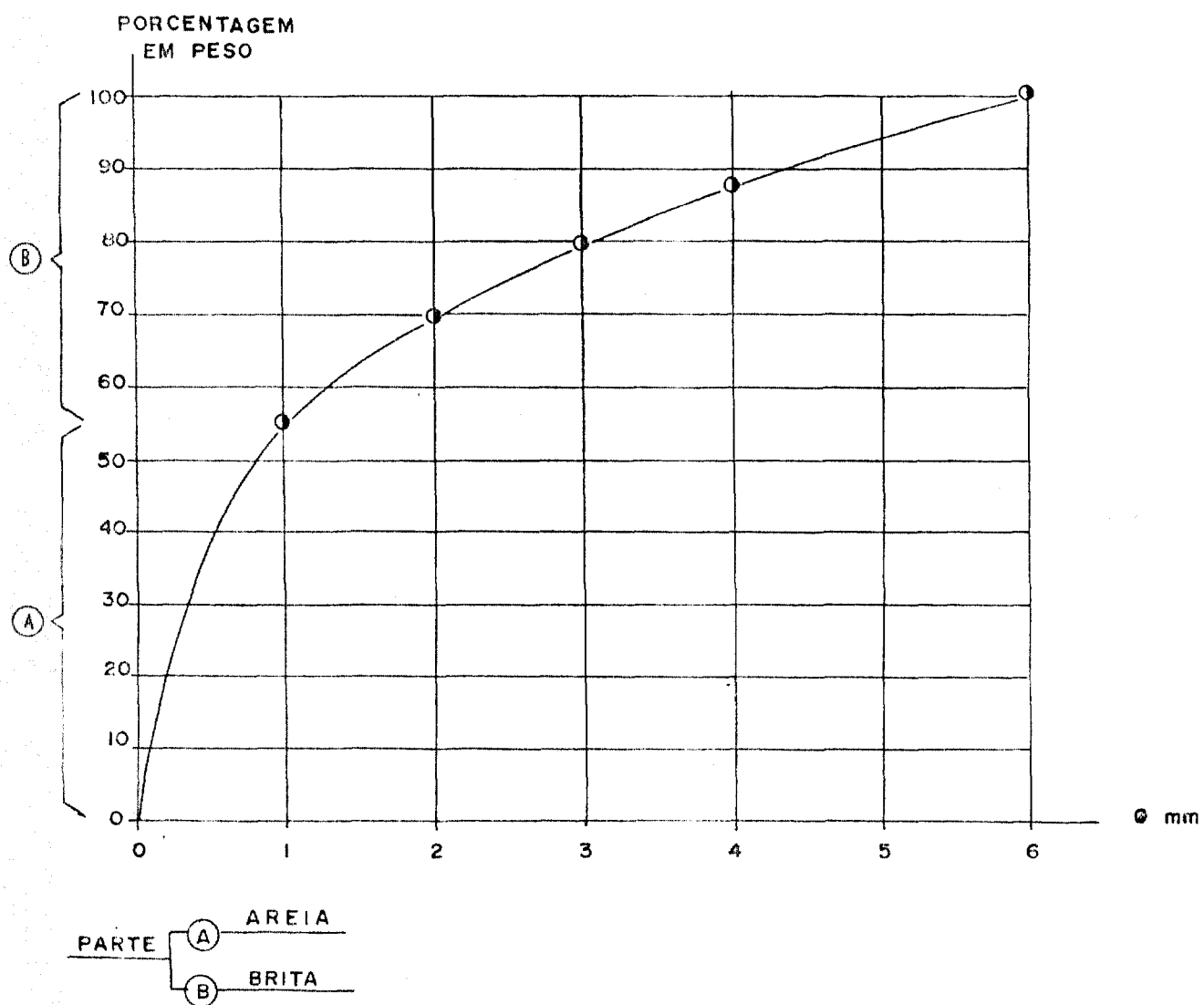
$$\varnothing = 3,00 \text{ mm}$$

$$\Omega = 7,06 \text{ mm}^2$$

$$\nabla_{0,2\%} = 59,7 \text{ KG/mm}^2$$

$$\nabla_R = 65,8 \text{ KG/mm}^2$$

FIG.4.5- Características Físicas da Armadura de Reforço



CIMENTO TIPO 425

FATOR AGUA / CIMENTO = 0,46

ADITIVO PLASTIFICANTE CHEBAU VERFLUSSIGER
 2,5 % em peso de cimento

FIGURA 4.6 - Curva Granulométrica do Concreto

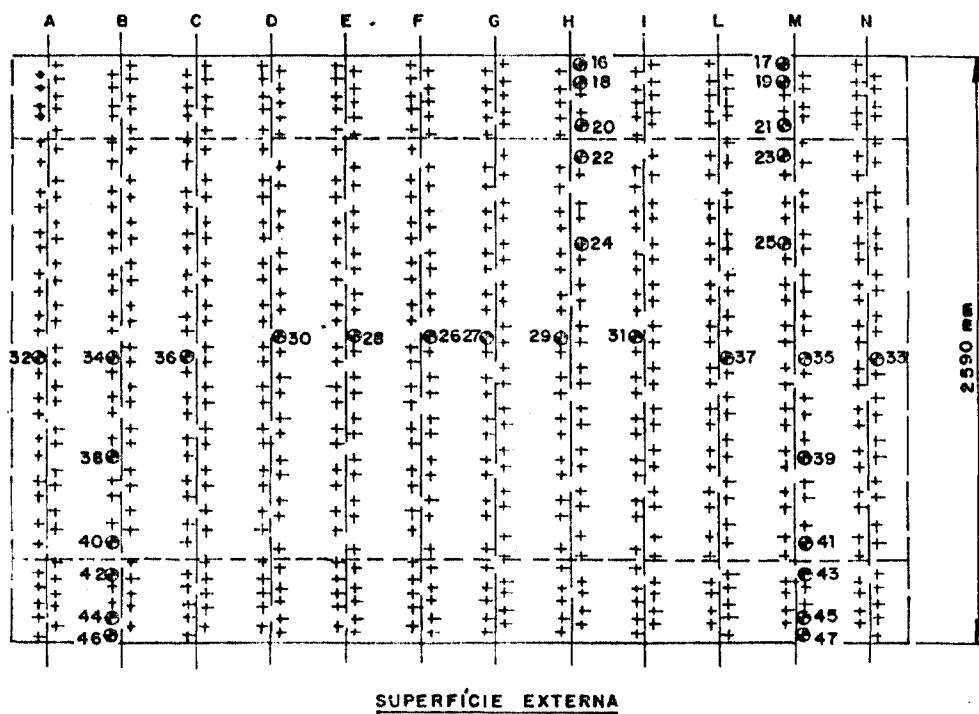
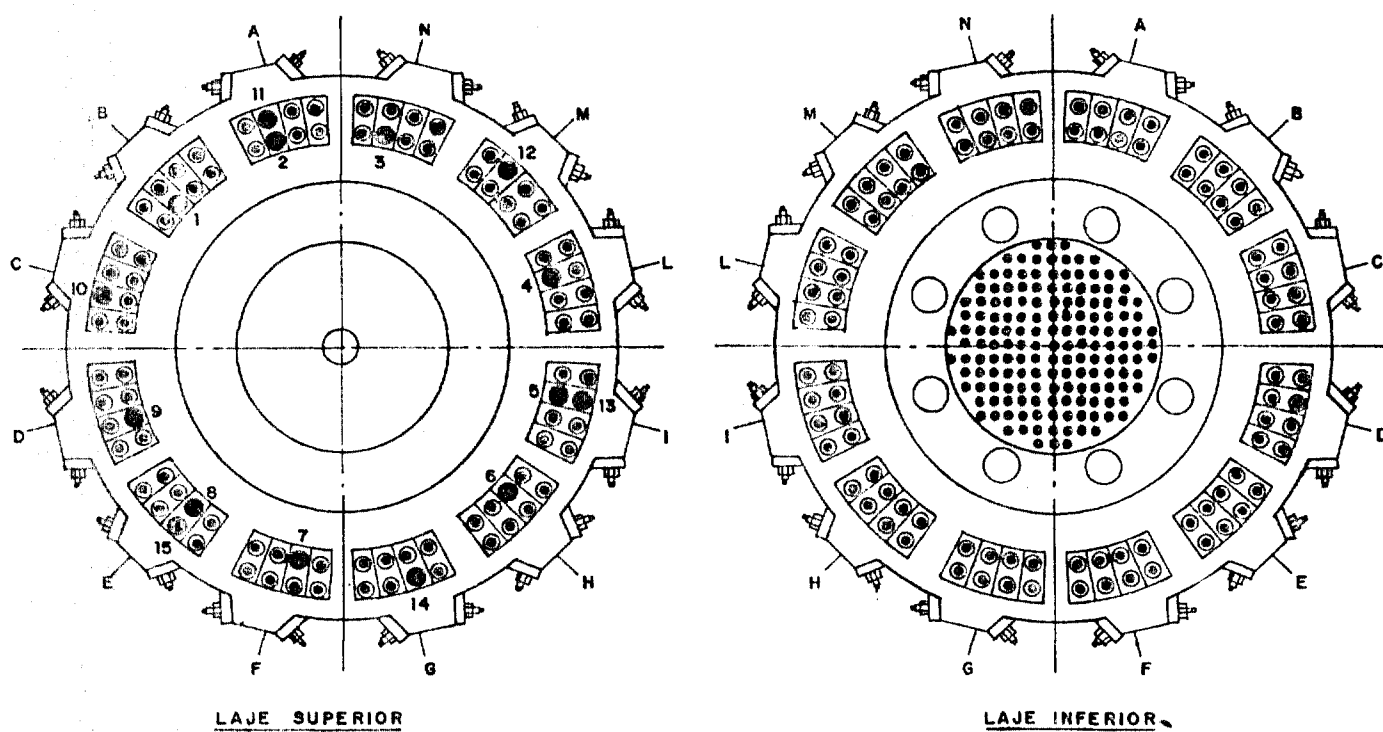


FIG.4.7 - Disposição das Células de Carga (Load Cells)

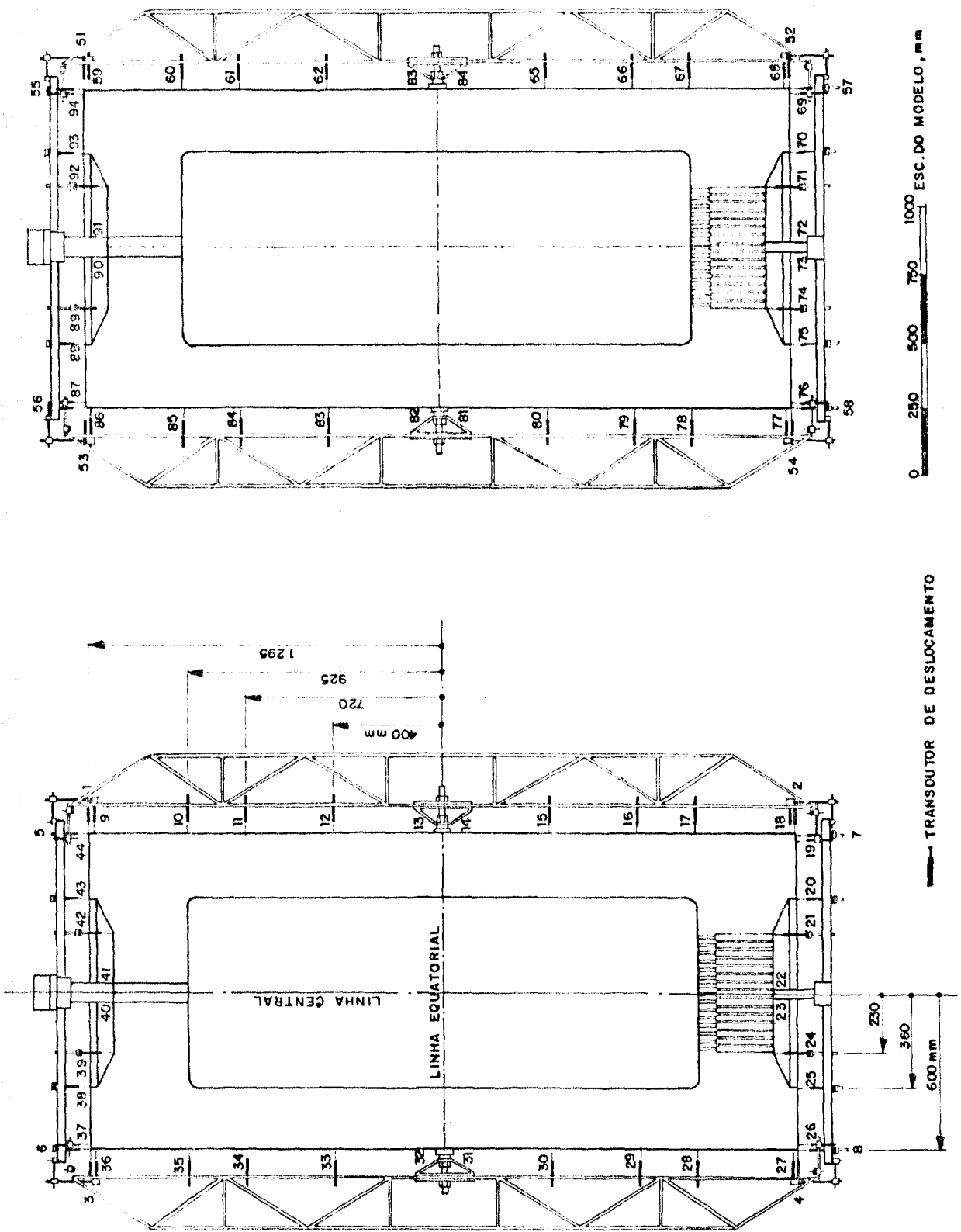


FIG.4.8 - Disposição dos Transdutores de Deslocamento

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

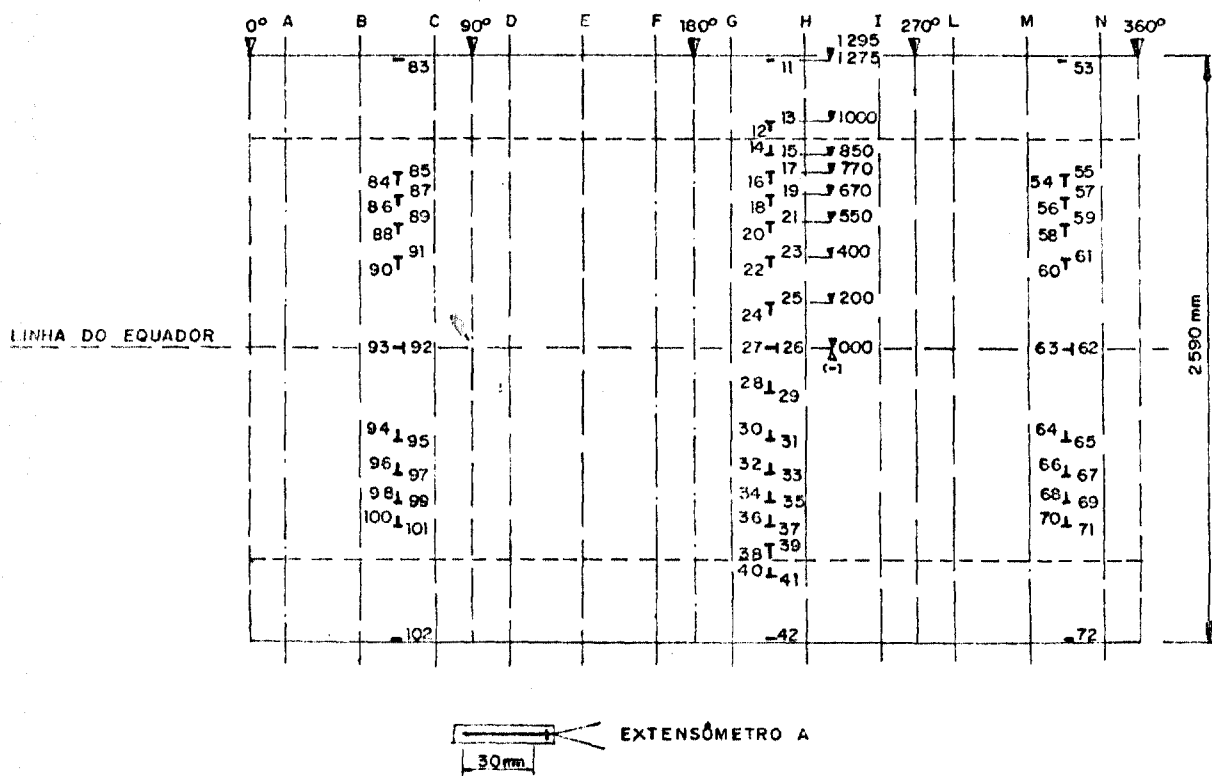
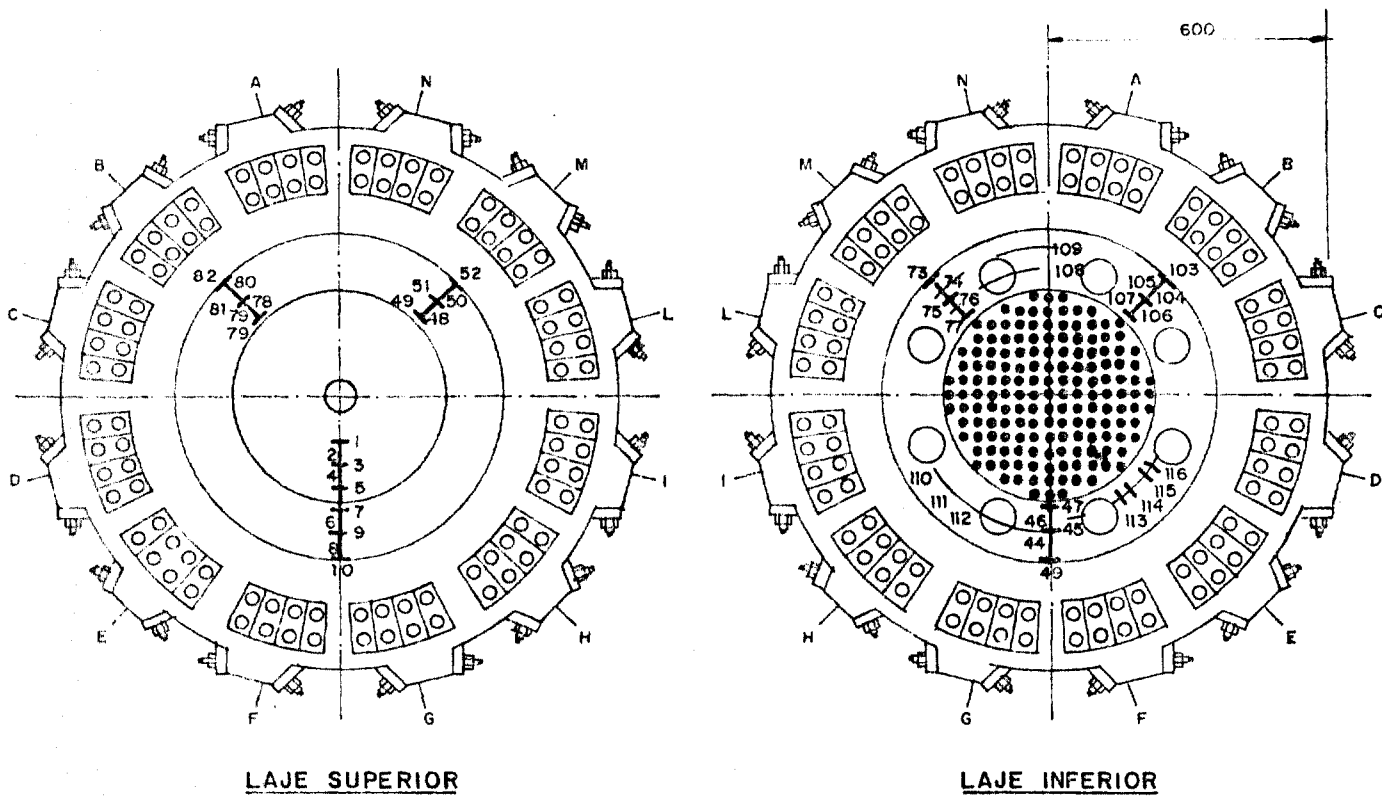


FIG.4.9- Disposição dos Extensômetros a Resistência Elétrica (Strain Gages)

4.2- Modelos Reduzidos do IPEN

4.2.1- Introdução

Os programas do IPEN que se iniciou há cerca de seis anos, tiveram como objetivo principal desenvolver e projetar VPCP para reatores do tipo GCFR de 300 MWe, em colaboração com a General Atomic dos Estados Unidos.

O projeto dos reatores GCFR tem como base a tecnologia em desenvolvimento dos reatores LMFBR, de máxima utilização do combustível, e a tecnologia desenvolvida para componentes dos reatores HTGR. Na Figura 4.10, onde é mostrado um corte vertical do GCFR, podemos observar que os principais componentes do sistema de geração do vapor desse tipo de reator de potência, estão contidos num vaso de pressão de concreto protendido multicavidade, cuja configuração é similar ao do projeto dos HTGRs desenvolvidos pela General Atomic e das gerações atuais dos reatores britânicos refrigerados por gás.

Uma característica particular dos reatores GCFR é a alta pressão do gás refrigerante no circuito primário. Com isso obtém-se uma alta eficiência térmica do sistema. Como consequência, um reator GCFR tem uma pressão do gás refrigerante de aproximadamente 80% mais alta do que os reatores HTGRs: 90 bar (1305 psia) e 48 bar (700 psia), respectivamente.

Devido a alta densidade de potência e dimensão menor do reator, a cavidade do reator para os GCFRs é relativamente menor do que para HTGR de mesma potência.

As principais características do sistema estão esquematizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Características de Projeto do GCFR de 300 MWe

Potência.....	300 MWe.
Condições do Vapor.....	495°C/80 atm.
Rendimento.....	36 %
Refrigerante.....	Hélio
Pressão do refrigerante.....	85 atm.
Temperatura do refrigerante	
Entrada do caroço.....	323°C
Saída do caroço.....	550°C
Número de circuitos principais.....	3
Número de circuitos auxiliares.....	3
Combustível.....	UO ₂ -PuO ₂
Diâmetro da barra de combustível.....	7,2 mm
Espessura do encamisamento.....	0,48 mm
Temperatura na superfície do encamisamento.....	690°C
Altura do caroço.....	100 cm
Diâmetro do caroço.....	200 cm
Taxa média de fusão.....	0,6 MWt/kg
Taxa de conversão.....	1,4
Frequência de Recarregamento.....	1/3 do caroço/ano.

4.2.2- VPCP Multicavidade para GCFR

O VPCP para reatores GCFR é cilíndrico, com 25,6 m (84 ft) de diâmetro e 24,5 m (80,5 ft) de altura. O vaso é protendido por cabos circunferenciais e verticais, conforme é mostrado nas Figuras 4.11 e 4.12. Dentro do vaso há cavidades interconectadas revestidas de membrana de aço.

O refrigerante do circuito primário é o gás de hélio, movido por um circulador-turbina em atmosfera de hélio em 90 bar (1305 psia). O fluxo dentro do circuito é indicado na Figura 4.10.

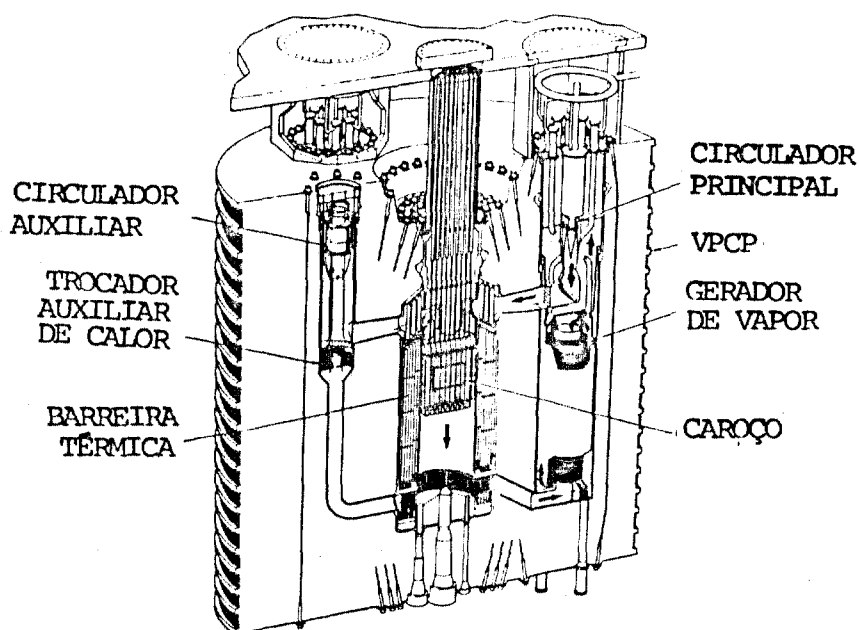


FIGURA 4.10 - Corte Vertical do Reator GCFR

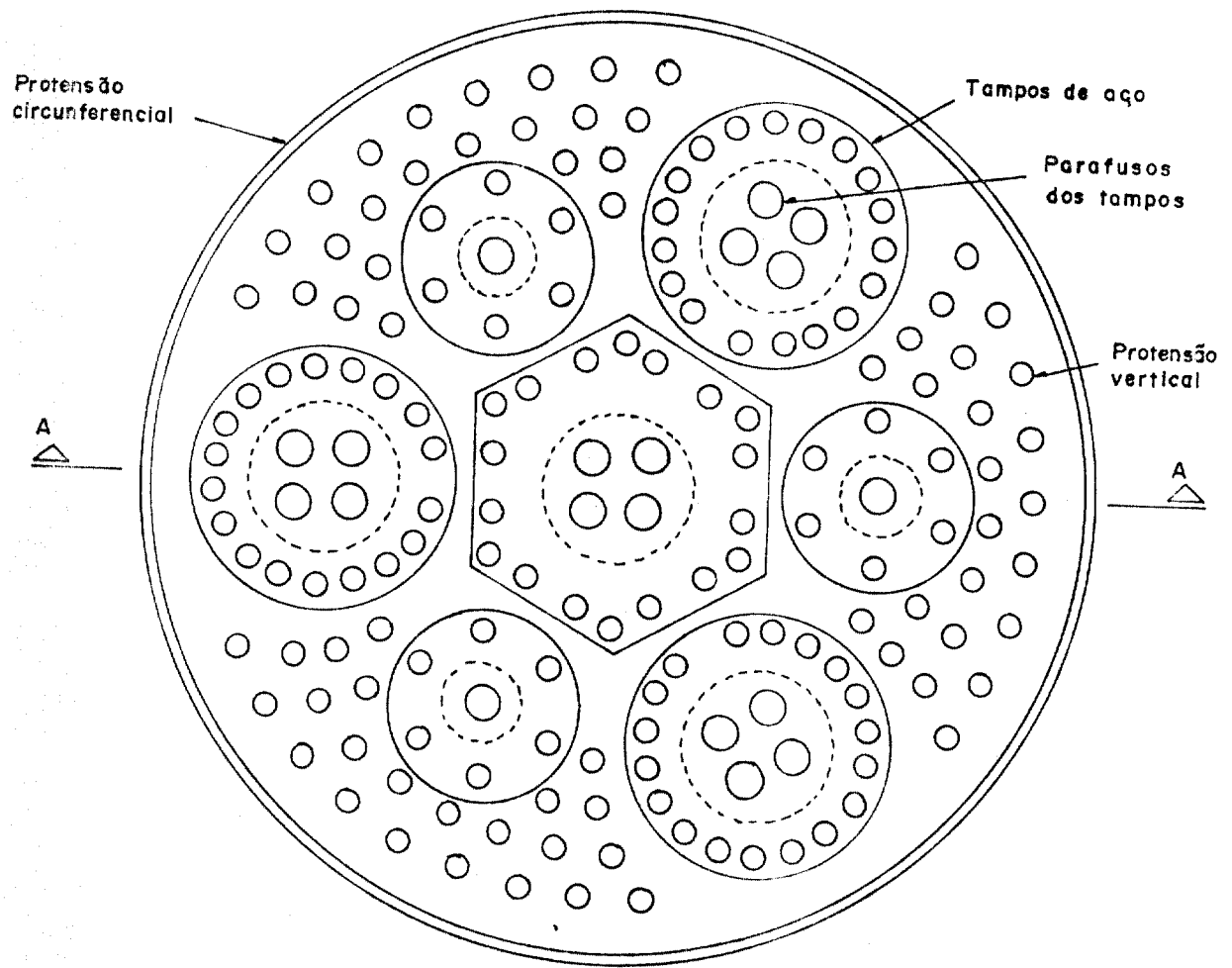


FIG. 4.11 - Vista Superior do Vaso Multicavidade em Escala 1/20.

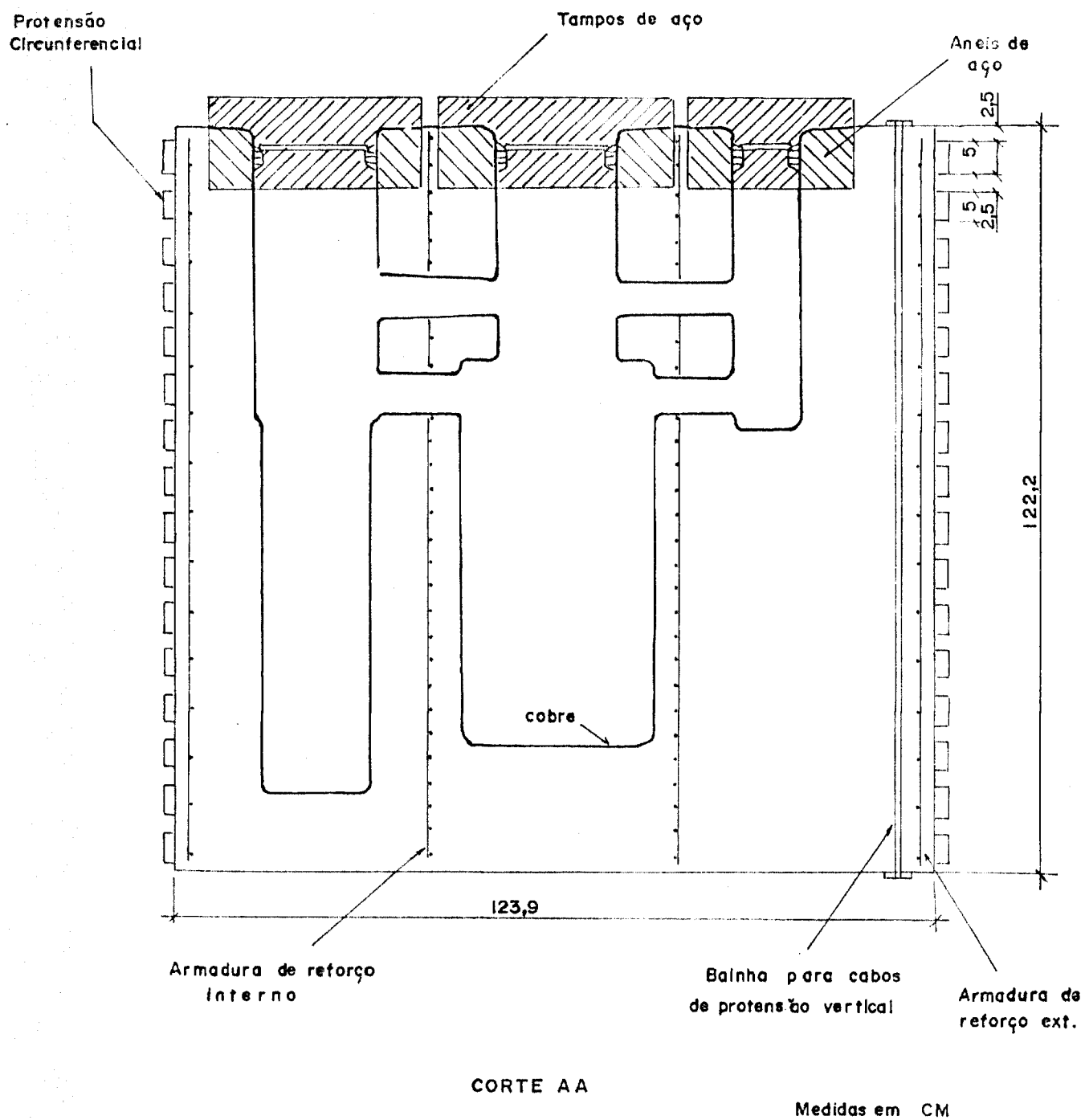


FIG. 4.12 - Corte AA do Vaso Multicavidade em Escala 1/20

O suporte e o controle do caroço do reator estão situados na parte superior do caroço e o carregamento é feito pela parte inferior, através das penetrações existentes no vaso.

O vaso deve apresentar uma capacidade estrutural para resistir a ações de correntes de uma sobrepressão de pelo menos até duas vezes a pressão máxima na cavidade do reator (204 bar) sem colapso estrutural.

Para verificação dos métodos analíticos usados na determinação da capacidade limite de sobrepressão do vaso, foi decidido, no IPEN, a construção do modelo em escla 1/20 do vaso real, com as dimensões indicadas nas Figuras 4.11 e 4.12.

4.2.3- Modelos Monocavidades do IPEN

A primeira etapa estabelecida no IPEN, dentro do programa de testes dos vasos de pressão de concreto protendido para GCFR foi o projeto e construção dos modelos simplificados do vaso multicavidade referido no ítem anterior. Esses vasos foram construídos com o objetivo de testá-los para cada um dos casos de carregamento especificados no Código da ASME.

As dimensões foram definidas com a intenção de correlacioná-las com a do vaso multicavidade, de modo a atender as seguintes condições:

- Manutenção do modelo de uma cavidade com dimensão externa igual a do modelo de multicavidade.
- Dimensões, de modo que a relação entre o volume da cavidade e o volume total seja igual à relação análoga existente no modelo de multicavidades.

No projeto foram reproduzidos valores aproximados de protensão e de espessura do modelo, e foram calculadas as tensões existentes no modelo pelo programa PV2-A. A resistência do concreto à compressão adotado no projeto foi de 455 kg/cm^2 .

As tensões calculadas foram então comparadas com as tensões permitidas no Código ASME. Nas secções onde as tensões calculadas eram grande demais, a resistência do modelo teve de ser aumentada, e nas secções onde as tensões eram muito pequenas a resistência pôde ser diminuída, juntamente com a variação dos carregamentos de protensão.

Dessa maneira, foram feitos quatro projetos-tentativa do modelo, até definir-se um projeto satisfatório, que cumprisse com um mínimo custo as exigências do Código ASME. As dimensões do modelo no projeto final estão na Figura 4.13, a qual representa um corte axial do vaso.

Foram construídos três modelos; o primeiro, com a finalidade de testar a instrumentação utilizada nas medidas experimentais, foi pressurizado internamente por um sistema hidráulico até o colapso estrutural, sem aplicação das forças de protensão. A pressão interna máxima atingida foi de 60 kg/cm^2 , e este valor foi previsto no cálculo. Os dois últimos modelos, com as mesmas características físicas tiveram aplicados todos os carregamentos de protensão. Estes vasos foram pressurizados até a capacidade de limite de pressurização do modelo ($170,0 \text{ kg/cm}^2$), não atingindo, portanto, a pressão de ruína estrutural, por problemas de vazamento ocorrido nas membranas internas. O programa de testes ainda está sendo levado a efeito.

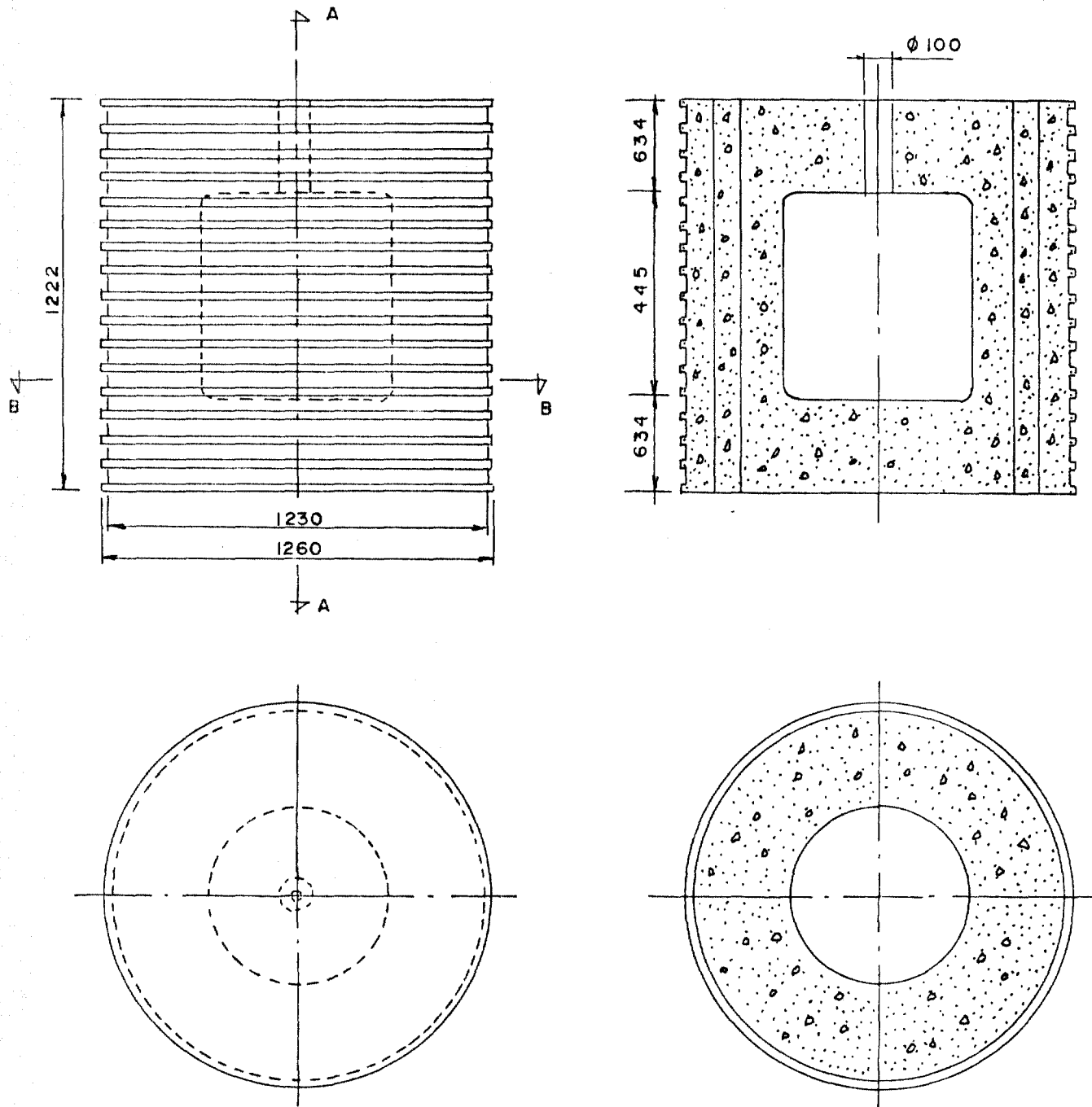


FIGURA 4.13 - Dimensões em milímetro, do Vaso monocavidade do IPEN

5. MÉTODOS DE CÁLCULO

Neste capítulo descrevemos as formulações matemáticas dos dois principais métodos empregados no cálculo do VPCP, dando ênfase ao caso de estruturas axissimétricas .

O primeiro é o método da relaxação dinâmica e o segundo, o dos elementos finitos.

5.1- Método da Relaxação Dinâmica

5.1.1- Introdução

Os vasos de pressão para reatores em concreto protendido variam consideravelmente em forma, tanto internamente quanto externamente, porém têm sempre em comum a exigência de que as espessuras das paredes sejam uma fração apreciável das dimensões internas do vaso. Para conseguir uma precisão aceitável nos cálculos das tensões e deformações devido a protensão, pressão do gás, e gradientes de temperaturas, é necessário considerar o vaso como meio elástico contínuo sujeito às condições de contorno resultantes das restrições naturais da estrutura e das forças de massa resultantes das várias formas de carregamento. Em geral a forma não analítica dos contornos e das condições impedem o uso da análise estrutural tradicional como base para os cálculos.

Alguns anos atrás, as aproximações para as tensões eram obtidas usando-se a teoria das cascas finas, porém, em anos recentes, o uso de computadores para resolver equações de diferenças parciais de meios elásticos tem resultado no desenvolvimento de vários métodos de cálculo para estruturas de paredes espessas tais como barragens de concreto em vasos de pressão.

O método da relaxação dinâmica /52,53/ originou-se inicialmente no escritório de cálculo de A.S. Day e mais tarde na Taylor Woodrow Construction Ltd., na Inglaterra.

Historicamente, surgiu como desenvolvimento do novo método para resolver problemas elásticos por analogia com problemas de marés no estuário de Tamisa e do Mar do Norte, onde os cálculos foram feitos de 1.958 à 1.960 . No problema da determinação dos efeitos das marés em estuários, soluções analíticas são impossíveis devido a forma heterogênea do estuário e os termos não lineares nas equações hidráulicas, embora sejam possíveis o uso dos métodos gráficos.

A necessidade de uma solução numérica de meios elásticos contínuos de vaso de pressão em concreto para reatores nucleares surgiu em 1.961, para o projeto das primeiras centrais nucleares britânicas.

5.1.2- Fundamentos da Relaxação Dinâmica

O principal problema envolvido na aplicação da relaxação dinâmica no cálculo do vaso de pressão é a seleção da malha que melhor se adapte à geometria e às condições de contorno.

O formato mais comum existente nos projetos atuais é o cilíndrico e a distribuição das forças de protensão e das pressões internas, axialmente simétrica . Conseqüentemente, a escolha da malha é baseada nas coordenadas cilíndricas ou esféricas que simplificam muito as condições de contorno.

As formulações matemáticas se baseiam nas seguintes equações da teoria da elasticidade, colocadas em termos de coordenadas cilíndricas (notação de Timoshenko):

a) Três equações de equilíbrio:

Direção radial:

$$\frac{\partial \tau_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad 5.1$$

Direção axial:

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0$$

Direção tangencial:

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} = 0$$

b) Seis equações da Lei de Hooke:

$$\sigma_r = \lambda \cdot e + 2 \cdot G \cdot e_r$$

$$\sigma_\theta = \lambda \cdot e + 2 \cdot G \cdot e_\theta \quad 5.2$$

$$\sigma_z = \lambda \cdot e + 2 \cdot G \cdot e_z$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\gamma_{r\theta}}{G}$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{\gamma_{z\theta}}{G} \quad 5.3$$

$$\tau_{rz} = \frac{\gamma_{rz}}{G}$$

Sendo:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{constante de Lamé}) \quad 5.4$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{módulo de rigidez}) \quad 5.5$$

$$e = e_x + e_y + e_z \quad 5.6$$

c) Seis equações de compatibilidade de deformações - deslocamentos:

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\ \epsilon_\theta &= \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \theta} \end{aligned} \quad 5.7$$

$$\begin{aligned} \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \end{aligned} \quad 5.8$$

$$\gamma_{z\theta} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{r \partial \theta}$$

O caso da simetria axial implica na deformação simétrica em relação ao eixo z e, portanto, os componentes da tensão independentes do ângulo θ , anulando-se assim todas as derivadas em relação a esta variável. Igualmente os componentes da tensão tangencial $\tau_{r\theta}$ e $\tau_{\theta z}$ se anulam, restando apenas tensão de cisalhamento no plano que corta o eixo.

Por meio de transformações algébricas, o sistema inicial de quinze equações a quinze incógnitas são transformadas em um sistema de seis equações com seis incógnitas:

$$\sigma_r = (\lambda + 2G) \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \cdot \frac{u}{r} + \lambda \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad 5.9$$

$$\sigma_\theta = \lambda \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2G) \cdot \frac{u}{r} + \lambda \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad 5.10$$

$$\sigma_z = \lambda \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \cdot \frac{u}{r} + (\lambda + 2G) \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad 5.11$$

$$\tau_{rz} = G \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad 5.12$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad 5.13$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad 5.14$$

No caso do equilíbrio dinâmico as equações correspondentes a (5.13) e (5.14) são:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \cdot a_r \quad 5.15$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \rho \cdot a_z \quad 5.16$$

Onde:

ρ = densidade do material

α_r, α_z = acelerações nas direções r e z , respectivamente.

O método da relaxação dinâmica considera a estrutura em estado de amortecimento viscoso.

Neste caso:

$$\begin{aligned}\alpha_r &= \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + K \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \\ \alpha_z &= \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + K \cdot \frac{\partial w}{\partial t}\end{aligned}\tag{5.17}$$

Onde: K = Coeficiente de amortecimento viscoso.

Derivando as equações (5.9) a (5.16) em relação ao tempo e adicionando os termos da inércia e amortecimento, obtêm-se:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} &= (\lambda + 2G) \cdot \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} + \lambda \cdot \frac{\dot{u}}{r} + \lambda \cdot \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial t} &= \lambda \cdot \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} + (\lambda + 2G) \frac{\dot{u}}{r} + \lambda \cdot \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} &= \lambda \cdot \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} + \lambda \cdot \frac{\dot{u}}{r} + (\lambda + 2G) \frac{\partial \dot{w}}{\partial z}\end{aligned}\tag{5.18}$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial t} = G \left(\frac{\partial \dot{w}}{\partial r} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} + \frac{K}{\Delta t} \dot{u} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \right)$$

$$\frac{\partial \dot{w}}{\partial t} + \frac{K}{\Delta t} \dot{w} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} - \frac{\tau_{rz}}{r} \right)$$

O método da relaxação dinâmica utiliza-se desse sistema de equações diferenciais e resolve-o por meio de diferenças finitas.

Utilizando o incremento de tempo (Δt) como passo entre duas iterações e escolhendo parâmetros que garantam uma boa convergência, a estabilidade da solução pode atingir um estado tal que as velocidades calculadas sejam muito pequenas (estado residual de velocidades).

Nesse estado, costuma-se admitir que o campo de tensões que age na estrutura é coincidente com aquele proveniente da solução elástica com a estrutura em equilíbrio.

No IEN foram desenvolvidos quatro programas de computação baseados no método da relaxação dinâmica, programas esses escritos pelo Prof. I. Davidson. São eles : PV1 para análise plana; PV2A para análise axissimétricas; PV3 para análise tridimensionais, e QV2 para carregamento dinâmico das estruturas.

5.2 - Método dos Elementos Finitos

5.2.1- Introdução

O método dos elementos finitos é uma extensão, para es -

truturas bi e tridimensionais, da técnica de análise das estruturas reticuladas, tais como placas e cascas.

A utilização do método iniciou-se na indústria aeronáutica, onde havia uma necessidade urgente de análise acurada das complexas estruturas das aeronaves. Com a evolução dos computadores, a partir da década de 1950, houve um rápido desenvolvimento dos métodos matriciais de análise estrutural.

A idealização dos meios elásticos através de elementos unidimensionais foi realizada por Hrennikoff /33/ em 1.941, e McHenry /40/ , em 1.943, para problemas de elasticidade plana, usando analogia das malhas. Newmark usou o sistema de grelhas para cascas.

A contribuição do Argyris /57/ na formulação dos métodos matriciais para análise estrutural foi decisiva para o desenvolvimento do método dos elementos finitos por Clough / 66 / e seus co-autores.

Atualmente, o método dos elementos finitos está bastante difundido no Brasil e não nos preocuparemos de apresentar a sua formulação geral, o que pode ser encontrado em diversas referências /42,55,57,67,70/. Apresentaremos apenas a formulação para o caso de geometrias axissimétricas, cuja aplicação foi objeto deste trabalho.

5.2.2- Análise Axissimétrica pelo Método dos Elementos Finitos

O problema da análise de tensões em corpos sólidos de revolução, axissimétricos e sob carregamento também axissimétrico, reduz-se a um problema bidimensional como extensão dos problemas de tensão plana e deformação plana. Por simetria, as duas componentes de deslocamento em qualquer secção plana do corpo ,

que passe pelo seu eixo de simetria, definem completamente o estado de deformação e, conseqüentemente, o estado de tensão. Um exemplo de secção transversal é mostrada na Figura 5.1. Sendo r e z as coordenadas radial e axial, respectivamente, de um ponto, sendo u e v os correspondentes deslocamentos, observa-se que as mesmas funções de deslocamentos usadas para os problemas de tensão plana e deformação plana podem ser empregadas para o elemento de secção triangular mostrado na Figura 5.1.

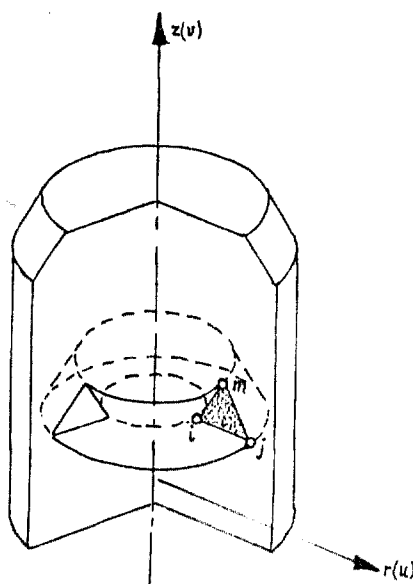


Figura 5.1 - Elemento de um Sólido Axissimétrico

Em adição às deformações e tensões axiais e radiais, correspondentes às deformações e tensões que ocorrem em problemas de tensão plana e deformação plana, deve-se levar em conta que num corpo axissimétrico um deslocamento radial provoca uma deformação na direção circunferencial ou tangencial. Associada a esta componente tangencial de deformação ocorre uma componente tangencial de tensão. Evidentemente, é nulo o deslocamento tangencial, em virtude da simetria.

O volume de material associado a um triângulo é agora de um corpo de revolução e, conseqüentemente, todas as integrais devem ser feitas em relação a ele.

Embora o desenvolvimento do método seja feito para um elemento de secção triangular, os seus princípios são gerais e aplicáveis a outra forma qualquer de secção.

5.2.3- Função Deslocamento

Para o elemento de secção triangular com nós i, j, m , o deslocamento nodal pode ser assim definido

$$\left\{ \delta_i \right\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad 5.19$$

e os deslocamentos nodais do elemento pelo vetor

$$\left\{ \delta \right\}^e = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \end{Bmatrix} \quad 5.20$$

Utilizando um sistema de coordenadas cilíndricas e representando os deslocamentos por dois polinômios lineares, podemos escrever:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z \quad 5.21$$

$$v = \alpha_4 + \alpha_5 r + \alpha_6 z \quad 5.22$$

As seis constantes α podem ser expressas em termos dos deslocamentos nodais. Entrando com as coordenadas dos nós na expressão (5.21) obtemos:

$$u_i = \alpha_1 + \alpha_2 r_i + \alpha_3 z_i$$

$$u_j = \alpha_1 + \alpha_2 r_j + \alpha_3 z_j$$

5.23

$$u_m = \alpha_1 + \alpha_2 r_m + \alpha_3 z_m$$

Resolvendo para α_1, α_2 e α_3 , podemos escrever, sob forma matricial:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_m & z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix}$$

A inversa da matriz $[A]$ pode ser obtida através da expressão:

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\det[A]} \cdot \text{adj}[A]$$

A matriz adjunta de $[A]$ é a transposta da matriz dos cofatores e o determinante é:

$$\det[A] = \det \begin{bmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_m & z_m \end{bmatrix} = 2\Delta = 2 \times \text{área do triângulo } ijm$$

A inversa é então:

$$[A]^{-1} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} (r_j \cdot z_m - z_j \cdot r_m) & (r_m \cdot z_i - z_m \cdot r_i) & (r_i \cdot z_j - z_i \cdot r_j) \\ z_j - z_m & z_m - z_i & z_i - z_j \\ r_m - r_j & r_i - r_m & r_j - r_i \end{bmatrix} \quad 5.24$$

e os coeficientes α são:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} a_i & a_j & a_m \\ b_i & b_j & b_m \\ c_i & c_j & c_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_m \end{bmatrix} \quad 5.25$$

Substituindo os coeficientes (α) na expressão (5.21) obtemos:

$$u(r, z) = \frac{1}{2\Delta} \left\{ (a_i + b_i r + c_i z) u_i + (a_j + b_j r + c_j z) u_j + (a_m + b_m r + c_m z) u_m \right\} \quad 5.26$$

em que

$$\begin{aligned} a_i &= r_j z_m - z_j r_m \\ b_i &= z_j - z_m \\ c_i &= r_m - r_j ; \quad \text{etc.} \end{aligned}$$

Analogamente, o deslocamento v pode ser escrito:

$$v(r, z) = \frac{1}{2\Delta} \left\{ (a_i + b_i r + c_i z) v_i + (a_j + b_j r + c_j z) v_j + (a_m + b_m r + c_m z) v_m \right\} \quad 5.27$$

O campo de deslocamento \hat{e} , assim, dado por:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [N_i, N_j, N_m] \{ \delta \}^e \quad 5.28$$

em que

$$[N_i] = \begin{bmatrix} \psi_i & 0 \\ 0 & \psi_i \end{bmatrix}_i \quad [N_j] = \begin{bmatrix} \psi_j & 0 \\ 0 & \psi_j \end{bmatrix} \quad e \quad [N_m] = \begin{bmatrix} \psi_m & 0 \\ 0 & \psi_m \end{bmatrix} \quad 5.29$$

e

$$\begin{aligned} \psi_i &= (a_i + b_i r + c_i z) / 2\Delta \\ \psi_j &= (a_j + b_j r + c_j z) / 2\Delta \\ \psi_m &= (a_m + b_m r + c_m z) / 2\Delta \end{aligned} \quad 5.30$$

5.2.4- Relações Deformação - Deslocamento

Da teoria da Elasticidade as expressões gerais das relações deformação - deslocamento, em coordenadas cilíndricas são dadas por:

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\ \epsilon_\theta &= \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{r \partial \theta} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial v}{\partial z} \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \\ \gamma_{z\theta} &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{r \partial \theta} \end{aligned} \quad 5.31$$

Em virtude da simetria, temos $w = 0$ e u e v independentes de θ , o que leva a :

$$\gamma_{r\theta} = \gamma_{z\theta} = 0$$

e

$$[\epsilon] = \begin{Bmatrix} \epsilon_{rz} \\ \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix} \quad 5.32$$

Conseqüentemente, os componentes de tensão também são independentes de θ , sendo

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0$$

Usando (5.31) e (5.32) podemos escrever a matriz deformação - deslocamento:

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial \psi_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial \psi_j}{\partial z} & 0 & \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial r} & 0 & \frac{\partial \psi_j}{\partial r} & 0 & \frac{\partial \psi_m}{\partial r} & 0 \\ \frac{1}{r}\psi_i & 0 & \frac{1}{r}\psi_j & 0 & \frac{1}{r}\psi_m & 0 \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial z} & \frac{\partial \psi_i}{\partial r} & \frac{\partial \psi_j}{\partial z} & \frac{\partial \psi_j}{\partial r} & \frac{\partial \psi_m}{\partial z} & \frac{\partial \psi_m}{\partial r} \end{bmatrix} \quad 5.33$$

e, em forma matricial, a relação deformação-deslocamento é dada por:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\}^e = [B_i, B_j, B_m] \{\delta\}^e \quad 5.34$$

com

$$[B_i] = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} 0 & C_i \\ b_i & 0 \\ \frac{a_i}{r} + b_i + C_i \frac{z}{r} & 0 \\ C_i & b_i \end{bmatrix} \text{ etc.} \quad 5.35$$

Podemos observar que a matriz $[B]$ envolve termos em r e z e que a deformação ε_θ não é constante no elemento, sendo constante as demais. A deformação ε_θ só será constante se o deslocamento radial u for proporcional ao raio r .

5.2.5- Deformação Inicial (Térmica)

Para um material isotrópico o vetor de deformação inicial, devido à expansão térmica, toma a forma:

$$[\varepsilon_0] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{r0} \\ \varepsilon_{\theta0} \\ \gamma_{rzo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \theta^e \\ \alpha \theta^e \\ \alpha \theta^e \\ 0 \end{bmatrix} \quad 5.36$$

Sendo θ^e o aumento médio de temperatura em um elemento e α o coeficiente de expansão térmica.

Quanto à anisotropia, só será considerado o caso de peças estruturais com plano de isotropia normal ao eixo de simetria, isto é, peças formadas de material estratificado, uma vez que o caso geral de anisotropia não é compatível com a hipótese de simetria axial.

Considerando-se um coeficiente de expansão térmica α_z , na direção axial, e outro coeficiente α_r , no plano normal ao eixo, o vetor de deformação térmica inicial toma a forma:

$$\{\epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha_z \theta e \\ \alpha_r \theta e \\ \alpha_r \theta e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 5.37$$

5.2.6- Relações Constitutivas

Para material anisotrópico estratificado, como explicado no ítem anterior, vamos considerar os seguintes parâmetros:

E_1, ν_1, G_1 Associados ao comportamento no plano de uma camada

E_2, ν_2, G_2 Associados à direção normal à camada.

As relações constitutivas podem então ser escritas:

$$\epsilon_z = \sigma_z/E_2 - \nu_2 \sigma_r/E_2 - \nu_2 \sigma_\theta/E_2$$

$$\epsilon_r = -\nu_2 \sigma_z/E_2 + \sigma_r/E_1 - \nu_1 \sigma_\theta/E_1$$

$$\epsilon_\theta = -\nu_2 \sigma_z/E_2 + \nu_1 \sigma_r/E_1 + \sigma_\theta/E_1$$

$$\gamma_{zr} = \tau_{zr}/G_2$$

ou, em forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{zr} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_2 & -\nu_2/E_2 & -\nu_2/E_2 & 0 \\ -\nu_2/E_2 & 1/E_1 & -\nu_1/E_1 & 0 \\ -\nu_2/E_2 & -\nu_1/E_1 & 1/E_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix}$$

5.38

A inversa da matriz 4 x 4 do lado direito é a matriz de elasticidade, que nos permite obter as tensões em função das deformações.

$$\text{Fazendo: } E_1/E_2 = n \quad \text{e} \quad G_2/E_2 = m$$

Tem-se :

$$[D] = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2)}$$

$$\begin{bmatrix} 1-\nu_1^2 & n\nu_2(1+\nu_1) & n\nu_2(1+\nu_1) & 0 \\ & n(1-n\nu_2^2) & (\nu_1+n\nu_2^2)n & 0 \\ & & n(1-n\nu_2^2) & 0 \\ \text{simétrica.} & & & m(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2) \end{bmatrix}$$

5.39

Para material isotrópico

$$E_1 = E_2 = E \quad \text{ou} \quad n = 1$$

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu$$

$$G_2/E_2 = G/E = m = \frac{1}{2(1+\nu)}$$

Substituindo na Eq. 5.39 , a matriz de elasticidade passa a ser:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

5.40

5.2.7- Matriz de Rigidez

A expressão da matriz de rigidez do elemento é:

$$[K]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dv \quad 5.41$$

em que

$$dv = 2\pi r dr dz$$

Substituindo:

$$[K]^e = 2\pi \int_V [B]^T [D] [B] r dr dz \quad 5.42$$

Como a matriz B depende das coordenadas r e z há duas maneiras para se fazer a integração da expressão acima:

- a) Efetua-se o produto matricial indicado e faz-se a integração de cada elemento da matriz produto. Esta será a solução exata.
- b) Calcula-se B para as coordenadas do centróide da secção triangular. Obtém-se então uma matriz média \bar{B} que conduz a um valor aproximado da integral. A solução converge para valor exato no limite da subdivisão da malha porque,

$$2\pi \int r dr dz = 2\pi \bar{r} \Delta \quad 5.43$$

ou seja, o volume exato do sólido de revolução é obtido pelo produto da área da secção pelo percurso do centróide em uma revolução completa.

As coordenadas do centróide são

$$\bar{r} = \frac{r_i + r_j + r_m}{3} \quad \bar{z} = \frac{z_i + z_j + z_m}{3}$$

Temos, então, a matriz de rigidez expressa por:

$$[K]^e = 2\pi [\bar{B}]^T [D] [\bar{B}] \bar{r} \Delta \quad 5.44$$

5.2.8- Obtenção da Matriz de Rigidez por Integração Exata

Dividindo a matriz de rigidez em submatrizes de ordem 2, cada submatriz terá a forma:

$$[K_{rs}] = 2\pi \iint [B_r]^T [D] [B_s] r dr dz \quad 5.45$$

As submatrizes B podem ser divididas em uma parte constante e uma parte variável:

$$[B_i] = [\bar{B}_i] + [B'_i] \quad 5.46$$

em que $[\bar{B}_i]$ é o valor de $[B_i]$ no centróide e $[B'_i]$ a diferença entre o valor verdadeiro (integração analítica) e esse valor:

Da Eq. 5.35 obtemos para a 2a. parcela:

$$[B'_i] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left\{ (a_i + C_i z)/r - (a_i + C_i \bar{z})/\bar{r} \right\} / 2\Delta \quad 5.47$$

A submatriz de rigidez pode também, correspondentemente, ser escrita como:

$$[K_{rs}] = [K_{rs}] + [K'_{rs}] \quad 5.48$$

A primeira parcela corresponde à expressão 5.44 e a segunda a uma parcela corretiva dada por:

$$[K'_{rs}] = \frac{2\pi}{(2\Delta)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [D] \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \int \left\{ (a_r + C_r z)/r - (a_r + C_r \bar{z})/\bar{r} \right\} \left\{ (a_s + C_s z)/r - (a_s + C_s \bar{z})/\bar{r} \right\} r \cdot dr \cdot dz \quad 5.49$$

Portanto:

$$[K'_{rs}] = \frac{\pi}{2\Delta} \begin{bmatrix} D_{33} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left\{ a_r \cdot a_s \left(I_1 - \frac{1}{r} \right) + \right. \\ \left. + (a_r \cdot C_s + a_s \cdot C_r) (I_2 - \bar{z}/\bar{r}) + C_r C_s (I_3 - \bar{z}^2/\bar{r}) \right\}$$

5.50

Sendo:

$$\int \frac{1}{r} dr dz = \Delta I_1, \int z/r dr dz = \Delta I_2, \int \frac{z^2}{r} dr dz = \Delta I_3$$

5.2.9- Forças Nodais

a) Forças Nodais Externas

A expressão "força nodal" tem, em problemas axissimétricos, o significado de uma carga distribuída ao longo da circunferência descrita pelo nó. Assim, se \bar{R} e \bar{Z} representam as componentes radial e axial das forças por unidade de comprimento da circunferência, as forças externas a serem consideradas no cálculo serão:

$$2\pi r \bar{R} \quad \text{e} \quad 2\pi r \bar{Z} \qquad 5.51$$

sendo r a coordenada radial do ponto onde estiver sendo aplicada a força.

b) Forças Nodais devidas a Deformação Inicial

As forças nodais correspondentes à deformação inicial são expressas por:

$$\{F\}_{\epsilon_0}^e = - \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dv \quad 5.52$$

Integrando para o elemento temos:

$$\{F\}_{\epsilon_0}^e = - 2\pi \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} r dr dz \quad 5.53$$

Como ϵ_0 é constante e D não depende das coordenadas:

$$\{F\}_{\epsilon_0}^e = - 2\pi \left(\int [B_i]^T r dr dz \right) [D] \{\epsilon_0\} \quad 5.54$$

Uma expressão aproximada pode ser obtida usando-se novamente as coordenadas do centróide:

$$\{\bar{F}_i\}_{\epsilon_0}^e = - 2\pi [\bar{B}_i]^T [D] \{\epsilon_0\} \bar{r} \cdot \Delta \quad 5.55$$

Considerando-se também um termo corretivo dado por:

$$\{F_i\}_{\epsilon_0}^e = \{\bar{F}_i\}_{\epsilon_0}^e + \{F'_i\}_{\epsilon_0}^e \quad 5.56$$

Onde:

$$\{F_i\}_{\epsilon_0}^e = - 2\pi \left(\int [B_i]^T r dr dz \right) [D] \{\epsilon_0\} \quad 5.57$$

Da expressão 5.35 verifica-se que:

$$\int [B'_i]^T r dr dz = 0 \quad 5.58$$

O que faz com que o termo corretivo seja nulo. As forças devidas à deformação inicial serão então, exatamente:

$$\{F\}_{\epsilon_0}^e = -2\pi [\bar{B}]^T [D] \{\epsilon_0\} \bar{r} \Delta \quad 5.59$$

Analogamente as forças devidas à tensão inicial serão dadas por:

$$\{F\}_{\sigma_0}^e = \int [B]^T \{\sigma_0\} dv$$

$$\{F\}_{\sigma_0}^e = 2\pi [\bar{B}]^T \{\sigma_0\} \bar{r} \Delta \quad 5.60$$

c) Forças de Volume Distribuídas

Forças de volume distribuídas, tais como a força gravitacional, força centrífuga, ocorrem frequentemente em problemas axi-simétricos. Exprimindo-se essas forças por unidade de volume de material, por:

$$P = \begin{Bmatrix} R \\ Z \end{Bmatrix} \quad 5.61$$

Nas direções r e z , temos as forças nodais, que são:

$$\{F\}_P^e = -2\pi \int [N]^T \begin{Bmatrix} R \\ Z \end{Bmatrix} r dr dz \quad 5.62$$

A equivalência estática indicada na expressão pode ser verificada se observamos que, multiplicando ambos os lados da equação pelo vetor dos deslocamentos nodais $([S]^e)^T$, obtemos no lado esquerdo o trabalho das forças nodais equivalentes e no lado direito o trabalho das forças de volume, uma vez que os deslocamentos no elemento são dados por:

$$\{f\} = [N] \{\delta\}^e$$

$$\{f\}^T = \{\delta\}^e T [N]^T$$

Donde:

$$\{F_i\}_P^e = 2\pi \int \begin{Bmatrix} R \\ Z \end{Bmatrix} \psi_i r \cdot dr \cdot dz \quad 5.63$$

em que

$$\psi_i = a_i + b_i \cdot r + C_i z$$

Para a integração, tomamos a origem das coordenadas no centróide da secção do elemento, isto é, no centróide do triângulo. Então:

$$\int r dr dz = \int z \cdot dr dz = 0$$

$$\int dr dz = \Delta = \text{área do triângulo}$$

$$\{F_i\}_P^e = -2\pi \begin{Bmatrix} R \\ Z \end{Bmatrix} \int a_i r dr dz / 2\Delta \quad 5.64$$

Por outro lado, para origem no centróide:

$$a_i = a_j = a_m = \frac{2\Delta}{3}$$

Então:

$$\{ F \}_P^e = 2\pi\bar{r} \frac{\Delta}{3} \begin{Bmatrix} R \\ Z \\ R \\ Z \\ R \\ Z \end{Bmatrix} \quad 5.65$$

Se as forças de volume forem dadas por um potencial do tipo :

$$R = - \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad Z = - \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

e o potencial for especificado nos pontos nodais, teremos os três valores:

$$\{ \phi \}^e = \begin{Bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{Bmatrix}$$

Se ϕ variar linearmente no elemento, a expressão do potencial em função dos valores nodais será análoga à dos deslocamentos:

$$\{ \phi \} = [N_i, N_j, N_m] \{ \phi \}^e \quad 5.66$$

Então:

$$R = \frac{\partial \phi}{\partial r} = - [b_i, b_j, b_m] \{ \phi \}^e / 2\Delta$$

$$Z = - \frac{\partial \phi}{\partial z} = - [c_i, c_j, c_m] \{ \phi \}^e / 2\Delta \quad 5.67$$

O vetor das forças nodais equivalentes devido ao potencial de forças de volume será agora:

$$\{ F \}_P^e = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_m \\ C_i & C_j & C_m \\ b_i & b_j & b_m \\ C_i & C_j & C_m \\ b_i & b_j & b_m \\ C_i & C_j & C_m \end{bmatrix} \{ \phi \}^e \quad 5.68$$

d) O Vetor de Forças Nodais

Igualando-se os trabalhos virtuais internos e externos e dividindo-se a equação resultante pelo deslocamento virtual, obtemos:

$$\begin{aligned} \{ F \}^e &= \left(\int [B]^T [D] [B] d_v \right) \{ \delta \}^e - \int [B]^T [D] \{ \epsilon_0 \} d_v \\ &+ \int [B]^T \{ \sigma_0 \} d_v - \int [N]^e \{ P \} d_v \end{aligned} \quad 5.69$$

O primeiro termo do lado direito representa as forças nodais correspondentes aos deslocamentos dos nós.

O segundo termo representa as forças nodais requeridas para se impedirem as deformações iniciais, tais como aquelas causadas por variação de temperatura quando os nós não estão sujeitos a qualquer deslocamento.

O terceiro termo corresponde às tensões iniciais. E o quarto termo representa as forças nodais requeridas para equilibrar as cargas distribuídas no elemento.

5.2.10- Cálculo das Tensões

Como a deformação ϵ_0 não é constante no elemento, as tensões também o são. Entretanto podemos calcular as tensões no centróide do elemento usando a matriz \bar{B} , calculada no centróide:

$$\{\bar{\sigma}\}^e = [D] [\bar{B}] \{s\}^e - [D] \{\epsilon_0\} + \{\sigma_0\}$$

5.70

5.3. Programas de Computação Utilizada no Cálculo

Uma vez formulada as bases da teoria da relaxação dinâmica e dos elementos finitos, passamos a descrever sucinta - mente os programas de computação correspondentes.

5.3.1- Introdução

Existem diversos programas bi-dimensionais de elementos finitos para análise dos problemas do tipo tensão plana e deformação plana.

O elemento fundamental originalmente usado foi triangular, contudo, posteriormente, a mesma teoria foi desenvolvida para o caso dos elementos retangulares a fim de serem combinados com os elementos triangulares nas formas mais variadas das estruturas.

Os programas bi-dimensionais tais como STRUDL, SAP, ELAS, NASTRAN, SAFE-2D, SAFE-PLANE, etc, desenvolvidos nos Estados Unidos, permitem uma análise da secção plana do VPCP.

Os programas de análise axissimétrica também são incluídos nessa categoria (programas bi-dimensionais), e citaremos - alguns deles como um exemplo: BERSAFE, ELAS, MARC, NASTRAN, SAP,

SAFE-2D.

Quanto os programas tridimensionais, nos Estados Unidos, existem cerca de treze programas já desenvolvidos. Dentro destes, o programa SAFE-3D desenvolvido pela General Atomic, tem sua aplicação específica nos VPCP e foi empregado na análise estrutural do vaso do Fort St. Vrain. O elemento básico é um tetraedro de deformação constante.

Para uma análise inelástica das estruturas, existem também desenvolvidos, inúmeros códigos americanos. As Tabelas 5.1 e 5.2, citadas na Referência /26/ resumem as principais características dos dez programas bi-dimensionais e seis outros com fins diversos. Estes programas foram desenvolvidos, visando-se uma aplicação mais específica para metais do que propriamente para concreto.

A firma General Atomic dos Estados Unidos desenvolveu o SAFE-CRACK /56/, especificamente para uma análise inelástica dos VPCP. Este programa inclui elementos bidimensionais e permite análise visco-elástica, plástica e de fissuração das estruturas planas ou axissimétricas. Permite também a idealização em elementos finitos, do concreto, armaduras de reforço, membrana interna de aço e cabos de protensão. O concreto é caracterizado no programa como um material visco-elástico dependente da idade e da temperatura, e o aço, como material perfeitamente elástico.

Devido à disponibilidade dos programas PV2-A e FEAST-1 neste Instituto (IPEN), estes foram utilizados para esta análise dos VPCPs.

Descreveremos muito resumidamente, a seguir, as principais características destes programas.

CAPACIDADES		ANSYS	ASKA III-1	MARC	NASTRAN	NEPSAP	NONSAP
CARREGAMENTO ESTÁTICO		X	X	X	X	X	X
CARREGAMENTO DINÂMICO		X	X	X	X	X	X
ELEMENTOS	1.D	X	X	X	X	X	X
	2.D	X	X	X	X	X	X
	3.D	X	X	X		X	X
	CASCAS						
	Cascas de Revolução	X		X			
	Arbitrárias	X		X		X	
CARREGAMENTO TÉRMICO		X	X	X		X	
PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DEPENDENTES DA TEMPERATURA		X	X			X	
NÃO LINEARIDADES GEOMÉTRICAS		X		X	X	X	X
GRANDES DEFORMAÇÕES				X		X	
MODELO DO MATERIAL	PLASTICIDADE METÁLICA	X	X	X		X	
	SOLOS/ROCHAS			X			

TAB. 5.1 - Capacidade de Alguns Programas Americanos com Fins Genéricos

CAPACIDADES		CÓDIGOS ESTRUTURAIS BI-DIMENSIONAIS										
		EPAD	EPIC-II	H326	OASIS	PLAST 2	SAAS III	ASAAS	DYNS	HONDO	SAMSON	ISA
CARREGAMENTO ESTÁTICO		X	X	X	X	X	X	X			X	X
CARREGAMENTO DINÂMICO									X	X	X	
CARREGAMENTO TÉRMICO			X	X	X		X	X				
MATERIAIS DEPENDENTES DA TEMPERATURA			X	X	X		X	X				
SÓLIDOS AXI-SIMÉTRICOS	Carregamento Axi-simétrico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Carregamento Assimétrico	X						X				
NÃO LINEARIDADES GEOMÉTRICAS			X						X	X		
GRANDES DEFORMAÇÕES										X		
MODELO DO MATERIAL	Plasticidade Metal	X	X	X	X	X	X	X		X	X	
	Solos/Rochas					X			X	X	X	
Elasticidade Borracha										X		

TAB. 5.2 - Capacidade de Alguns Programas Estruturais Bidimensionais Inelásticos Existentes nos EUA.

5.3.2- Programa PV2-A

O programa PV2-A , introduzido e desenvolvido no IPEN pelo engenheiro Ian Davidson, se baseia no método da relaxação dinâmica, descrito na Secção 5.1 , juntamente com o PV2-A, que é um programa de análise axissimétrica, foram desenvolvidos outros programas também baseados no mesmo método. Tais programas são: PV1, de análise plana; PV3, de análise tridimensional; e QV2, de análise dinâmica.

A Figura 5.2 apresenta o diagrama de blocos do programa mostrando a sua sequência . As nomenclaturas e as equações desse programa foram apresentadas no APÊNDICE A.

Inicialmente, a estrutura é subdividida em tantos blocos quantos forem necessários para permitir uma análise adequada da mesma. A entrada de dados iniciais nesse programa não é codificada, devendo definir certas variáveis de entrada por meio dos ninhos de "DO".

As variáveis introduzidas por meio dessas malhas são as seguintes:

- KODE, que define as condições de contorno.
- QEXT, que define as cargas verticais externas.
- PEXT, que define as cargas horizontais externas.
- PINT, que define as pressões internas do vaso.
- RRDEL, que define as dimensões radiais de cada bloco.
- ZZDEL, que define as dimensões verticais de cada bloco.

- ERATIO, que define a relação entre dois módulos de elasticidade e será utilizada nas regiões em que houver variação de propriedades mecânicas dos materiais.
- ASTEEL, que define a porcentagem de armadura frouxa de um determinado bloco.

Os demais parâmetros são definidos por comandos simples de FORTRAN.

Quanto aos mecanismos de cálculo do programa, eles estão descritos detalhadamente na referência /14/.

A impressão dos dados de saída é feita pela sub-rotina MATPRT. Essa sub-rotina tem a função de imprimir as diversas malhas de modo ordenado, no formato de uma matriz.

Obteremos, como saída, os seguintes dados:

- Dimensões de cada bloco.
- Carregamento radiais e verticais.
- Códigos das condições de contorno.
- ERATIO
- ASTEEL
- Velocidades radiais e verticais.
- Deslocamentos radiais e verticais.
- Largura das fissuras.
- Tensões principais máximas e mínimas.
- Tensões radiais, verticais, circunferenciais e de cisalhamento.

Quanto a suas vantagens e desvantagens, estes serão descritos no final do Capítulo 6.

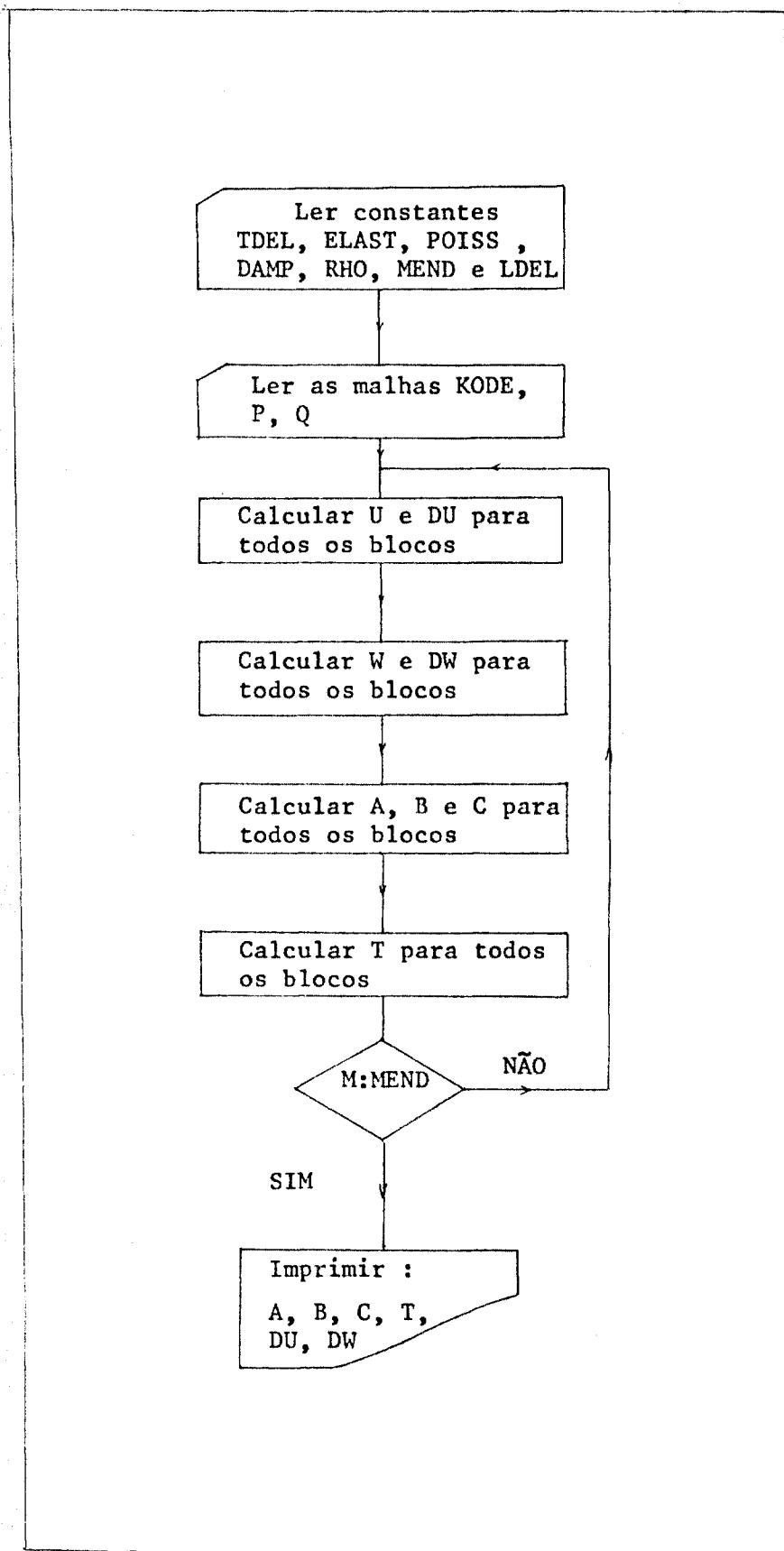


FIGURA 5.2 - Diagrama de Blocos do Programa PV2-A

5.3.3- Programa FEAST-1

O programa FEAST-1 elaborado por Wilson, da Universidade da California, em 1966 e modificado por Christian do Instituto de Tecnologia de Massachussets , baseia-se no método dos elementos finitos e utiliza-se linguagem FORTRAN IV-G.

Os problemas possíveis de serem analisados por este programa são dos seguintes tipos:

- Estrutura axissimétrica.
- Estado plano de tensões.
- Estado plano de deformações.

As propriedades dos materiais elásticos não lineares são consideradas utilizando-se das técnicas de aproximação sucessiva.

A capacidade de programa obedece as seguintes restrições:

	<u>Número máximo</u>
Pontos nodais.....	900
Elementos	800
Materiais diferentes.....	12
Valores de pressão.....	200

O programa permite o uso de elementos quadriláteros e triangulares, assim como contornos inclinados.

Os dados de entrada do FEAST-1 são codificados e facilmente introduzidos, obedecendo aos formatos especificados no manual do programa /54/.

Obteremos como listagem de saída, os seguintes dados :

- Dados de entrada.
- Deslocamentos dos pontos nodais.
- Tensões no centro de cada elemento.

5.4. Cálculos Realizados

A análise estrutural do vaso de pressão do ISMES foi dividida em duas partes: o dimensionamento do vaso e a análise do comportamento do modelo experimental sob o ponto de vista do modelo teórico.

5.4.1- Dimensionamento do Modelo de ISMES

O dimensionamento do modelo de ISMES foi feito a partir das considerações sobre os efeitos dos diversos conjuntos de cabos de protensão, variação da espessura da laje e análise de tensão e deformação sob carregamento nas condições operacionais do projeto (85 kg/cm^2), excetuado o efeito da temperatura, no cálculo das tensões e deformações.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	37	2	2	2	2	2	2	3
3	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	37	22	1	1	1	1	1	1	3
4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	37	27	22	1	1	1	1	1	1	3	
5	7	2	2	2	2	2	2	2	2	27	22	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
6	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
7	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
8	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
9	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
10	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
11	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
12	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
13	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	1	1	1	1	1	1	3	
14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	11	8	1	1	1	1	1	3	
15	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
16	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
17	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
18	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
19	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
21	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
22	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
23	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
24	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
25	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
26	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
27	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
28	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
29	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
30	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
31	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
32	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
33	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
34	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
35	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
36	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
37	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
38	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
39	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
40	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
41	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	1	1	1	3	
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Figura - 5.3a - Malha do PV2-A para Dimensionamento

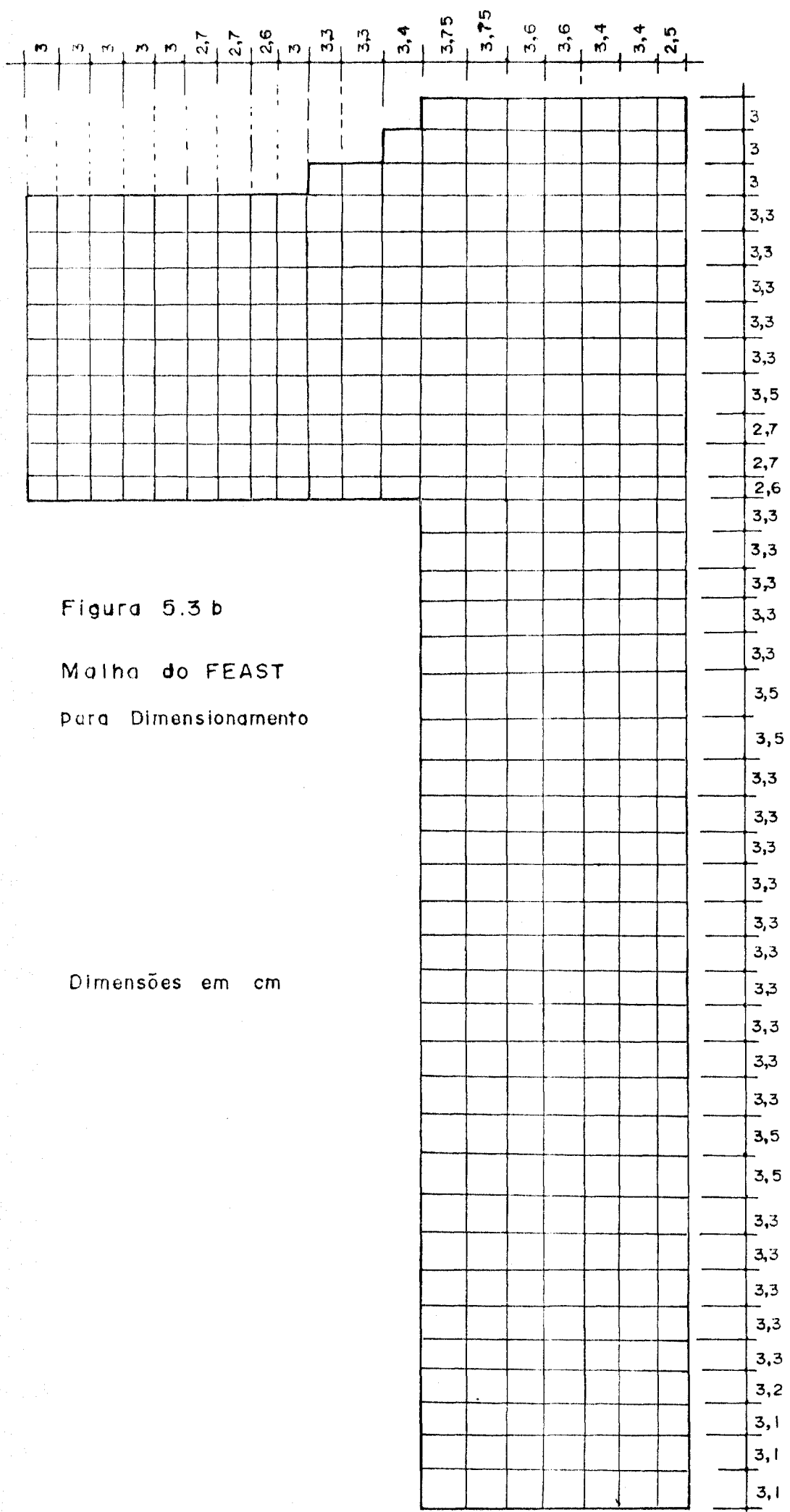
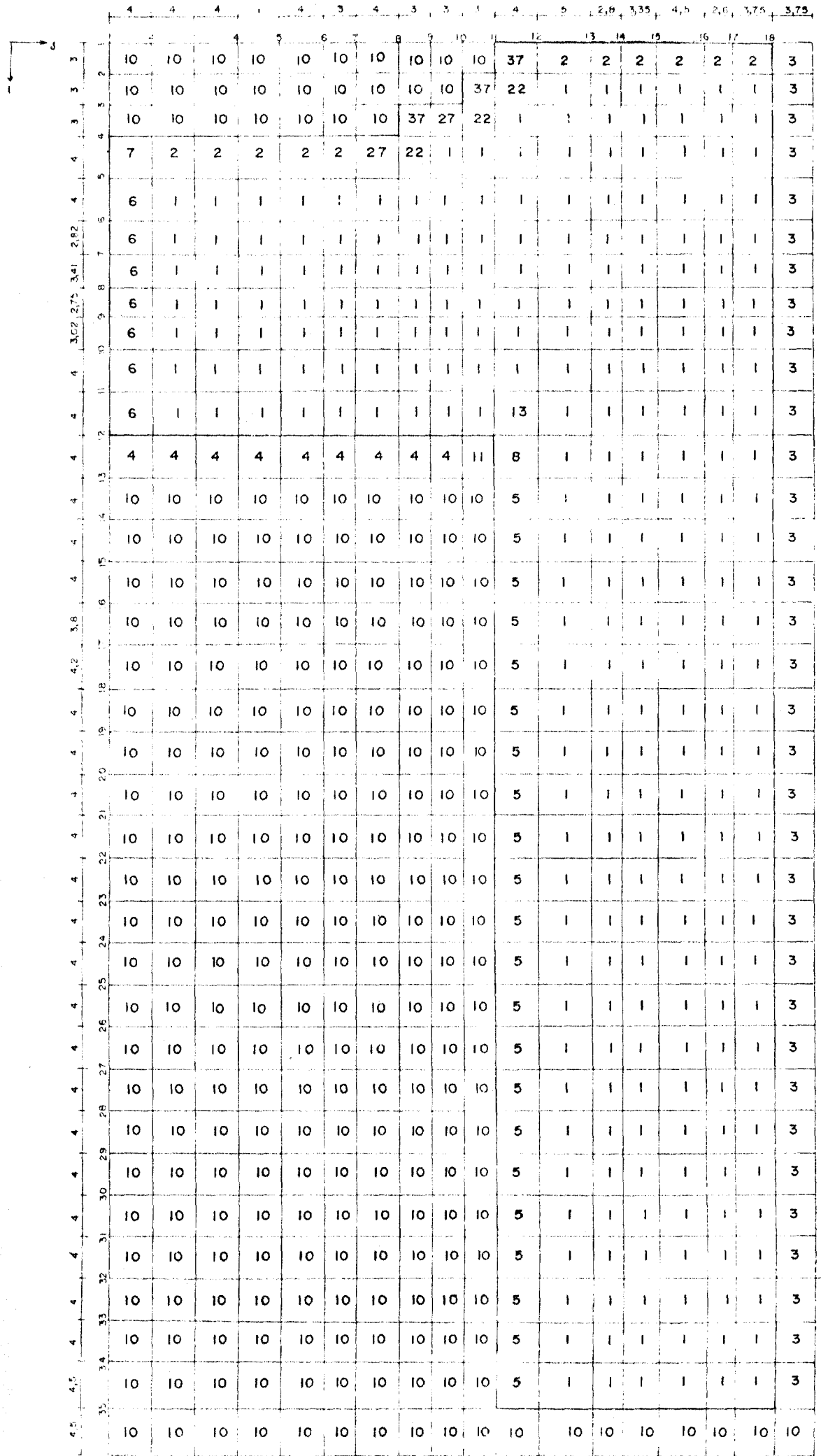


Figura 5.3 b
Malha do FEAST
para Dimensionamento

Dimensões em cm

Figura 5.4 - Malha do PV2-A - Modelo SC-b do ISMES



Dimensões em cm

As características físicas dos materiais, introduzidas no cálculo, e utilizadas na análise teórica pelo ISMES, foram as seguintes:

- Módulo de elasticidade do concreto: $E = 350.000 \text{ kg/cm}^2$
- Resistência à compressão do concreto a 28 dias: $\sigma_{rt} = 450 \text{ kg/cm}^2$
- Resistência à tração do concreto: $\sigma_{rt} = 40 \text{ kg/cm}^2$
- Coeficiente de Poisson: 0,15 .

As tensões e deformações foram calculadas utilizando os programas PV2-A e FEAST-1, e os resultados obtidos foram confrontados com aqueles obtidos por AXITEN-3, programa de elementos finitos do ISMES.

Para o caso de PV2-A, a malha adotada para o estudo do dimensionamento foi composta de 41 linhas e 20 colunas, e para FEAST-1, 392 elementos e 452 nós, conforme mostram as Figuras 5.3a e 5.3b.

5.4.2- Análise do Comportamento do Modelo Experimental do ISMES.

Analisamos o comportamento da estrutura até a sua ruína, utilizando-se PV2-A, por possibilitar a análise de acompanhamento de propagação da fissura.

Comparamos, também, alguns resultados obtidos por PV2-A e FEAST-1 no regime elástico. A malha adotada para estes objetivos foi composta de 35 linhas e 18 colunas para PV2-A e 322 elementos e 374 nós para FEAST-1) (Figura 5.4 e 5.5).

Para a aplicação destes programas foram calculados os seguintes parâmetros:

a) Forças de protensão circunferencial.

A força média num cabo é dada por:

$$T = \frac{T_0 [1 - e^{-(kl + \mu\theta)}]}{kl + \mu\theta}$$

Onde:

T_0 = Força medida na extremidade do cabo

μ = Coeficiente de atrito do cabo (0,15, determinado experimentalmente)

θ = Ângulo de curvatura do cabo

k = Coeficiente de perda por deformação do cabo
(5×10^{-4}) obtido experimentalmente.

l = Comprimento do cabo.

As forças distribuídas (PEXT) foram calculadas divididas em 7 regiões. Essas regiões foram definidas de acordo com o espaçamento entre os cabos e seus diâmetros que estão distribuídos em 7 regiões geométricas distintas.

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram um resumo dos resultados de cálculo dessas forças para três tipos de cabos (Figura 4.2 do Capítulo 4).

b) Forças de protensão vertical.

Os esforços de protensão vertical foram calculados considerando-se os valores das forças medidas nas extremidades de cada cabo (6.339 kg), como valores finais na data do teste, descontando-se todas as perdas. Estas forças agiriam

Tabela 5.3 - Resultados de Cálculo da Força Distribuída de Protensão Circunferencial para Cabos de 7 mm de Diâmetro

Tipo	T ₀ (Kg)	Raio (cm)	Ângulo (graus)	T (Kg)	P (Kg/cm)	N	P' (kg/cm)	Região	PEXT 2 (kg/cm ²)
1	4.886	51,15	133,5	4.188,00	81,88	1,83	149,84	IV	76,28
								V	69,46
								VI	37,06
2	4.886	55,65	113,0	4.230,24	76,02	1,50	114,03	VII	46,31
								IV	58,05
								V	52,86
3	4.886	58,25	91,0	4.348,58	74,65	1,16	86,59	VI	28,21
								VII	35,24
								IV	44,08
								V	40,14
								VI	21,42
								VII	26,76

Tabela 5.4 - Resultados de Cálculo da Força Distribuída de Protensão Circunferencial
para Cabos de 8 mm de Diâmetro

Tipo	T_0 (kg)	Raio (cm)	Ângulo (graus)	T (kg)	P (*) (kg/cm)	N (**)	P' (kg/cm)	Região	PEXT (***) (kg/cm ²)
1	6.366	51,15	133,5	5.456,57	106,68	1,86	195,22	I	76,56
								II	88,74
								III	91,60
2	6.366	55,65	113,0	5.511,60	99,04	1,50	148,56	I	58,26
								II	67,53
								III	69,71
3	6.366	58,25	91,0	5.665,79	97,27	1,16	112,83	I	44,25
								II	51,29
								III	52,94

(*) Força distribuída por espessura unitária na direção radial, dada por $P = T/R$, onde R = raio de curvatura do cabo.

(**) Fator de correção devido ao ajuste do número de voltas quando superpomos duas camadas.

(***) $PEXT = \frac{P' \cdot 2 \cdot d}{e}$ onde e = espaçamento entre duas camadas e d = diâmetro do cabo.

homogeneamente e axissimétricamente nas superfícies de aplicação das cargas.

Os parâmetros de projeto, utilizados no cálculo, foram os seguintes:

- Diâmetro do cabo : 8 mm
- Valor lido da força na extremidade do cabo: 6.339 kg
- Número total de cabos : 96
- Área total aplicada : 608,5 cm²
- Força total : 3.560 ton
- Força distribuída de protensão vertical: QEXT = 171 kg/cm²
- Força homogeneizada, no último bloco da malha: 35,5 kg/cm².

c) Efeito de deformação dos cabos

O efeito de deformação dos cabos foi levado em consideração por meio das curvas de tensão-deformação dos cabos de diâmetros 8 e 7 milímetros.

Essas curvas foram divididas em trechos de retas e as equações em função da carga externa, referentes a cada trecho estão apresentadas no APÊNDICE B .

d) Armaduras de reforço

As armaduras de reforço foram consideradas por meio dos parâmetros ASTEEL e ASTELC que fornecem as relações entre a área da armadura e área do concreto para cada bloco em questão.

Sendo ASTEEL, para armaduras na direção vertical, e ASTELC para direção circunferencial.

As forças que agiriam quando solicitadas, ou seja, quando houver uma fissuração, seriam calculadas por meio das seguintes equações:

$$Q(I,J) = \frac{DW(I,J) - DWT(I,J)}{ZDEL \cdot 10^4} \times E_s \times ASTEEL \quad (\text{vertical})$$

$$B(I,J) = \frac{DU(I,J) + DU(I,J+1)}{10^4 (2R + RDEL)} \times E_s \times ASTELC \quad (\text{circunferencial})$$

e) Considerações sobre penetrações múltiplas

As penetrações múltiplas na laje inferior do vaso foram consideradas, tomando-se as relações entre os módulos de Young dadas pela fórmula de Sheffield /63/. Estas relações fornecem as razões entre o módulo real e o módulo sem as penetrações.

$$\frac{E_e}{E_c} = \frac{1 - \nu_c}{\frac{1 + \Omega(1 - 2G) - \nu_c}{1 - \Omega}}$$

Onde:

$$G = \frac{\frac{2}{1-\Omega}}{\frac{1+\Omega}{1-\Omega} + \nu_C + \left(\frac{2A_h - A_s}{A_s} - \nu_S \right) \frac{E_C}{E_S}}$$

Sendo:

A_s = Área transversal do reforço

A_h = Área transversal do orifício

E_C = Módulo de Young do concreto

E_S = Módulo de Young do material de reforço

E_e = Módulo de Young efetivo da placa perfurada

ν_C = Coeficiente de Poisson do concreto

ν_S = Coeficiente de Poisson do material de reforço

Ω = Área total das penetrações/área total da placa

As hipóteses adotadas nesses cálculos, foram as seguintes:

- a) Distribuição axissimétrica das cargas verticais e horizontais.
- b) Geometria axissimétrica.
- c) Homogeneização da região do "buttress".
- d) Não consideração da membrana interna.
- e) Comportamento isotrópico do concreto.

Os parâmetros adotados no cálculo foram:

- a) Módulo de elasticidade do concreto: 410.000 kg/cm^2
- b) Coeficiente de Poisson: 0,18
- c) Coeficiente de amortecimento viscoso: 0,018
- d) Resistência à compressão do concreto: 570 kg/cm^2
- e) Resistência à tração do concreto: $40,5 \text{ kg/cm}^2$

5.4.3- Análise do Comportamento dos Modelos Experimentais do IPEN.

Para a análise do modelo descrito na Seção 4.2 do Capítulo 4, usamos o programa PV2-A, dividindo a seção plana da estrutura em 13 linhas e 13 colunas, conforme mostra a Figura 5.6 .

Os parâmetros adotados nesse cálculo foram os mesmos do item anterior , com exceção dos seguintes:

- Módulo de elasticidade do concreto : 450.000 kg/cm^2
- Coeficiente de Poisson: 0,15.

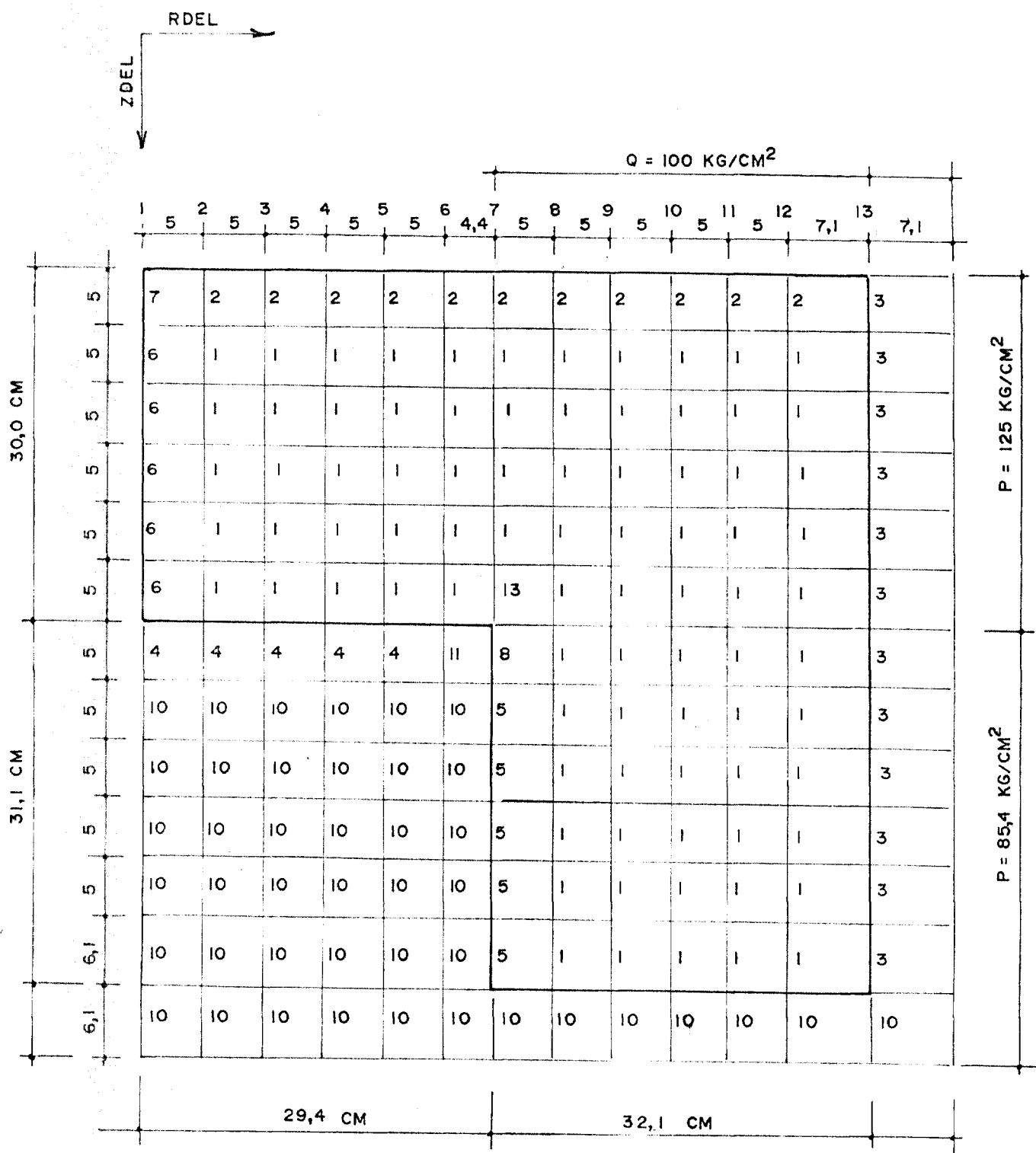


FIGURA 5.6- Malha do PV2-A Utilizado na Análise Axissimétrica do Modelo Monocavidade do IPEN.

6. RESULTADOS, CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

6.1- Introdução

Neste Capítulo são apresentados os principais resultados dos cálculos, suas conclusões e comentários finais.

6.2- Resultados do Dimensionamento do Modelo de ISMES

a) Variação da espessura da laje.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados da análise do estado de tensão e deformação da estrutura, com as seguintes espessuras das lajes : 200, 260 e 300 cm para pressão de trabalho de 85 kg/cm^2 .

A Figura 6.1 apresenta a variação da tensão radial σ_r e circunferencial σ_θ nos pontos A e B do eixo de simetria das lajes.

A Figura 6.2 apresenta a variação das deformações verticais nos mesmos pontos.

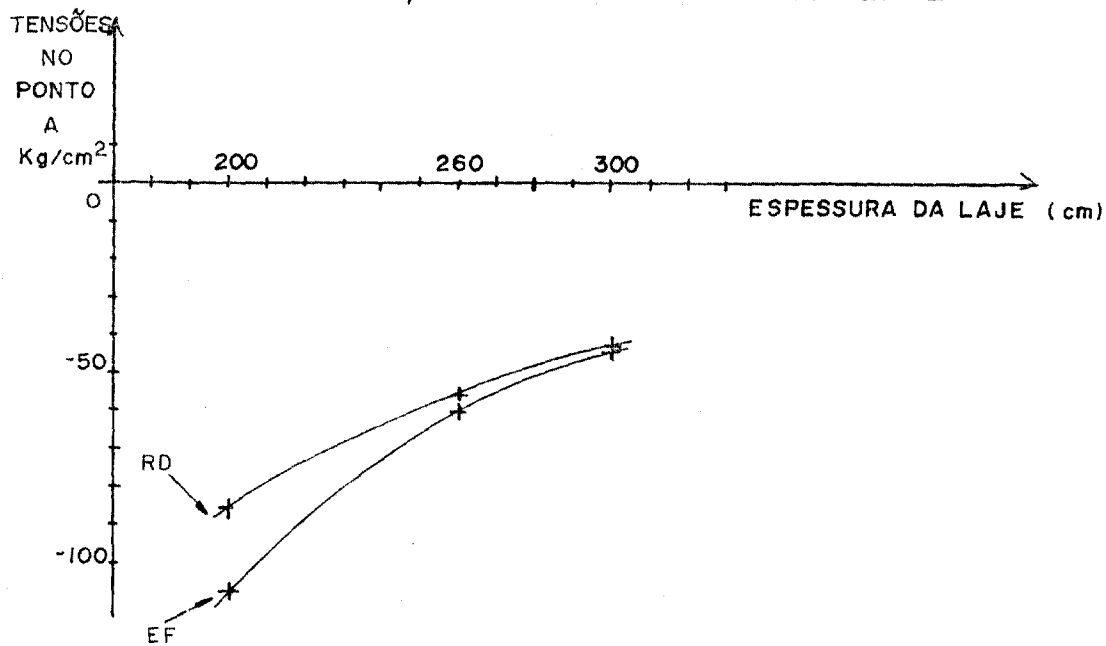
Em todos esses casos, as tensões calculadas pelo método da relaxação dinâmica resultaram em valores ligeiramente inferiores aos dos elementos finitos e, as deformações, resultaram ligeiramente superiores. Estas diferenças poderão ser menores desde que utilizássemos malhas adequadas para cada um dos casos; pois, adotamos uma única malha retangular para as três espessuras de lajes, variando-se apenas as dimensões das malhas naquela região.

ESPESSURA DA LAJE mm	NÓ (*)	PROGRAMA	TENSÕES kg/cm ²	DEFORMAÇÕES mm
200	A	RD	-86	0,358
		EF	-108	0,344
	B	RD	+165	0,322
		EF	+179	0,314
260	A	RD	-56	0,280
		EF	-60	0,252
	B	RD	+100	0,237
		EF	+111	0,214
300	A	RD	-43	0,254
		EF	-44	0,224
	B	RD	+78	0,206
		EF	+84	0,180

(*) NÓ A e nó B, ponto interno e externo respectivamente, no eixo de simetria das lajes .

Tabela 6.1 - Tensões radiais, circunferenciais e deformações verticais no eixo de simetria das lajes para uma pressão interna de 85 kg/cm².

TENSÕES $\sigma_{\theta} = \sigma_r$ NO PONTO A
EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA LAJE



TENSÕES $\sigma_{\theta} = \sigma_r$ NO PONTO B
EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA LAJE

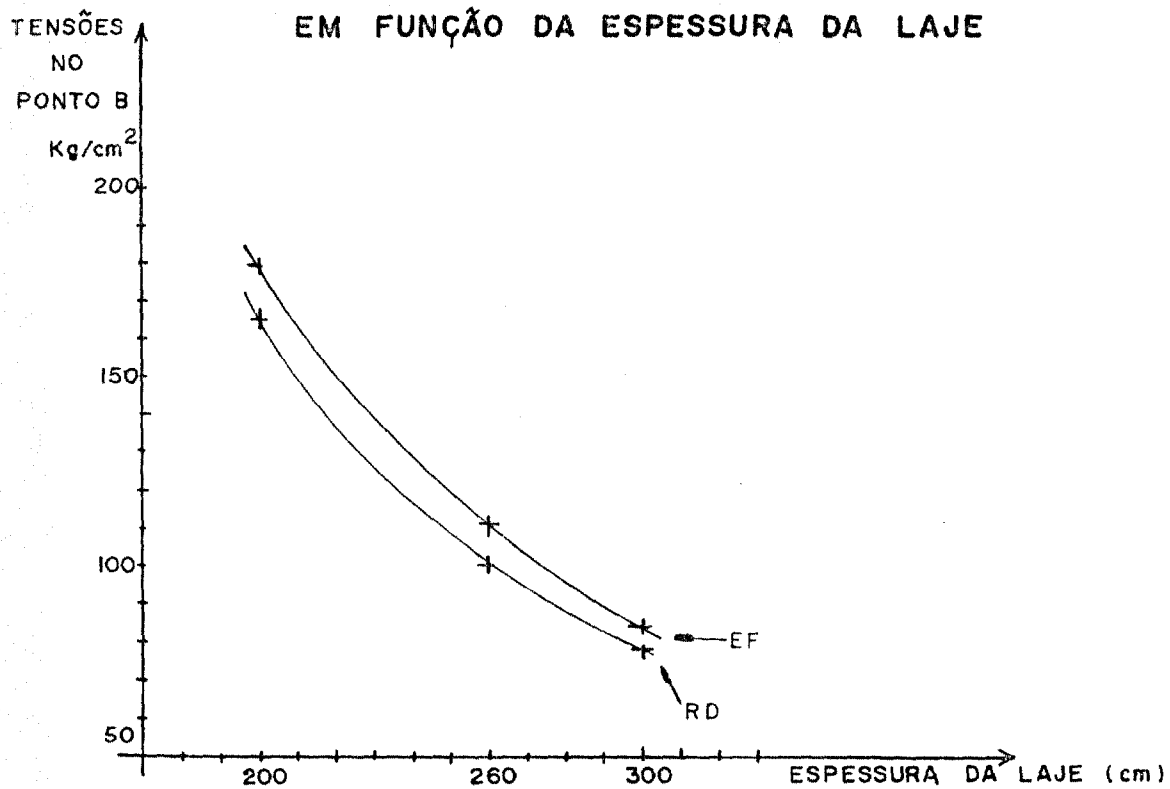


FIGURA 6.1- Variação da Tensão Radial σ_r e Circunferencial σ_{θ} nos Pontos A e B do Eixo de Simetria das Lajes

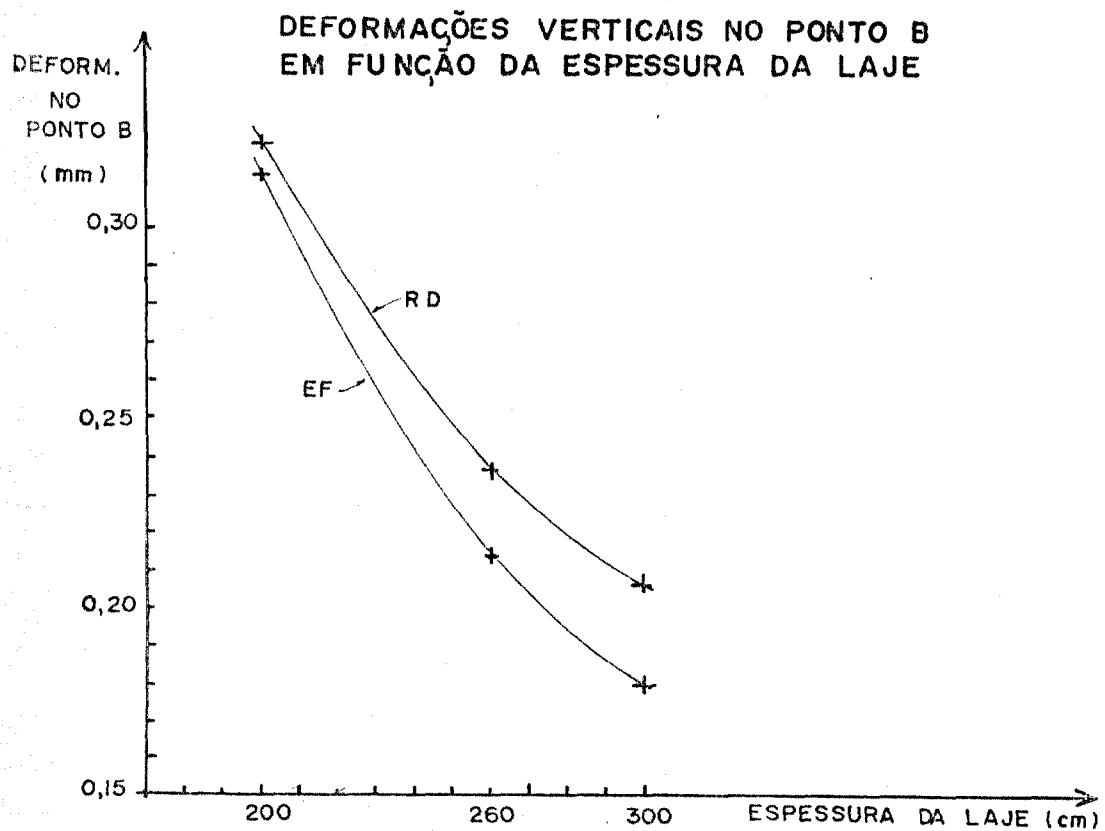
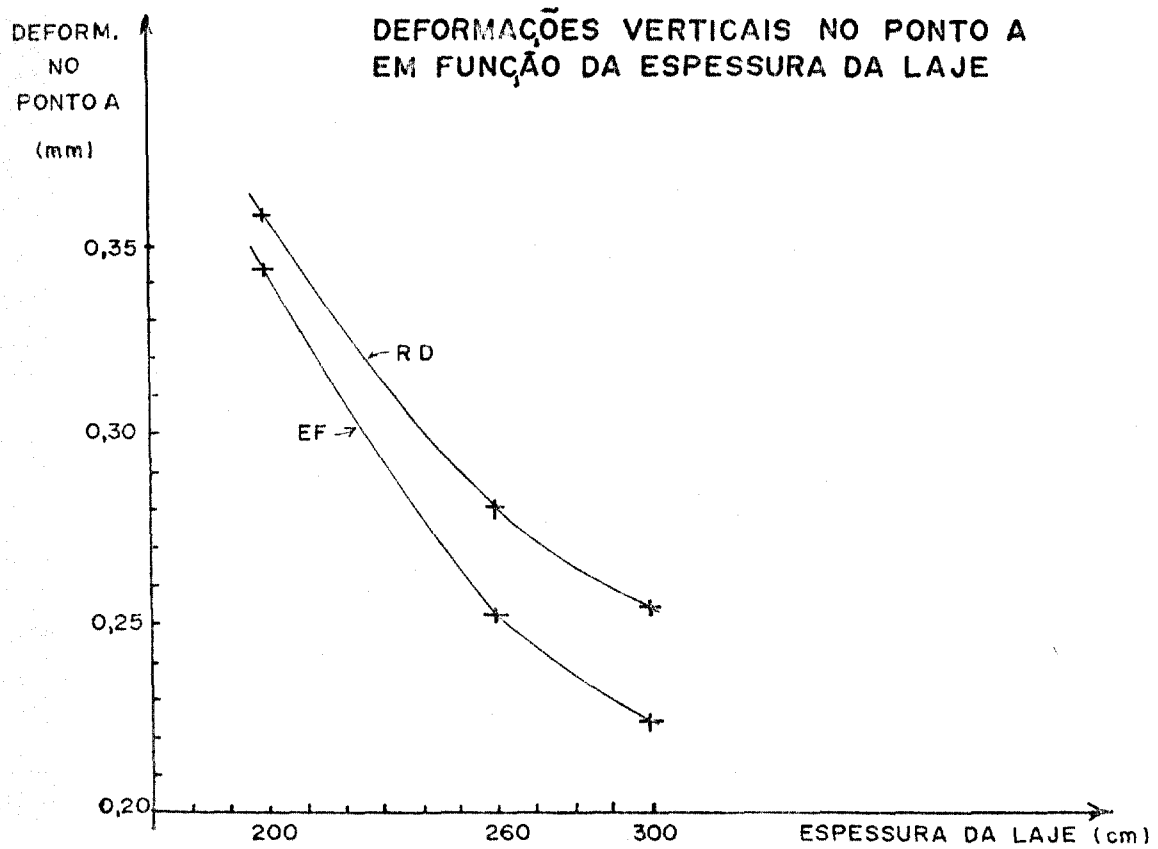


FIGURA 6.2- Variação das Deformações Verticais nos Pontos A e B do Eixo de Simetria das Lajes.

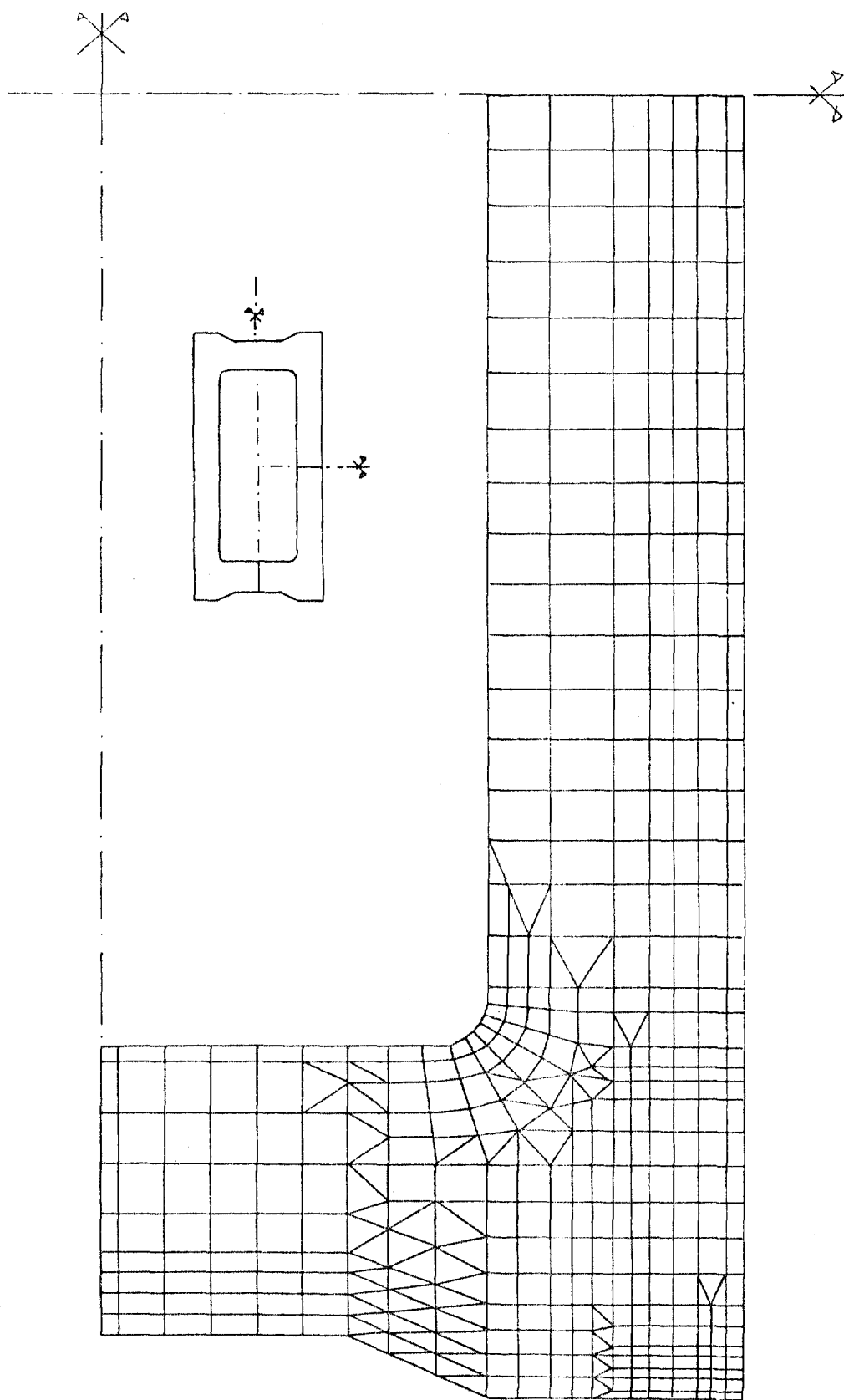


FIGURA 6.3- Malha adotada pelo Programa AXITEN-3

A malha adotada pelo AXITEN-3, conforme mostra a Figura 6.3 apresenta elementos triangulares em certas regiões. Não foi possível a utilização da mesma malha para o PV2-A, pois elementos triangulares do PV2-A está em fase de desenvolvimento no momento. Assim, tomamos malhas com elementos retangulares para o PV2-A e para o FEAST-1.

Quanto à natureza da idealização do elemento finito, observamos que, em geral, a precisão da solução aumenta com o número dos elementos tomados. Entretanto, à medida que aumentarmos o número de elementos, o tempo de computação necessário para a convergência também aumenta e com isto, o custo do processamento.

É impossível generalizarmos o raciocínio quanto ao número de elementos necessários para conseguirmos soluções satisfatórias, pois isto dependerá de cada problema em questão.

Em certos problemas, tais como regiões dentro de uma estrutura com alta concentração de tensões, a divisão gradual dentro dos elementos permitirá um estudo mais detalhado daquelas regiões (Fig.6.4). Tal distribuição dos elementos se torna eficiente e econômica em relação ao tempo de processamento, sem perda de precisão.

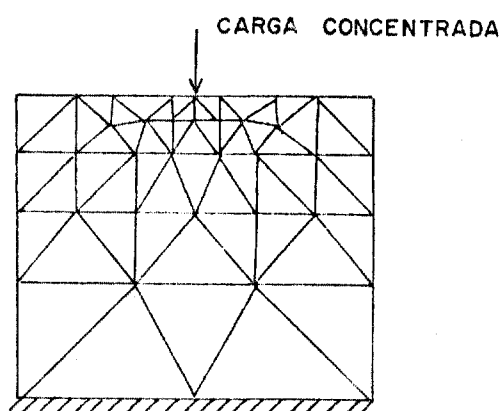


FIGURA 6.4- Malha Graduada numa Estrutura com Alta Concentração de Tensões.

No caso de uma comparação dos resultados experimentais com os resultados calculados, a precisão desejada do cálculo é aquela correspondente à precisão da instrumentação utilizada no ensaio experimental.

As referências / 57,66,70 / apresentam também alguns exemplos, mostrando as influências dos números dos elementos tomados na precisão das soluções.

O primeiro exemplo é de uma viga bi-apoiada nas extremidades, com carregamento uniformemente distribuídos; adotando-se malhas triangulares com três diferentes números de elementos, conforme mostram as Figuras 6.5 e 6.6.

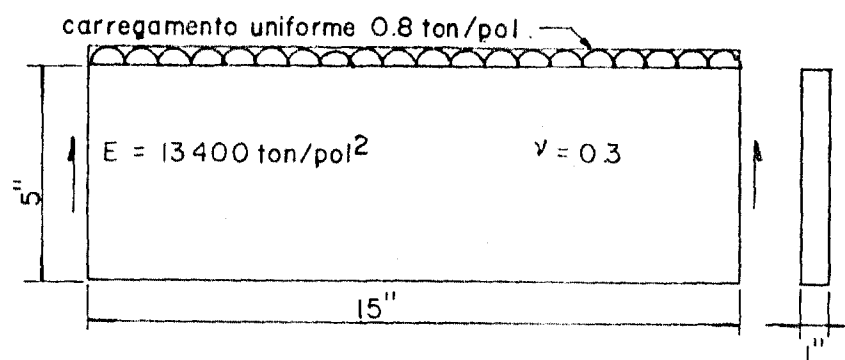
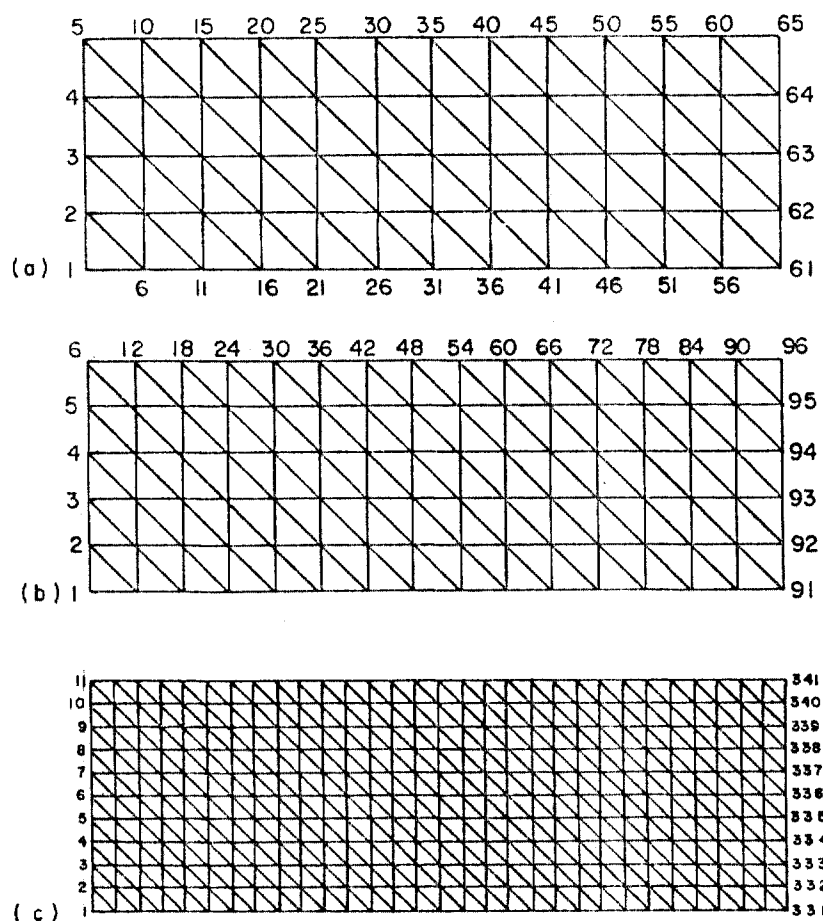


FIGURA 6.5 - Viga Bi-apoiada sob Carregamento Uniforme



- (a) 65 nós , 96 elementos
 (b) 96 nós , 150 elementos
 (c) 341 nós, 600 elementos

FIGURA 6.6- Malhas Utilizadas para Análise da Viga Bi-apoiada

A Figura 6.7 apresenta as deformações dessa viga para cada um desses três casos, comparadas com a solução obtida pela teoria simplificada de momento (desprezando as deformações oriundas do cisalhamento) e solução por teoria da elasticidade.

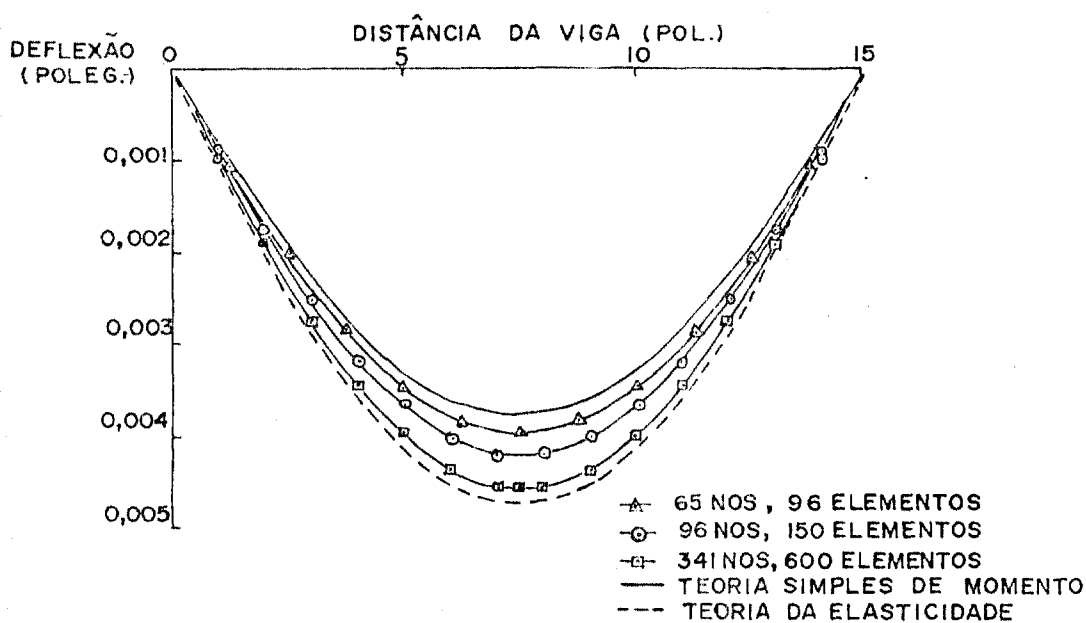


FIGURA 6.7 - Deformação da Viga Bi-apoiada sob Carregamento Uniforme.

A Figura 6.8 mostra a variação das tensões longitudinais e transversais para os mesmos casos. Em todos eles observamos uma sub-estimação dos valores em relação à solução exata. Mas à medida que a subdivisão dos elementos se refina as soluções tendem às soluções exatas.

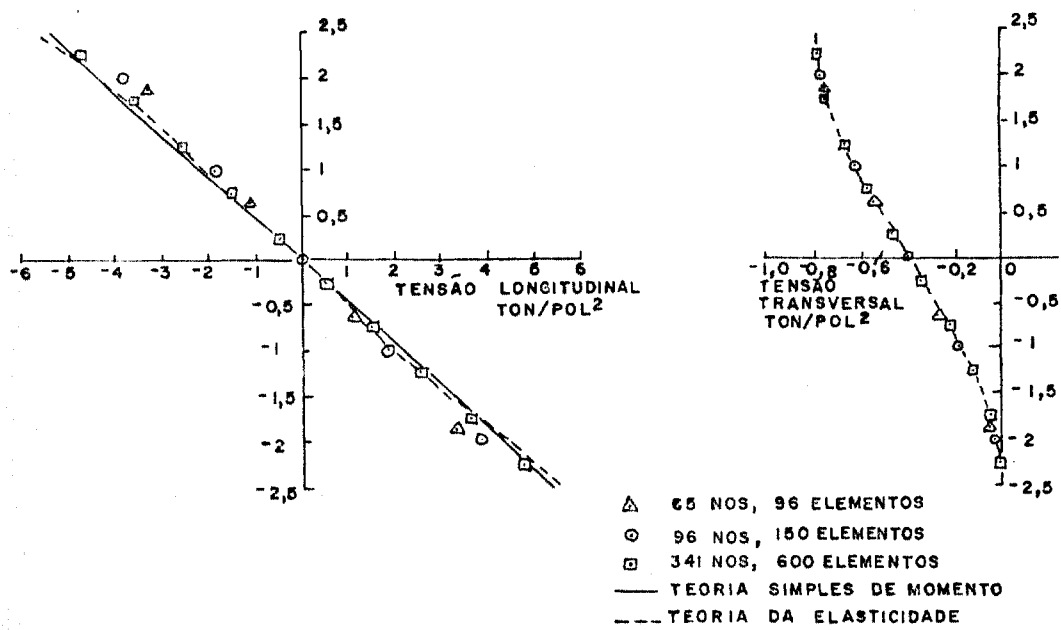


FIGURA 6.8- Variação das Tensões Longitudinais e Transversais numa Viga Bi-apoiada sob Carregamento Uniforme.

Outro exemplo é o caso analisado com elementos retangulares, conforme mostra a Figura 6.9. A viga bi-apoiada com

carregamento uniformemente distribuido foi analisada como caso das tensões planas. Três malhas com 16, 32 e 64 elementos usadas nessa análise .

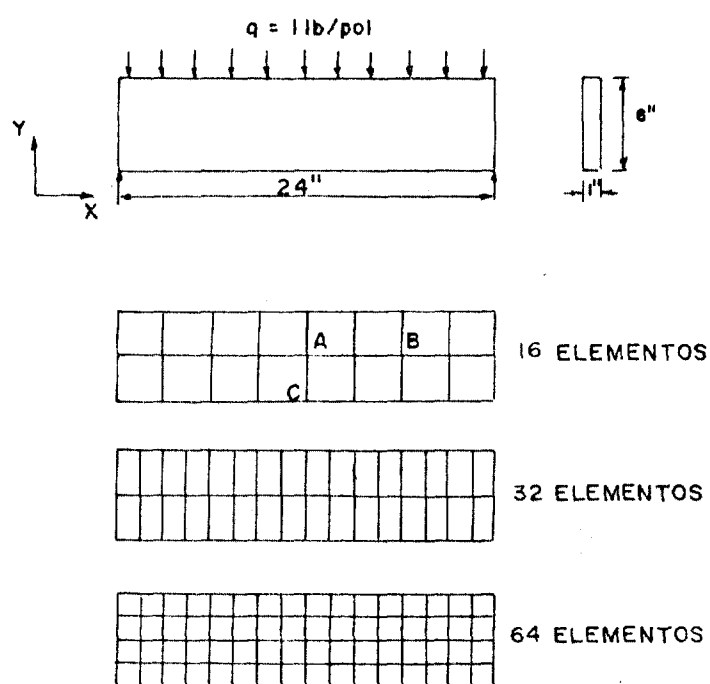


FIGURA 6.9 - Malhas Retangulares num Problema de Tensões Plana.

Na Tabela 6.2 apresentamos alguns resultados comparando estes com a solução exata obtida pela teoria da elasticidade.

NÚMERO DE ELEMENTOS	DEFORMAÇÃO VERTICAL		TENSÃO LONGITUDINAL
	Ponto A (pol x 10 ⁻⁶)	Ponto B (pol x 10 ⁻⁶)	Ponto C (lb/pol ²)
16	782	560	10,8
32	844	605	11,9
64	861	616	12,0
Solução Exata	898	645	12,2

Tabela 6.2 - Resultados das Tensões e Deformações numa Viga com Diferentes Número de Elementos Retangulares

Concluimos da Tabela 6.2 que quanto maior o número dos elementos tomados, a precisão das soluções aumenta.

A Figura 6.10 mostra as tensões longitudinais no eixo central da viga. Foram observadas certas descontinuidades para o caso com 16 elementos à meia-altura da viga, mas elas foram minimizadas tomando-se 64 elementos.

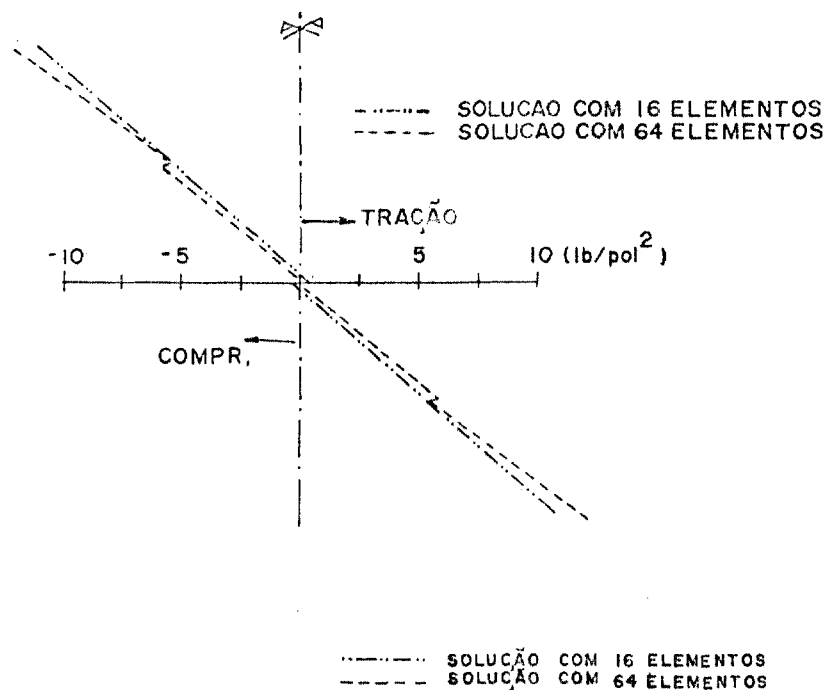


FIGURA 6.10- Tensões Longitudinais no Eixo de Simetria da Viga.

As descontinuidades das tensões nos nós dos elementos finitos são devidas à variação linear das deformações ao longo dos elementos retangulares, em contraste com a distribuição uniforme das tensões nos elementos triangulares. Em geral, essa variação linear não é muito correta e as tensões calculadas nos elementos adjacentes estão sujeitas à pequenas descontinuidades nos nós comuns dos elementos /57,66 /. Entretanto

a magnitude dessas descontinuidades torna-se muito pequena ,
tomando-se especialmente a malha mais refinada.

O terceiro exemplo é o efeito do refinamento da malha
num sólido axissimétrico de elementos triangulares.

A Figura 6.11 mostra um cilindro de parede espessa sub-
metido à pressão interna. As Figuras 6.12 apresentam as três
malhas utilizadas no cálculo.

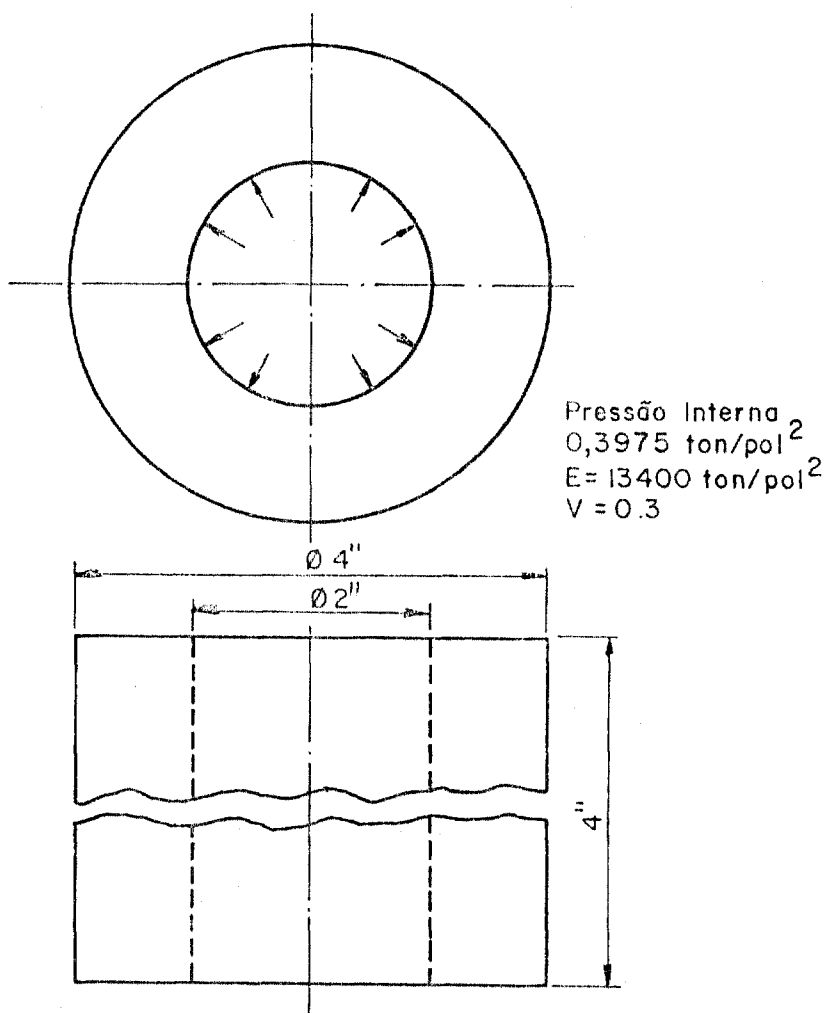


FIGURA 6.11 - Cilindro de Parede Espessa Submetido à Pressão
Interna.

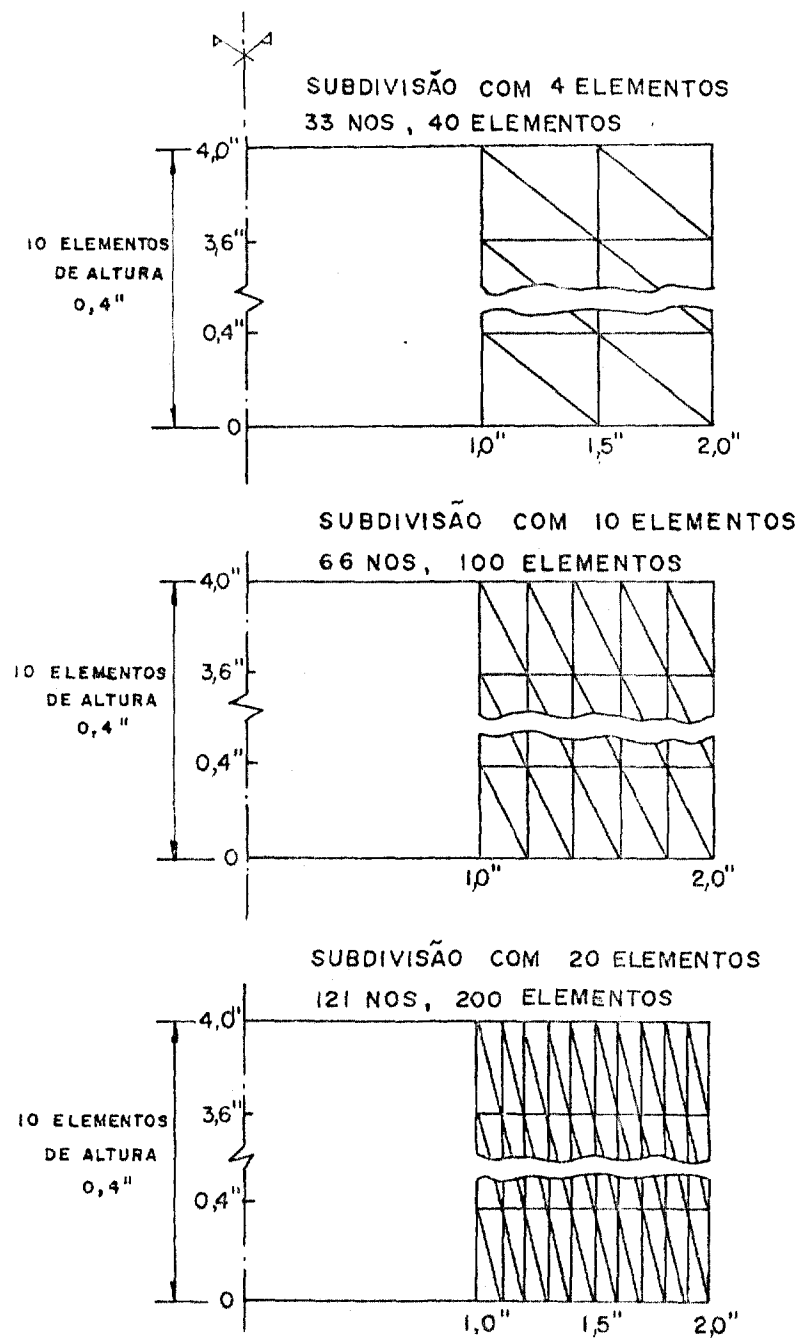


FIGURA 6.12 - Malhas Utilizadas no Cálculo do Cilindro Espesso

Os resultados dos deslocamentos e tensões no cilindro foram apresentados nas Figuras 6.13 e 6.14. Os gráficos indicam que, mesmo tomando-se as malhas menos refinadas, a deformação radial máxima era de 0,05% de erro quando comparado com o valor teórico, embora as tensões radiais e circunferenciais apresentassem 4% de diferença. Para uma malha mais refinada, essa discrepância atingiu a 0,5% .

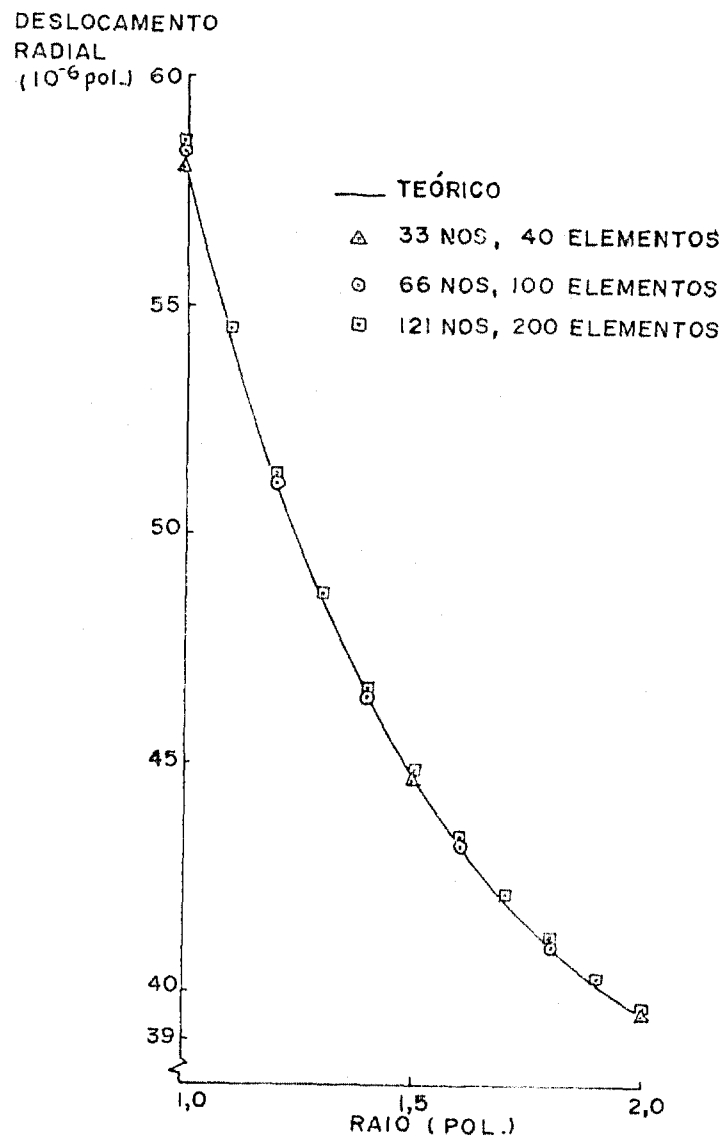


FIGURA 6.13- Deslocamento Radial no Cilindro de Parede Espessa.

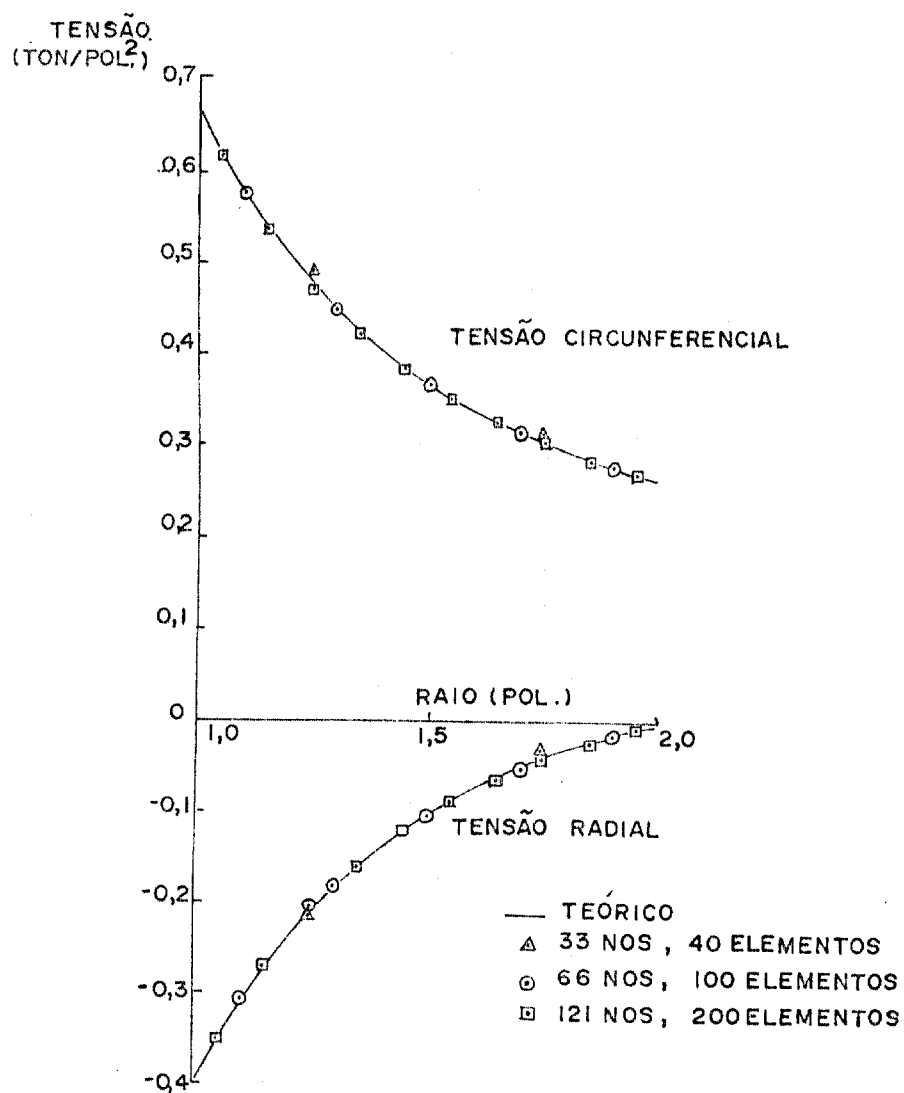


FIGURA 6.14- Tensões Radiais e Circunferenciais num Cilindro de Parede Espessa.

b) Tensões radiais no eixo de simetria da laje

A Figura 6.15 apresenta o estado da tensão radial no eixo de simetria da laje, quando aplicarmos as cargas de protensão, pressão interna do gás nas condições operacionais (85 kg/cm^2), e o efeito conjugado.

A diferença máxima observada foi de 18,8% no nó B, quando na estrutura atua somente a pressão interna.

c) Deformações radiais no eixo da barra de controle e no eixo central da bomba de circulação principal.

A Figura 6.16 representa as deformações radiais calculadas pelo PV2-A e AXITEN-3.

A curva A representa a deformação sofrida pelo eixo quando aplicarmos somente as cargas de protensão, a curva B a pressão interna do gás (85 kg/cm^2) e a curva C, o efeito conjugado. A maior diferença observada foi nas bordas da curva C, onde há uma superposição dos erros que poderão ser minimizadas se tomarmos uma malha adequada naquela região.

Em todos os casos, as variações das deformações calculadas pelo PV2-A foram mais intensas.

NÓ	PROGRAMA	PROTENSÃO	PRESSÃO DO GAS (85 KG/CM ²)	PROTENSÃO PRESSÃO DO GAS
A	REL.DIN.	135.00	58.73	195.71
	EL.FINITOS	139.00	50.40	189.40
B	REL.DIN.	131.68	92.77	36.33
	EL.FINITOS	121.00	76.04	42.05

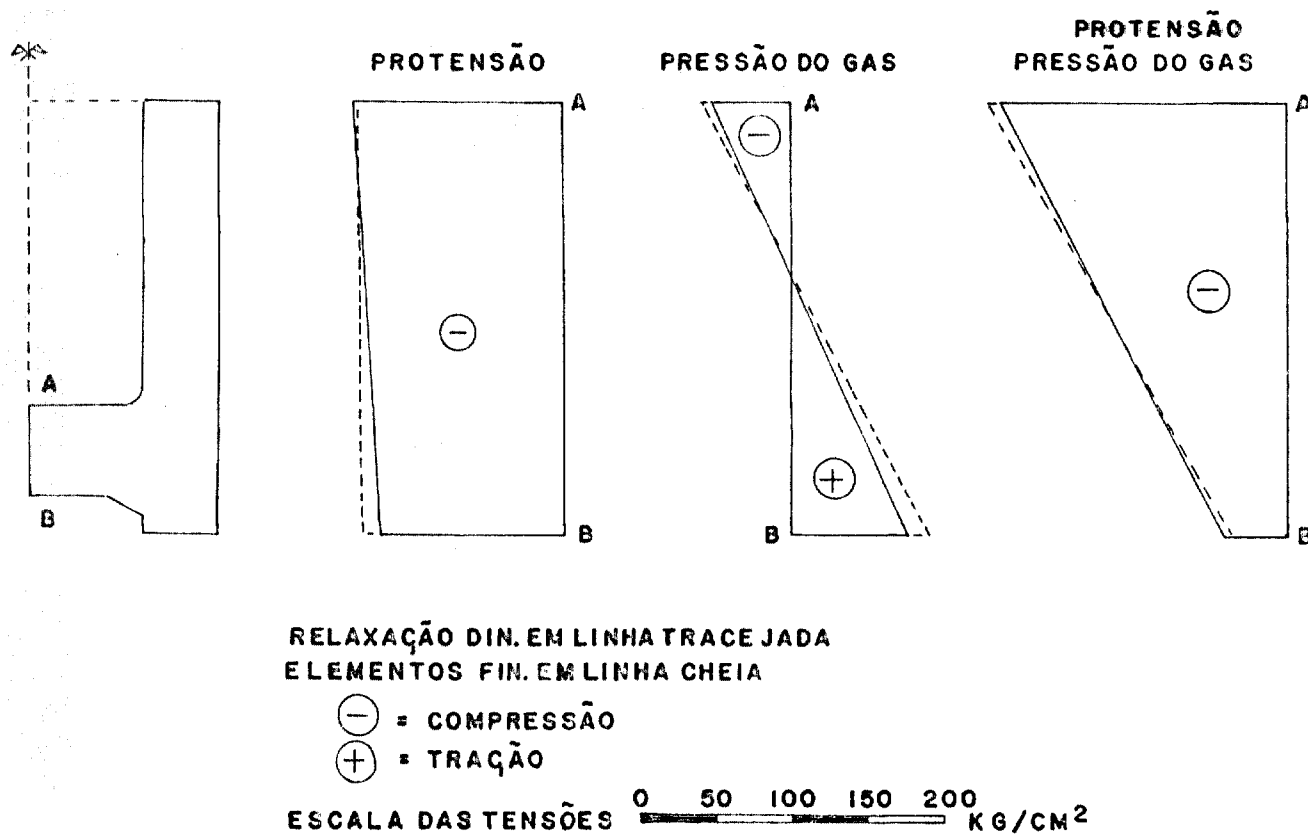
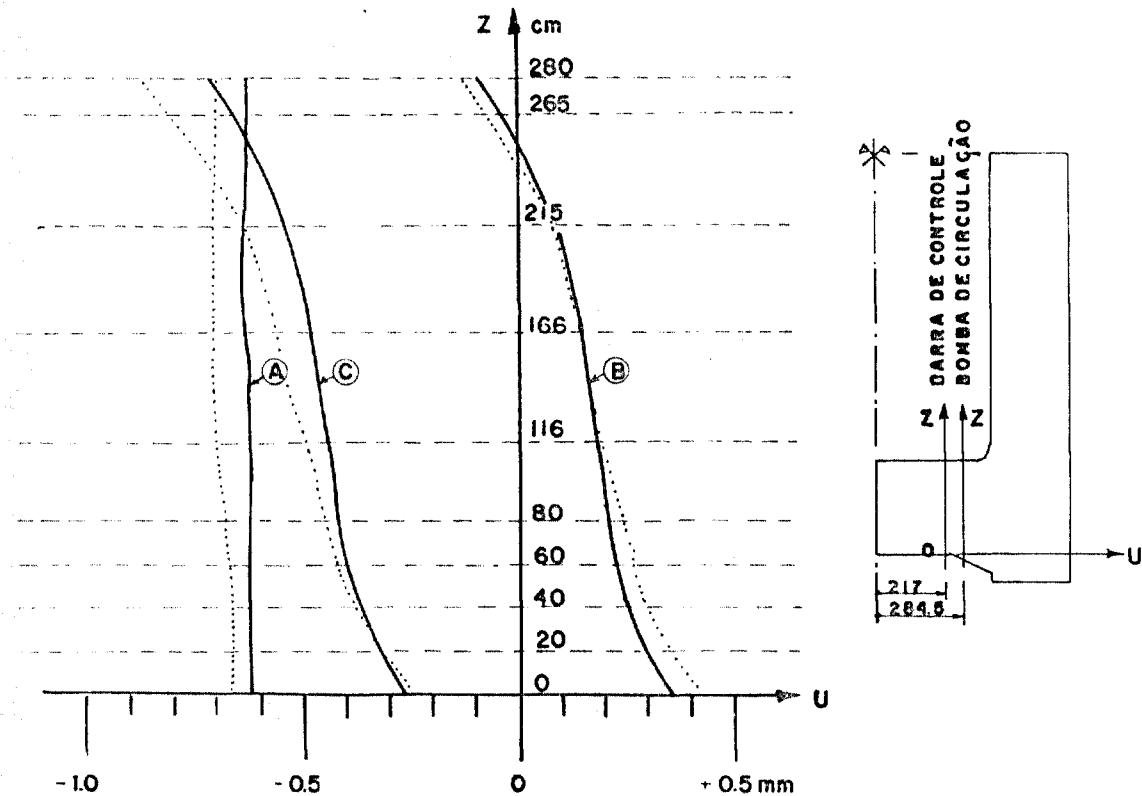
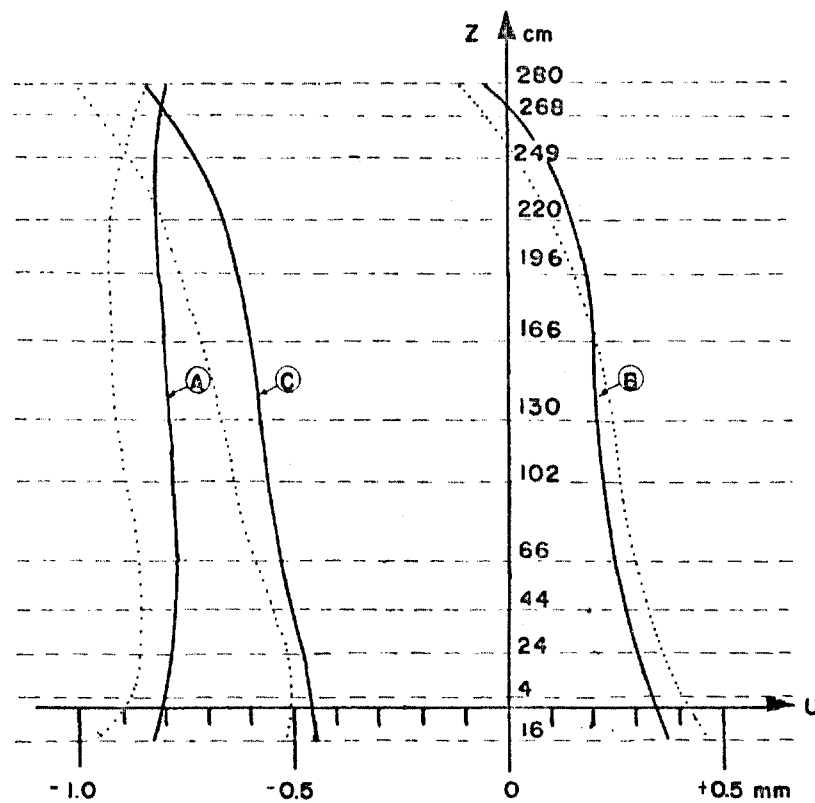


FIGURA 6.15 - Tensões Radiais no Eixo de Simetria da Laje

DEFORMAÇÕES RADIAIS NAS PENETRAÇÕES
DAS BARRAS DE CONTROLE EXTERNAS



DEFORMAÇÕES RADIAIS NO EIXO CENTRAL DA
CAVIDADE DA BOMBA DE CIRCULAÇÃO PRINCIPAL



A = PROTENSÃO
B = PRESSÃO DO GAS (85 KG/CM²)
C = PROTENSÃO + PRESSÃO DO GAS
RD = LINHA PONTILHADA
EF = LINHA CHEIA

FIGURA 6.16- Deformações Radiais no Eixo Externo da Barra de Controle e Eixo Central da Bomba de Circulação Principal

d) Análise dos esforços de protensão nas condições de trabalho .

Foram analisados os estados de tensão-deformação para todos os conjuntos dos cabos de protensão por meio dos programas PV2-A e FEAST-1 e confrontamos com o do AXITEN-3.

A Figura 6.17 apresenta a posição dos grupos e os respectivos esforços. Houve uma boa concordância entre os resultados, conforme podemos observar pelas Tabelas 6.3 a 6.23 e Figuras 6.18 a 6.31.

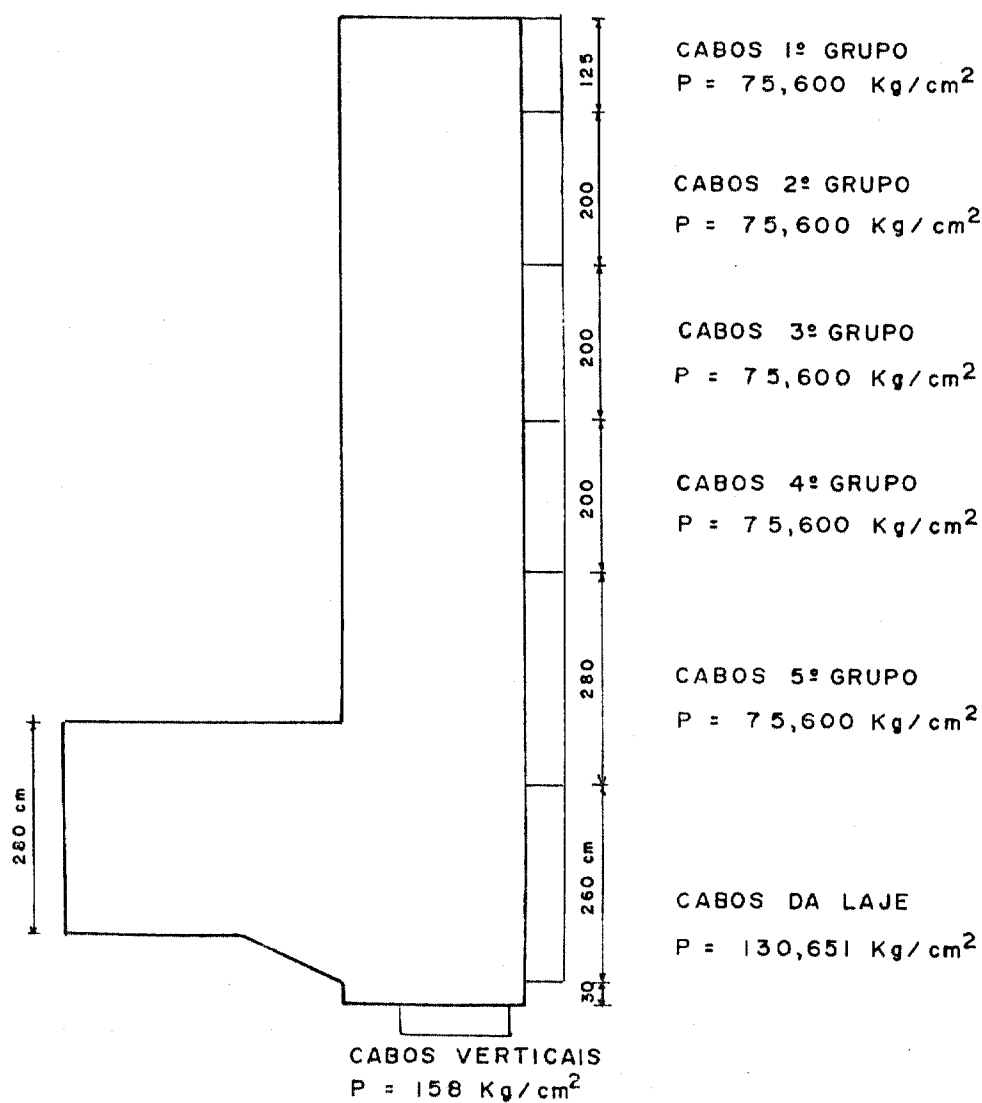


FIGURA 6.17- Posição dos Conjuntos de Cabos.

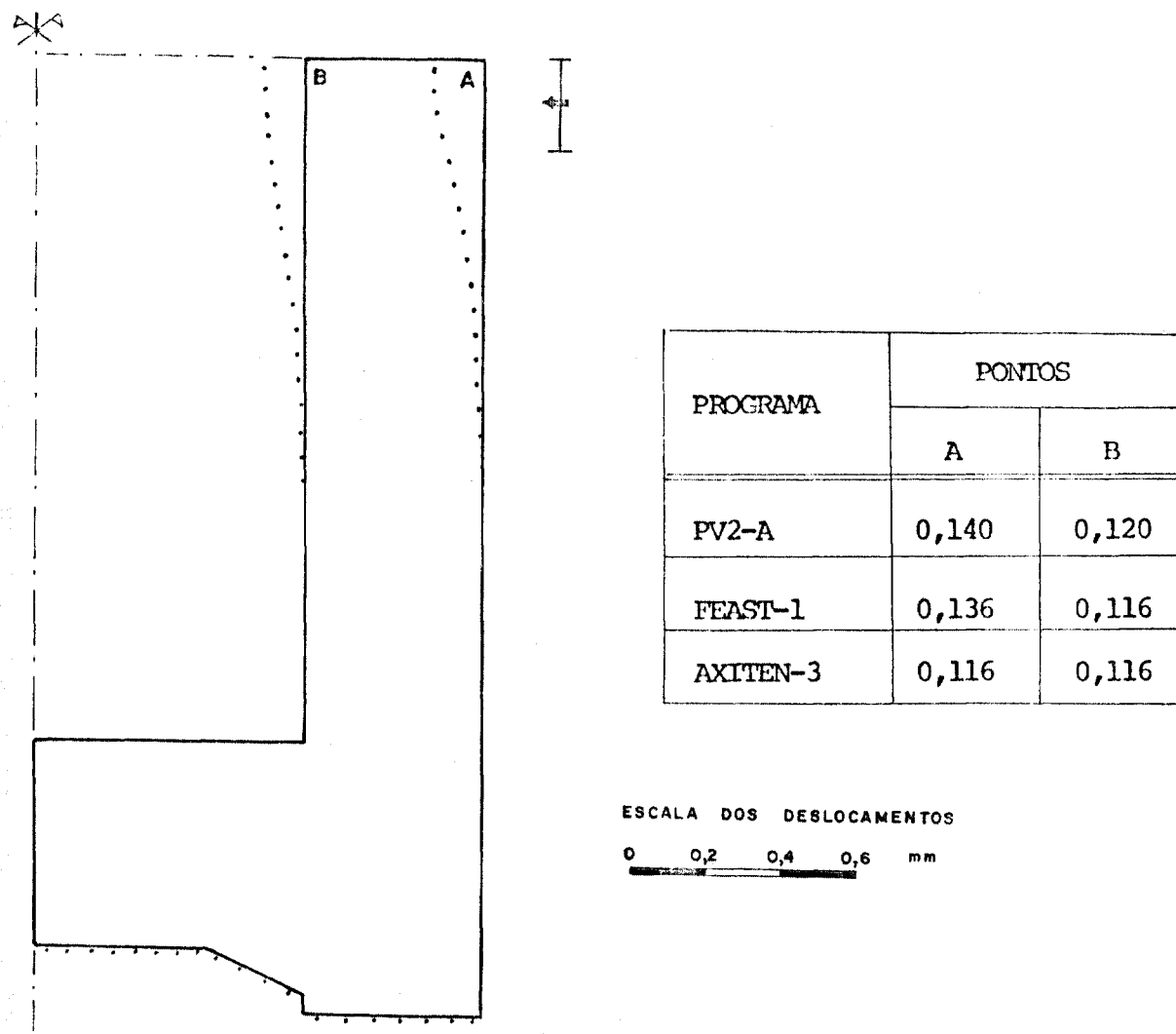
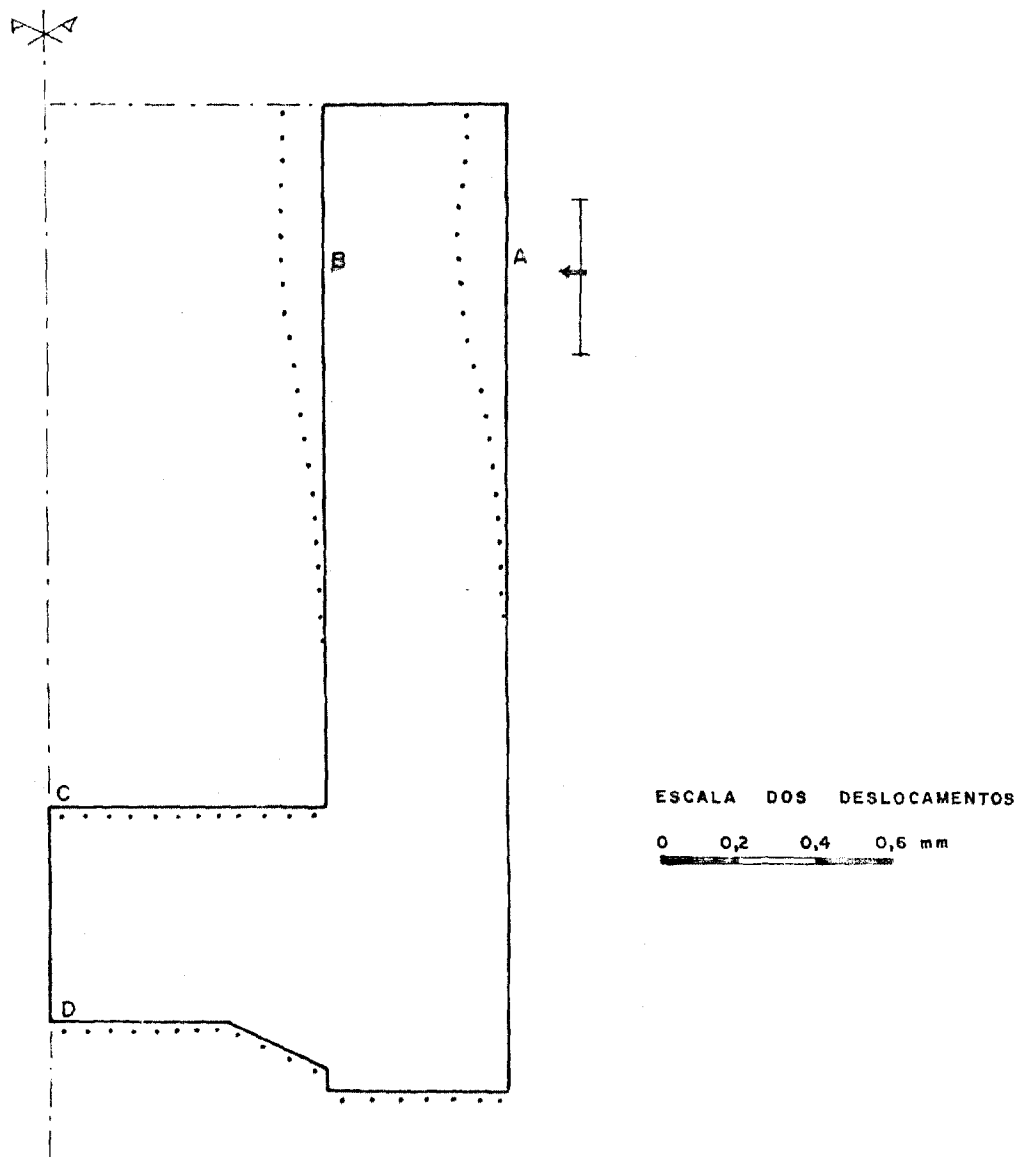
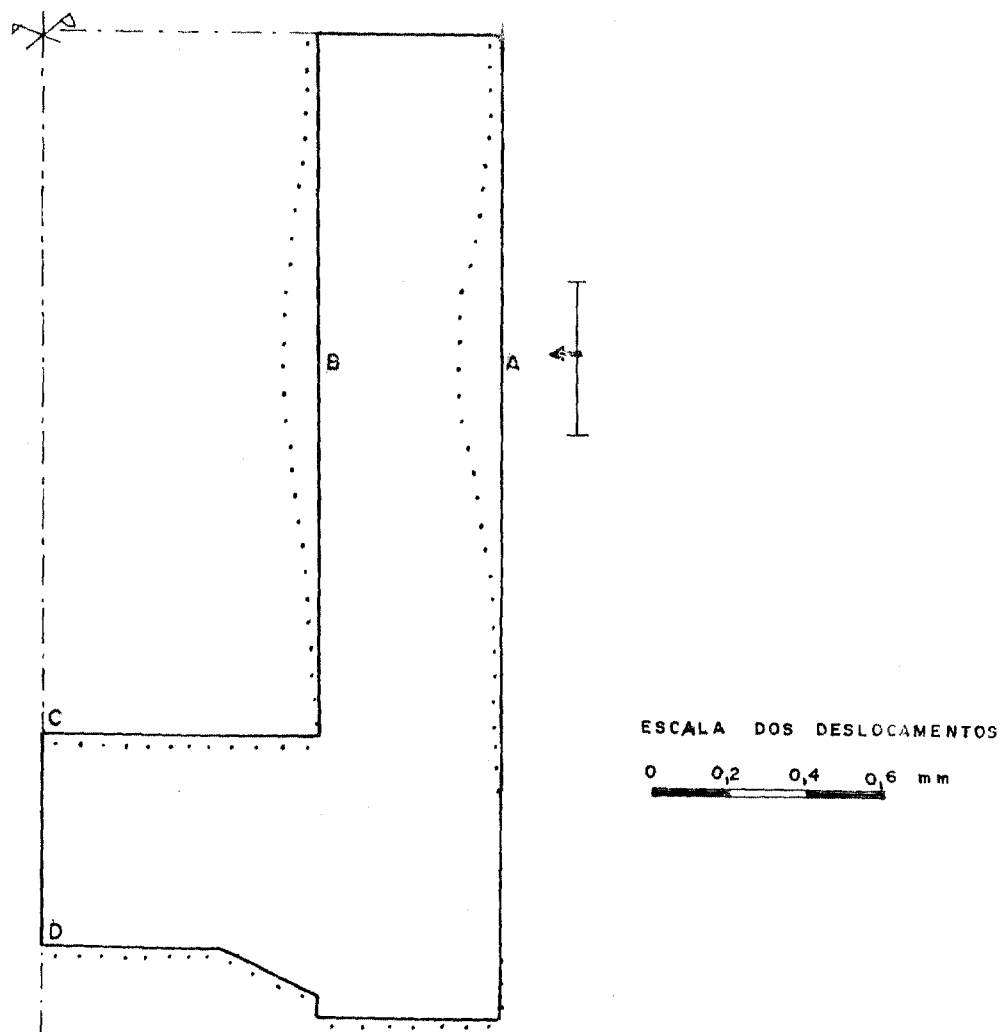


FIGURA 6.18 - Efeito da Protensão dos Cabos de 1º Grupo -
Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm .



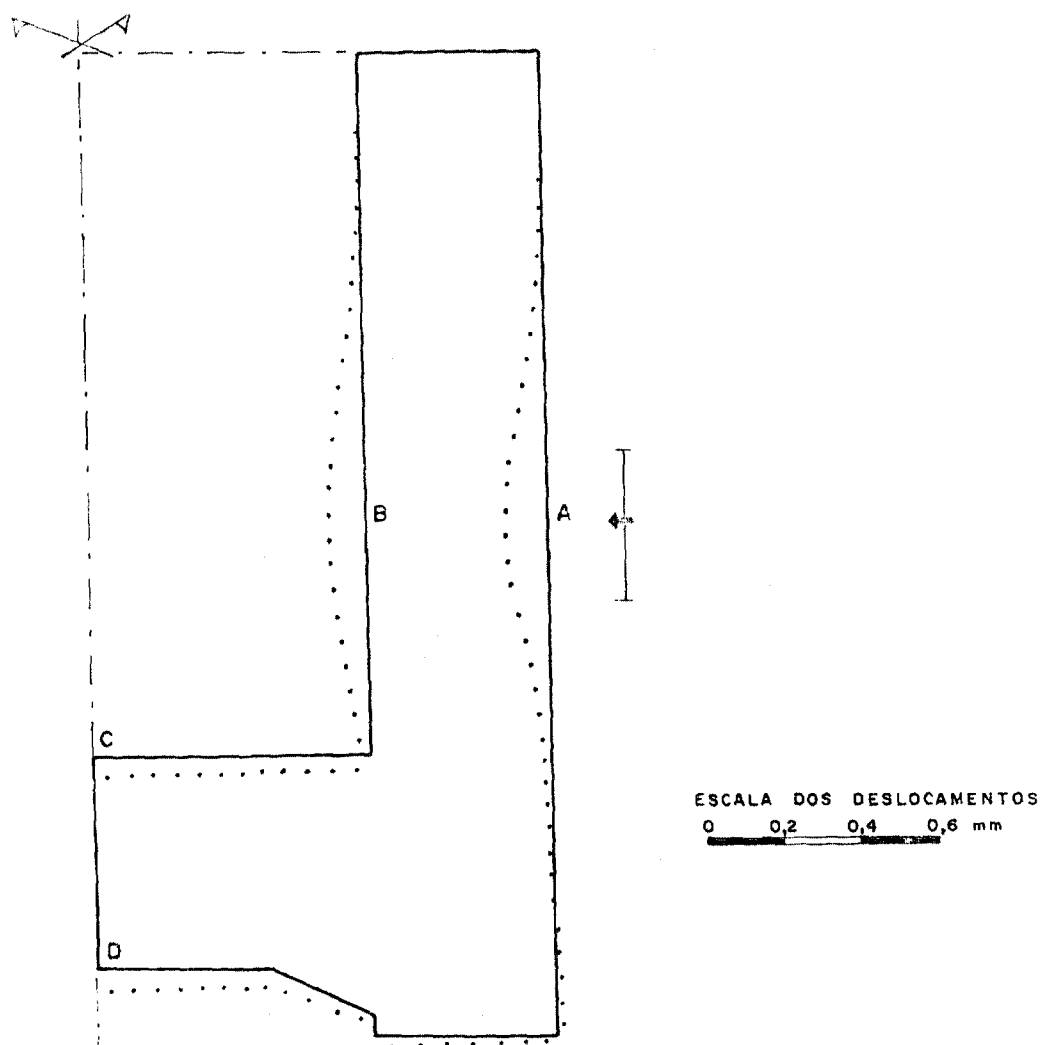
PROGRAMA	PONTOS			
	A	B	C	D
PV2-A	0,129	0,113	0,002	0,002
FEAST-1	0,127	0,108	0,002	0,002
AXITEN-3	0,128	0,116	0,002	0,002

FIGURA 6.19 - Efeito da Protensão dos cabos de 29 Grupo - Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm .



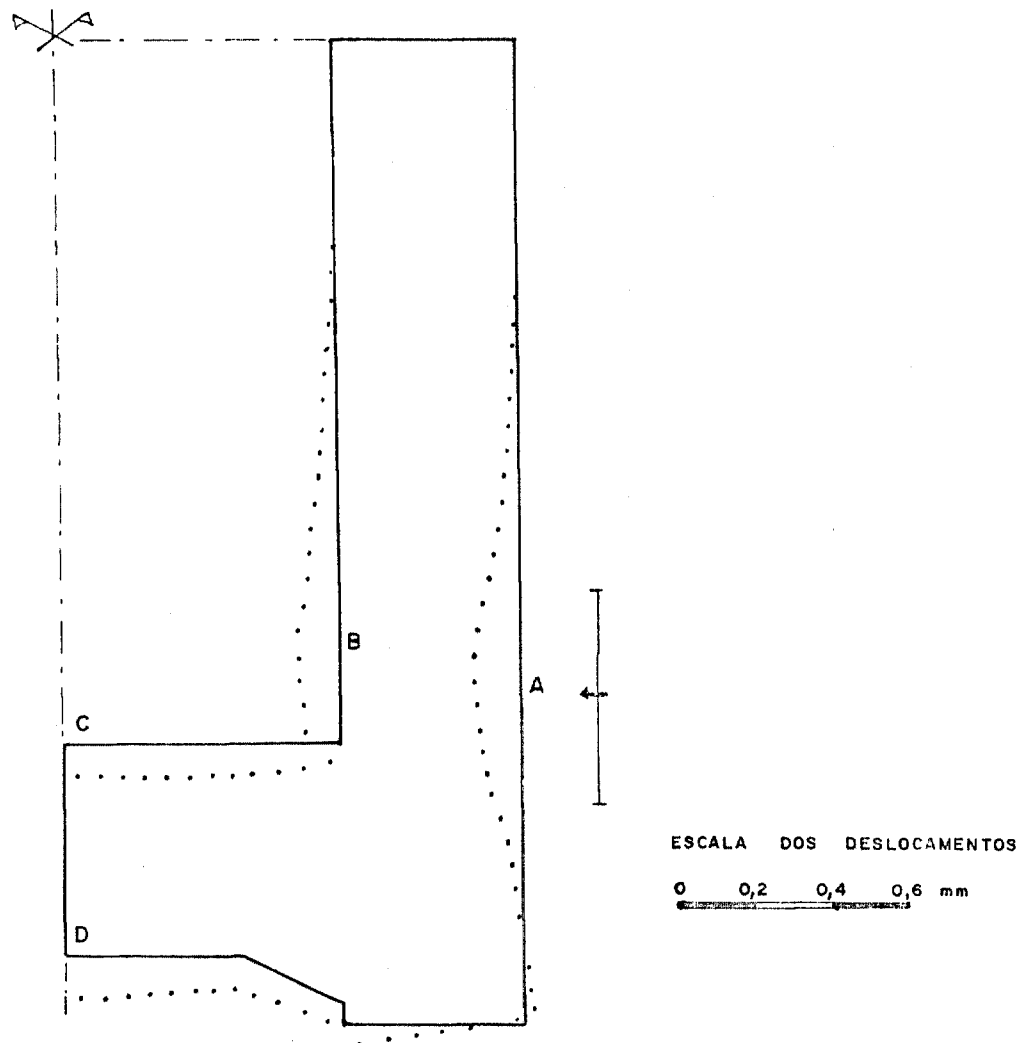
PROGRAMA	PONTOS			
	A	B	C	D
PV2-A	0,115	0,0947	0,003	0,003
FEAST-1	0,113	0,0921	0,003	0,003
AXITEN	0,108	0,0880	0,003	0,003

FIGURA 6.20 - Efeito da Protensão dos Cabos de 3º Grupo - Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm.



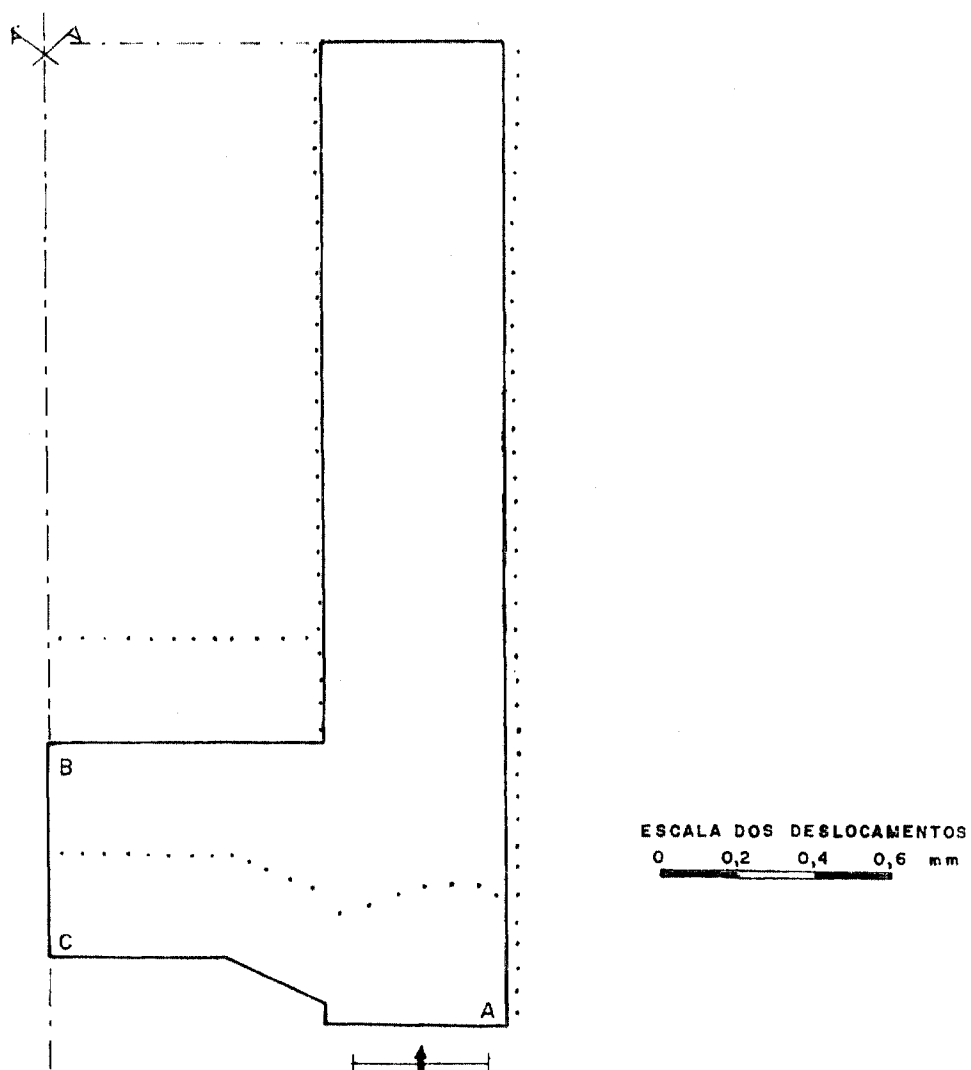
PROGRAMA	PONTOS			
	A	B	C	D
PV2-A	0,117	0,097	0,058	0,060
FEAST-1	0,113	0,093	0,058	0,059
AXITEN-3	0,112	0,092	0,048	0,048

FIGURA 6.21 - Efeito da Protensão dos Cabos de 4 ϕ Grupo - Comparação dos Deslocamentos- Unidade mm.



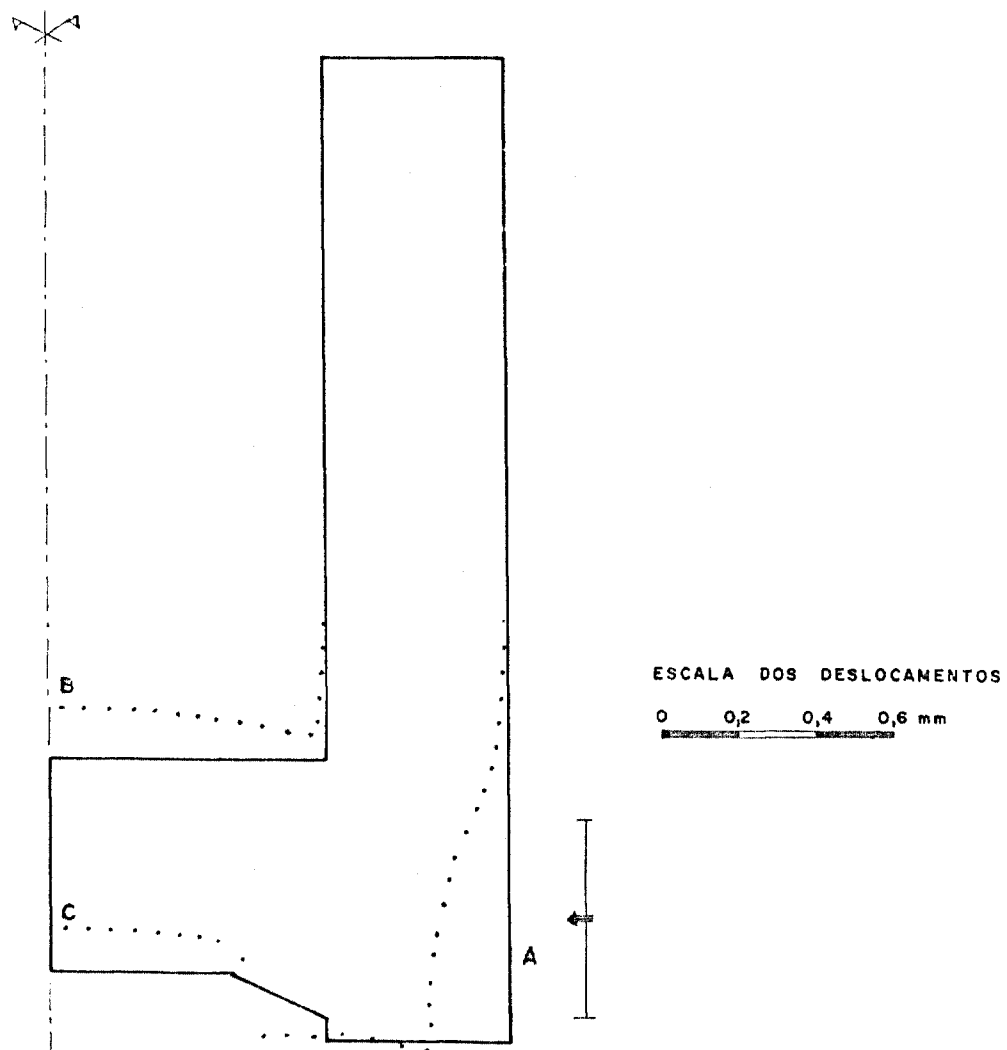
PROGRAMA	PONTOS			
	A	B	C	D
PV2-A	0,125	0,103	0,099	0,108
FEAST-1	0,121	0,100	0,097	0,106
AXITEN-3	0,120	0,112	0,100	0,114

FIGURA 6.22 - Efeito de Protensão dos Cabos de 5 \varnothing Grupo - Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm.



PROGRAMA	PONTOS		
	A	B	C
PV2-A	0,375	0,272	0,272
FEAST-1	0,378	0,262	0,262
AXITEN-3	0,344	0,240	0,240

FIGURA 6.23 - Efeito da Protensão dos Cabos Verticais - Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm.



PROGRAMA	PONTOS		
	A	B	C
PV2-A	0,214	0,136	0,113
FEAST-1	0,212	0,126	0,103
AXITEN-3	0,196	0,116	0,084

FIGURA 6.24 - Efeito da Protensão dos Cabos da Laje -
Comparação dos Deslocamentos - Unidade mm

Tabela 6.3. - Efeito da protensão dos cabos do 19 grupo - Tensões principais σ_1

Unidade: Nqf/cm^2 - Resultados do PV2-A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	-0,021	-0,021	-0,022	-0,024	-0,027	-0,031	-0,037	-0,044	-0,048	-0,054
5	-0,270	-0,270	-0,271	-0,272	-0,274	-0,276	-0,278	-0,281	-0,283	-0,285
6	-0,514	-0,514	-0,516	-0,518	-0,519	-0,521	-0,523	-0,524	-0,525	-0,526
7	-0,741	-0,740	-0,740	-0,738	-0,737	-0,735	-0,732	-0,730	-0,728	-0,726
8	-1,004	-1,003	-1,003	-1,004	-1,004	-1,002	-1,000	-0,998	-0,996	-0,994
9	-1,255	-1,255	-1,255	-1,258	-1,257	-1,255	-1,252	-1,249	-1,246	-1,244
10	-1,450	-1,451	-1,451	-1,451	-1,452	-1,452	-1,452	-1,452	-1,452	-1,452
11	-1,651	-1,651	-1,652	-1,651	-1,652	-1,652	-1,652	-1,652	-1,652	-1,652
12	-1,851	-1,851	-1,852	-1,851	-1,852	-1,851	-1,851	-1,851	-1,852	-1,852
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
1	C.C	C.C	0,352	0,355	0,330	0,204	0,280	0,255	0,244	0,0
2	C.C	C.C	0,230	0,218	0,187	0,132	0,161	0,157	0,142	0,0
3	-0,105	-0,105	-0,105	-0,105	-0,105	-0,105	-0,105	-0,105	-0,105	0,0
4	-0,445	-0,445	-0,445	-0,445	-0,445	-0,445	-0,445	-0,445	-0,445	0,0
5	-0,853	-0,852	-0,848	-0,840	-0,826	-0,812	-0,802	-0,794	-0,788	0,0
6	-1,100	-1,100	-1,097	-1,090	-1,081	-1,074	-1,068	-1,063	-1,059	0,0
7	-1,315	-1,315	-1,315	-1,315	-1,315	-1,315	-1,315	-1,315	-1,315	0,0
8	-1,543	-1,543	-1,543	-1,543	-1,543	-1,543	-1,543	-1,543	-1,543	0,0
9	-1,725	-1,725	-1,725	-1,725	-1,725	-1,725	-1,725	-1,725	-1,725	0,0
10	-1,885	-1,885	-1,885	-1,885	-1,885	-1,885	-1,885	-1,885	-1,885	0,0
11	-2,022	-2,022	-2,022	-2,022	-2,022	-2,022	-2,022	-2,022	-2,022	0,0
12	C.C	C.C	-1,370	-1,361	-1,346	-1,332	-1,321	-1,311	-1,301	0,0
13	C.C	C.C	-1,355	-1,346	-1,331	-1,317	-1,306	-1,296	-1,286	0,0
14	C.C	C.C	-1,341	-1,331	-1,316	-1,302	-1,291	-1,281	-1,271	0,0
15	C.C	C.C	-1,328	-1,318	-1,303	-1,289	-1,278	-1,268	-1,258	0,0
16	C.C	C.C	-1,315	-1,305	-1,290	-1,276	-1,265	-1,255	-1,245	0,0
17	C.C	C.C	-1,302	-1,292	-1,277	-1,263	-1,252	-1,242	-1,232	0,0
18	C.C	C.C	-1,289	-1,279	-1,264	-1,250	-1,239	-1,229	-1,219	0,0
19	C.C	C.C	-1,276	-1,266	-1,251	-1,237	-1,226	-1,216	-1,206	0,0
20	C.C	C.C	-1,263	-1,253	-1,238	-1,224	-1,213	-1,203	-1,193	0,0
21	C.C	C.C	-1,250	-1,240	-1,225	-1,211	-1,200	-1,190	-1,180	0,0
22	C.C	C.C	-1,237	-1,227	-1,212	-1,198	-1,187	-1,177	-1,167	0,0
23	C.C	C.C	-1,224	-1,214	-1,199	-1,185	-1,174	-1,164	-1,154	0,0
24	C.C	C.C	-1,211	-1,201	-1,186	-1,172	-1,161	-1,151	-1,141	0,0
25	C.C	C.C	-1,198	-1,188	-1,173	-1,159	-1,148	-1,138	-1,128	0,0
26	C.C	C.C	-1,185	-1,175	-1,160	-1,146	-1,135	-1,125	-1,115	0,0
27	C.C	C.C	-1,172	-1,162	-1,147	-1,133	-1,122	-1,112	-1,102	0,0
28	C.C	C.C	-1,159	-1,149	-1,134	-1,120	-1,109	-1,099	-1,089	0,0
29	C.C	C.C	-1,146	-1,136	-1,121	-1,107	-1,096	-1,086	-1,076	0,0
30	C.C	C.C	-1,133	-1,123	-1,108	-1,094	-1,083	-1,073	-1,063	0,0
31	C.C	C.C	-1,120	-1,110	-1,095	-1,081	-1,070	-1,060	-1,050	0,0
32	C.C	C.C	-1,107	-1,097	-1,082	-1,068	-1,057	-1,047	-1,037	0,0
33	C.C	C.C	-1,094	-1,084	-1,069	-1,055	-1,044	-1,034	-1,024	0,0
34	C.C	C.C	-1,081	-1,071	-1,056	-1,042	-1,031	-1,021	-1,011	0,0
35	C.C	C.C	-1,068	-1,058	-1,043	-1,029	-1,018	-1,008	-0,998	0,0
36	C.C	C.C	-1,055	-1,045	-1,030	-1,016	-1,005	-0,995	-0,985	0,0
37	C.C	C.C	-1,042	-1,032	-1,017	-1,003	-0,992	-0,982	-0,972	0,0
38	C.C	C.C	-1,029	-1,019	-1,004	-0,990	-0,979	-0,969	-0,959	0,0
39	C.C	C.C	-1,016	-1,006	-0,991	-0,977	-0,966	-0,956	-0,946	0,0
40	C.C	C.C	-1,003	-0,993	-0,978	-0,964	-0,953	-0,943	-0,933	0,0

Tabela 6.4. - Efeito da protensão dos cabos do 19 grupo - Tensões principais mínimas σ_{pl}

Unidade: Nqf/cm^2 - Resultados do PV2-A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	-0,021	-0,022	-0,024	-0,029	-0,037	-0,045	-0,066	-0,080	-0,095	-0,122
5	-0,270	-0,270	-0,272	-0,274	-0,278	-0,284	-0,293	-0,303	-0,315	-0,322
6	-0,514	-0,515	-0,515	-0,514	-0,512	-0,511	-0,505	-0,502	-0,500	-0,492
7	-0,741	-0,740	-0,738	-0,734	-0,749	-0,741	-0,730	-0,717	-0,704	-0,690
8	-1,004	-1,005	-1,002	-0,998	-0,991	-0,980	-0,966	-0,946	-0,924	-0,899
9	-1,255	-1,255	-1,257	-1,254	-1,249	-1,241	-1,229	-1,213	-1,188	-1,152
10	-1,450	-1,451	-1,451	-1,451	-1,451	-1,450	-1,448	-1,442	-1,431	-1,417
11	-1,651	-1,651	-1,651	-1,652	-1,651	-1,651	-1,651	-1,651	-1,651	-1,651
12	-1,851	-1,851	-1,852	-1,851	-1,852	-1,851	-1,851	-1,851	-1,852	-1,852
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
1	C.C	-0,001	-0,002	-0,001	-0,003	-0,005	-0,008	-0,010	-0,005	0,0
2	-0,002	-0,001	-0,004	-0,001	-0,003	-0,004	-0,002	-0,004	-0,006	0,0
3	-0,006	-0,001	-0,002	-0,004	-0,006	-0,005	-0,004	-0,004	-0,005	0,0
4	-0,010	-0,001	-0,005	-0,005	-0,008	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
5	-0,014	-0,001	-0,006	-0,006	-0,011	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
6	-0,018	-0,001	-0,007	-0,007	-0,012	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
7	-0,022	-0,001	-0,008	-0,008	-0,013	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
8	-0,026	-0,001	-0,009	-0,009	-0,014	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
9	-0,030	-0,001	-0,010	-0,010	-0,015	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
10	-0,034	-0,001	-0,011	-0,011	-0,016	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
11	-0,038	-0,001	-0,012	-0,012	-0,017	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
12	-0,042	-0,001	-0,013	-0,013	-0,018	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
13	-0,046	-0,001	-0,014	-0,014	-0,019	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
14	-0,050	-0,001	-0,015	-0,015	-0,020	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
15	-0,054	-0,001	-0,016	-0,016	-0,021	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
16	-0,058	-0,001	-0,017	-0,017	-0,022	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
17	-0,062	-0,001	-0,018	-0,018	-0,023	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
18	-0,066	-0,001	-0,019	-0,019	-0,024	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
19	-0,070	-0,001	-0,020	-0,020	-0,025	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
20	-0,074	-0,001	-0,021	-0,021	-0,026	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
21	-0,078	-0,001	-0,022	-0,022	-0,027	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
22	-0,082	-0,001	-0,023	-0,023	-0,028	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
23	-0,086	-0,001	-0,024	-0,024	-0,029	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
24	-0,090	-0,001	-0,025	-0,025	-0,030	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
25	-0,094	-0,001	-0,026	-0,026	-0,031	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
26	-0,098	-0,001	-0,027	-0,027	-0,032	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
27	-0,102	-0,001	-0,028	-0,028	-0,033	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
28	-0,106	-0,001	-0,029	-0,029	-0,034	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
29	-0,110	-0,001	-0,030	-0,030	-0,035	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
30	-0,114	-0,001	-0,031	-0,031	-0,036	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
31	-0,118	-0,001	-0,032	-0,032	-0,037	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
32	-0,122	-0,001	-0,033	-0,033	-0,038	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
33	-0,126	-0,001	-0,034	-0,034	-0,039	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
34	-0,130	-0,001	-0,035	-0,035	-0,040	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
35	-0,134	-0,001	-0,036	-0,036	-0,041	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
36	-0,138	-0,001	-0,037	-0,037	-0,042	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
37	-0,142	-0,001	-0,038	-0,038	-0,043	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
38	-0,146	-0,001	-0,039	-0,039	-0,044	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
39	-0,150	-0,001	-0,040	-0,040	-0,045	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0
40	-0,154	-0,001	-0,041	-0,041	-0,046	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,0

Tabela 6.9. - Efeito da protensão das cabos do 3º grupo - tensões principais σ_1

Unidade : Kgf/cm² - Resultados do PVE-A

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-6,541
4	-4,923	-4,927	-4,941	-4,962	-4,993	-5,043	-5,114	-5,203	-5,310
5	-2,465	-2,468	-2,481	-2,502	-2,533	-2,583	-2,654	-2,743	-2,850
6	-2,465	-2,468	-2,481	-2,502	-2,533	-2,583	-2,654	-2,743	-2,850
7	-1,064	-1,068	-1,081	-1,102	-1,133	-1,183	-1,254	-1,343	-1,450
8	0,194	0,198	0,209	0,220	0,231	0,242	0,253	0,264	0,275
9	1,457	1,460	1,471	1,482	1,493	1,504	1,515	1,526	1,537
10	2,580	2,583	2,594	2,605	2,616	2,627	2,638	2,649	2,660
11	3,570	3,573	3,584	3,595	3,606	3,617	3,628	3,639	3,650
12	4,552	4,555	4,566	4,577	4,588	4,599	4,610	4,621	4,632

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,0	0,0	-7,329	-6,675	-6,018	-5,359	-4,700	-4,040	0,0
2	0,0	-6,858	-6,213	-5,567	-4,921	-4,274	-3,628	-2,981	0,0
3	-6,191	-5,614	-5,037	-4,460	-3,883	-3,306	-2,729	-2,152	0,0
4	-4,733	-4,156	-3,579	-3,002	-2,425	-1,848	-1,271	-0,694	0,0
5	-1,214	-1,140	-1,065	-1,000	-0,935	-0,870	-0,805	-0,740	0,0
6	-2,322	-1,955	-1,588	-1,221	-0,854	-0,487	-0,120	0,247	0,0
7	-3,769	-3,178	-2,587	-2,000	-1,413	-0,826	-0,239	0,348	0,0
8	0,492	0,461	0,430	0,400	0,370	0,340	0,310	0,280	0,0
9	1,407	1,414	1,421	1,428	1,435	1,442	1,449	1,456	0,0
10	2,261	2,268	2,275	2,282	2,289	2,296	2,303	2,310	0,0
11	3,115	3,122	3,129	3,136	3,143	3,150	3,157	3,164	0,0
12	4,003	4,010	4,017	4,024	4,031	4,038	4,045	4,052	0,0
13	0,0	0,0	12,662	13,693	14,724	15,755	16,786	17,817	0,0
14	0,0	0,0	10,152	11,183	12,214	13,245	14,276	15,307	0,0
15	0,0	0,0	7,642	8,673	9,704	10,735	11,766	12,797	0,0
16	0,0	0,0	5,132	6,163	7,194	8,225	9,256	10,287	0,0
17	0,0	0,0	2,622	3,653	4,684	5,715	6,746	7,777	0,0
18	0,0	0,0	0,112	1,143	2,174	3,205	4,236	5,267	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 6.10. - Efeito da protensão dos cabos do 3º grupo - tensões principais mínimas σ_{p1}

Unidade : Kgf/cm² - Resultados do PVE-A

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,191	-1,227
4	-4,920	-4,925	-4,940	-4,960	-4,990	-5,040	-5,110	-5,200	-5,310
5	-2,464	-2,467	-2,480	-2,501	-2,532	-2,582	-2,653	-2,742	-2,850
6	-2,464	-2,467	-2,480	-2,501	-2,532	-2,582	-2,653	-2,742	-2,850
7	-1,063	-1,067	-1,080	-1,101	-1,132	-1,182	-1,253	-1,342	-1,450
8	0,193	0,197	0,208	0,219	0,230	0,241	0,252	0,263	0,274
9	1,456	1,459	1,470	1,481	1,492	1,503	1,514	1,525	1,536
10	2,579	2,582	2,593	2,604	2,615	2,626	2,637	2,648	2,659
11	3,569	3,572	3,583	3,594	3,605	3,616	3,627	3,638	3,649
12	4,551	4,554	4,565	4,576	4,587	4,598	4,609	4,620	4,631

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,0	-0,000	-0,148	-0,692	-0,624	-3,380	-2,175	-0,951	-0,704
2	-0,005	-0,520	-1,011	-1,725	-1,249	-1,133	-0,832	-1,531	-0,149
3	-2,160	-2,412	-2,712	-3,059	-1,813	-1,736	-1,859	-1,544	-0,535
4	-1,194	-1,195	-1,198	-1,201	-1,204	-1,207	-1,210	-1,213	-1,216
5	-1,103	-1,101	-1,103	-1,104	-1,105	-1,106	-1,107	-1,108	-1,109
6	-1,009	-1,011	-1,013	-1,014	-1,015	-1,016	-1,017	-1,018	-1,019
7	-1,009	-1,011	-1,013	-1,014	-1,015	-1,016	-1,017	-1,018	-1,019
8	-0,117	-1,067	-2,017	-2,967	-3,617	-4,267	-4,917	-5,567	-6,217
9	0,117	0,005	-1,115	-2,115	-3,115	-4,115	-5,115	-6,115	-7,115
10	1,115	1,115	0,115	-0,885	-1,885	-2,885	-3,885	-4,885	-5,885
11	0,792	1,441	1,441	1,441	1,441	1,441	1,441	1,441	1,441
12	-0,061	-1,144	1,144	3,117	0,329	-2,912	-5,014	-9,171	-12,774
13	0,0	-1,424	1,697	1,697	1,697	-1,590	-5,176	-9,762	-14,348
14	0,0	0,0	0,091	2,036	1,943	-0,837	-5,020	-10,164	-15,313
15	0,0	0,0	0,073	1,630	1,670	0,479	-4,171	-10,027	-15,471
16	0,0	0,0	0,053	1,214	1,134	-0,315	-3,622	-10,164	-15,375
17	0,0	0,0	0,052	1,200	0,025	-1,073	-3,777	-9,716	-15,533
18	0,0	0,0	0,050	0,374	-1,917	-4,018	-5,979	-8,000	-10,000
19	0,0	0,0	0,054	-1,799	-4,770	-8,233	-11,799	-15,991	-19,532
20	0,0	0,0	-4,798	-9,463	-14,398	-19,333	-24,268	-29,203	-34,138
21	0,0	0,0	-4,450	-10,394	-15,825	-21,256	-26,687	-32,118	-37,549
22	0,0	0,0	-12,810	-14,848	-16,617	-18,224	-19,731	-21,238	-22,745
23	0,0	0,0	-22,173	-22,054	-21,699	-21,084	-20,261	-19,333	-18,404
24	0,0	0,0	-35,623	-34,668	-33,229	-31,391	-29,134	-26,581	-23,931
25	0,0	0,0	-48,113	-46,655	-44,336	-41,169	-37,156	-32,299	-27,492
26	0,0	0,0	-59,265	-56,933	-53,742	-49,691	-44,779	-39,906	-35,073
27	0,0	0,0	-69,295	-65,905	-61,542	-56,211	-50,014	-43,057	-37,340
28	0,0	0,0	-78,062	-73,158	-66,771	-59,411	-51,291	-42,414	-33,000
29	0,0	0,0	-85,574	-79,274	-71,507	-62,276	-52,344	-41,564	-30,000
30	0,0	0,0	-91,848	-84,022	-74,368	-63,067	-52,300	-40,500	-27,000
31	0,0	0,0	-96,882	-88,112	-77,270	-64,921	-53,211	-41,411	-24,000
32	0,0	0,0	-100,690	-91,590	-80,000	-66,833	-54,133	-42,333	-21,000
33	0,0	0,0	-103,240	-94,440	-82,110	-68,800	-55,066	-43,266	-18,000
34	0,0	0,0	-104,560	-96,670	-83,500	-70,833	-56,000	-44,200	-15,000
35	0,0	0,0	-104,670	-98,290	-84,960	-72,833	-57,000	-45,133	-12,000
36	0,0	0,0	-103,560	-99,300	-86,490	-74,900	-58,000	-46,066	-9,000
37	0,0	0,0	-101,240	-99,710	-88,000	-77,000	-59,000	-47,000	-6,000
38	0,0	0,0	-97,710	-99,520	-89,500	-79,600	-60,000	-48,000	-3,000
39	0,0	0,0	-92,980	-98,730	-91,000	-82,300	-61,000	-49,000	0,000
40	0,0	0,0	-87,060	-97,340	-92,500	-85,100	-62,000	-50,000	0,000

Tabela 6.11. - Efeito da penetração dos cascos do 39 grupo - toneladas principais vizinhas p²
 Unidade : Kgf/cm² - Resultados do PV2-A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	C,0	C,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,000	C,000	C,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003
5	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,006	-0,006	-0,009	-0,010	-0,010
6	-0,100	-0,100	-0,100	-0,112	-0,110	-0,075	-0,065	-0,001	0,112	0,195
7	-0,143	-0,143	-0,154	-0,157	-0,145	-0,104	-0,116	0,101	0,161	1,214
8	0,144	0,205	0,229	0,266	0,313	0,362	0,401	0,411	0,650	1,345
9	1,457	1,466	1,465	1,515	1,555	1,601	1,608	1,607	1,650	1,684
10	2,297	2,298	2,293	2,303	2,318	2,361	2,361	2,371	2,769	2,707
11	3,510	3,503	3,545	3,529	3,504	3,600	3,606	3,676	3,541	3,774
12	4,552	4,511	4,502	4,440	4,370	4,273	4,164	4,055	3,968	3,994
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21	0,0	C,000	C,000	0,000	0,132	0,227	0,304	0,269	0,044	0,0
22	0,043	0,072	0,122	0,094	0,041	0,055	0,052	0,108	0,000	0,0
23	-0,199	C,000	C,024	1,108	1,164	1,067	0,993	0,450	0,114	0,0
24	0,070	1,142	1,008	1,032	1,776	1,520	1,100	0,592	0,119	0,0
25	1,110	1,942	2,668	2,621	2,451	2,321	1,407	0,708	0,115	0,0
26	1,173	2,641	3,773	3,817	3,106	2,582	1,708	0,759	0,119	0,0
27	2,272	2,274	4,126	4,319	3,916	3,659	1,607	0,457	0,106	0,0
28	2,500	2,484	5,162	5,375	4,723	3,555	2,109	0,496	0,102	0,0
29	1,723	4,065	6,716	6,679	2,584	1,977	2,117	0,900	0,093	0,0
30	3,501	5,741	5,149	8,100	6,374	4,273	2,343	0,984	0,077	0,0
31	4,569	4,011	12,643	4,498	6,674	4,256	2,211	0,759	0,094	0,0
32	4,537	8,101	17,644	9,725	6,429	3,087	1,634	0,637	0,075	0,0
33	0,0	1,424	15,527	10,753	5,091	1,102	1,405	0,454	0,096	0,0
34	0,0	0,0	13,029	11,005	5,009	2,159	0,935	0,248	0,077	0,0
35	0,0	0,0	18,579	12,006	6,359	1,119	0,502	0,065	-0,061	0,0
36	0,0	0,0	14,025	11,002	8,413	2,076	0,403	-0,306	-0,091	0,0
37	0,0	0,0	11,501	14,814	7,221	1,714	0,102	-0,124	-0,161	0,0
38	0,0	0,0	15,522	11,004	8,056	5,843	2,410	0,073	-0,159	0,0
39	0,0	0,0	12,114	10,575	10,729	3,660	4,073	0,449	-0,213	0,0
40	0,0	0,0	7,021	11,611	13,301	12,271	5,441	2,746	-0,156	0,0
41	0,0	0,0	4,001	12,602	16,537	16,739	11,371	4,577	0,214	0,0
42	0,0	0,0	6,054	15,997	20,143	24,316	24,118	12,910	2,249	0,0
43	0,0	0,0	4,000	19,770	25,797	27,090	27,626	23,546	9,140	0,0
44	0,0	0,0	4,262	16,506	27,739	36,509	42,126	42,027	24,421	0,0
45	0,0	0,0	4,652	17,150	30,419	42,604	54,002	66,162	75,541	0,0
46	0,0	0,0	4,951	17,020	31,526	45,419	54,575	69,501	74,444	0,0
47	0,0	0,0	5,052	17,896	31,050	46,793	57,698	70,074	74,542	0,0
48	0,0	0,0	5,136	18,034	31,415	46,976	63,759	70,415	74,676	0,0
49	0,0	0,0	5,058	18,509	33,172	47,274	60,172	70,417	75,072	0,0
50	0,0	0,0	4,841	18,071	33,075	45,509	56,970	67,685	75,641	0,0
51	0,0	0,0	4,827	19,101	34,472	44,179	47,501	49,714	70,114	0,0
52	0,0	0,0	5,302	16,072	27,022	31,711	33,494	21,515	4,712	0,0
53	0,0	0,0	7,027	13,643	25,467	29,298	25,077	10,973	0,788	0,0
54	0,0	0,0	13,230	14,745	21,432	19,768	13,946	5,170	0,011	0,0
55	0,0	0,0	20,126	19,163	18,717	15,376	9,173	2,115	-0,146	0,0
56	0,0	0,0	21,001	20,002	16,675	11,032	5,172	0,094	-0,169	0,0
57	0,0	0,0	32,346	21,030	19,021	14,033	1,456	0,107	-0,150	0,0
58	0,0	0,0	35,497	21,044	14,002	6,496	1,901	0,096	-0,145	0,0
59	0,0	0,0	33,469	21,946	12,971	4,157	0,964	-0,067	-0,121	0,0
60	0,0	0,0	30,430	24,420	14,500	2,370	0,409	-0,102	-0,112	0,0

Tabela 6.12. - Efeito da penetração dos cascos do 49 grupo - toneladas principais p²
 Unidade : Kgf/cm² - Resultados do PV2-A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	C,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-14,037
4	-0,710	-1,140	-4,740	-9,789	-9,026	-9,871	-9,916	-5,962	-10,212	-4,777
5	-3,403	-2,402	-5,410	-5,415	-5,410	-5,405	-5,405	-3,375	-5,303	-3,006
6	-1,061	-1,057	-1,056	-1,037	-1,017	-0,985	-0,949	-0,807	-0,653	-0,667
7	5,254	3,222	3,222	3,220	3,129	3,100	3,412	3,401	3,511	3,566
8	7,342	3,225	3,245	3,565	3,603	3,644	3,687	3,720	3,761	3,758
9	11,857	11,441	11,441	11,492	11,492	11,492	12,010	12,062	12,115	12,153
10	15,745	15,144	15,171	15,179	15,179	15,179	15,058	15,915	16,000	16,135
11	16,789	16,141	16,141	16,131	16,123	16,121	16,121	16,121	16,121	16,121
12	22,502	22,451	22,444	22,434	22,390	22,342	22,299	22,272	22,288	22,416
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21	0,0	C,0	-11,463	-15,911	-14,533	-13,203	-12,186	-11,276	-10,644	0,0
22	0,0	-11,441	-14,079	-12,835	-11,775	-10,839	-10,016	-9,307	-8,750	0,0
23	-13,044	-11,516	-10,765	-9,891	-9,191	-8,410	-7,850	-7,412	-7,045	0,0
24	-8,756	-8,092	-7,420	-6,900	-6,483	-6,125	-5,807	-5,504	-5,220	0,0
25	-4,512	-4,222	-3,572	-3,405	-3,117	-3,039	-3,016	-3,561	-3,505	0,0
26	-0,515	-0,444	-0,320	-0,262	-0,209	-0,148	-0,103	-0,042	-0,001	0,0
27	1,511	1,318	1,054	2,587	2,587	1,501	0,993	0,422	0,031	0,0
28	1,443	2,402	2,154	6,143	5,264	4,377	3,532	2,680	1,931	0,0
29	12,124	11,512	11,303	10,105	8,960	7,756	6,555	5,354	4,283	0,0
30	16,311	14,444	14,053	14,453	12,844	11,702	9,791	8,205	6,507	0,0
31	15,428	14,755	14,368	14,705	12,677	14,020	13,025	11,271	9,620	0,0
32	22,041	22,441	21,715	21,354	20,491	18,709	16,034	14,586	12,761	0,0
33	0,0	0,0	28,445	28,445	28,445	28,445	28,445	28,445	28,445	0,0
34	0,0	0,0	35,114	35,512	32,443	29,604	26,500	24,244	21,545	0,0
35	0,0	0,0	40,114	42,705	39,426	36,463	33,554	30,578	27,600	0,0
36	0,0	0,0	24,223	30,190	46,721	41,795	41,042	31,806	34,591	0,0
37	0,0	0,0	61,638	51,640	54,716	52,183	49,584	46,164	42,418	0,0
38	0,0	0,0	61,638	65,024	62,605	63,054	55,621	52,482	52,639	0,0
39	0,0	0,0	14,364	11,595	10,053	69,191	70,814	72,604	75,777	0,0
40	0,0	0,0	38,425	36,156	15,114	35,215	38,228	42,244	41,596	0,0
41	0,0	0,0	80,540	78,535	79,004	79,006	81,776	84,011	80,406	0,0
42	0,0	0,0	-80,610	78,632	78,072	79,118	81,742	84,003	80,406	0,0
43										
44										
45										
46										
47										
48										
49										
50										
51	0,0	C,0	26,458	26,460	75,515	76,066	78,246	82,195	87,546	0,0
52	0,0	C,0	15,223	32,267	70,629	70,214	71,110	73,794	74,809	0,0
53	0,0	C,0	70,214	26,535	84,071	62,338	60,086	58,151	53,266	0,0
54	0,0	C,0	67,111	25,062	56,124	54,072	51,402	48,122	44,071	0,0
55	0,0	C,0	57,155	22,809	49,309	49,000	43,123	35,797	30,449	0,0
56	0,0	C,0	20,440	45,827	42,178	38,900	35,000	32,000	28,000	0,0
57	0,0	C,0	43,525	25,075	35,514	32,193	25,489	24,105	24,312	0,0
58	0,0	C,0	36,321	32,580	29,278	26,100	23,649	21,167	19,004	0,0
59	0,0	C,0	36,447	26,442	23,305	20,791	18,169	16,166	14,322	0,0
60	0,0	C,0	24,470	21,184	18,390	16,032	13,911	11,559	10,322	0,0
61	0,0	C,0	15,112	16,570	14,154	12,051	10,447	8,445	6,984	0,0
62	0,0	C,0	15,112	12,642	10,508	8,665	6,479	5,441	4,164	0,0
63	0,0	C,0	11,545	5,371	7,449	5,759	4,321	3,465	1,833	0,0
64	0,0	C,0	14,240	6,021	4,949	3,493	2,168	0,562	-	

Tabela 6.15. - Efeito da protensão das barras do 5º grupo - tensões principais σ_1
 Unidade: Kgf/cm^2 - Resultados do PV2-A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	C.C	C.C	C.C	0,0	-0,264
2	-0,241	-0,241	-0,211	-0,178	-0,148	-0,118	-0,088	-0,058	-0,028	-0,114
3	0,435	0,435	0,395	0,352	0,310	0,268	0,226	0,184	0,142	0,214
4	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330
5	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000
6	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
7	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
8	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
9	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000
10	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000
11	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000
12	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
11	C.C	C.C	-20,000	-15,000	-10,000	-5,000	-10,000	-15,000	-20,000	C.C
12	C.C	-10,000	-15,000	-15,000	-15,000	-15,000	-15,000	-15,000	-15,000	C.C
13	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	-10,000	C.C
14	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
15	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
16	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
17	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
18	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
19	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
20	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
21	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
22	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
23	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
24	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
25	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
26	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
27	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
28	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
29	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
30	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
31	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
32	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
33	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
34	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
35	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
36	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
37	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
38	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
39	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C
40	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	C.C

Tabela 6.16. - Efeito da protensão das barras do 5º grupo - Tensões principais mínimas σ_2
 Unidade: Kgf/cm^2 - Resultados do PV2-A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C.C	C.C	C.C	C.C	C.C	C.C	C.C	C.C	C.C	-0,184
2	-0,241	-0,241	-0,215	-0,182	-0,150	-0,118	-0,086	-0,054	-0,022	-0,114
3	0,435	0,435	0,398	0,365	0,332	0,299	0,266	0,233	0,200	0,214
4	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330	15,330
5	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000	25,000
6	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
7	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
8	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
9	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000	70,000
10	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000
11	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000
12	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
11	C.C	-0,245	-1,265	-2,516	-3,517	-4,253	-4,825	-5,244	-5,524	-0,244
12	-0,245	-1,237	-2,143	-2,815	-3,283	-3,600	-3,800	-3,900	-3,961	-1,461
13	-1,265	-1,141	-0,860	-0,516	-0,122	0,210	0,360	0,430	0,460	-0,234
14	0,245	0,194	0,142	0,110	0,088	0,070	0,058	0,050	0,044	0,214
15	0,245	0,252	0,268	0,281	0,292	0,300	0,306	0,310	0,314	0,316
16	0,245	0,262	0,275	0,285	0,292	0,298	0,302	0,305	0,308	0,310
17	0,245	0,265	0,280	0,290	0,296	0,300	0,303	0,305	0,308	0,310
18	0,245	0,268	0,282	0,290	0,295	0,298	0,300	0,302	0,304	0,306
19	0,245	0,270	0,284	0,291	0,296	0,299	0,301	0,303	0,305	0,307
20	0,245	0,272	0,286	0,293	0,298	0,301	0,303	0,305	0,307	0,309
21	0,245	0,274	0,288	0,295	0,300	0,303	0,305	0,307	0,309	0,311
22	0,245	0,275	0,289	0,296	0,301	0,304	0,306	0,308	0,310	0,312
23	0,245	0,276	0,290	0,297	0,302	0,305	0,307	0,309	0,311	0,313
24	0,245	0,277	0,291	0,298	0,303	0,306	0,308	0,310	0,312	0,314
25	0,245	0,278	0,292	0,299	0,304	0,307	0,309	0,311	0,313	0,315
26	0,245	0,279	0,293	0,300	0,305	0,308	0,310	0,312	0,314	0,316
27	0,245	0,280	0,294	0,301	0,306	0,309	0,311	0,313	0,315	0,317
28	0,245	0,281	0,295	0,302	0,307	0,310	0,312	0,314	0,316	0,318
29	0,245	0,282	0,296	0,303	0,308	0,311	0,313	0,315	0,317	0,319
30	0,245	0,283	0,297	0,304	0,309	0,312	0,314	0,316	0,318	0,320
31	0,245	0,284	0,298	0,305	0,310	0,313	0,315	0,317	0,319	0,321
32	0,245	0,285	0,299	0,306	0,311	0,314	0,316	0,318	0,320	0,322
33	0,245	0,286	0,300	0,307	0,312	0,315	0,317	0,319	0,321	0,323
34	0,245	0,287	0,301	0,308	0,313	0,316	0,318	0,320	0,322	0,324
35	0,245	0,288	0,302	0,309	0,314	0,317	0,319	0,321	0,323	0,325
36	0,245	0,289	0,303	0,310	0,315	0,318	0,320	0,322	0,324	0,326
37	0,245	0,290	0,304	0,311	0,316	0,319	0,321	0,323	0,325	0,327
38	0,245	0,291	0,305	0,312	0,317	0,320	0,322	0,324	0,326	0,328
39	0,245	0,292	0,306	0,313	0,318	0,321	0,323	0,325	0,327	0,329
40	0,245	0,293	0,307	0,314	0,319	0,322	0,324	0,326	0,328	0,330

Tabela 6.19. - Efeito da protensão das cabos verticais - tensões principais mínimas σ_{pl}

Unidade : Kgf/cm² - Resultados do PV2-A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	C.O	C.O	C.O	J.O	J.O	J.O	J.O	C.O	-2.118	-8.151
4	-11.208	-11.184	-11.168	-12.812	-11.819	-14.850	-16.785	-18.180	-23.066	-23.211
5	-5.627	-5.716	-5.805	-10.224	-10.726	-11.228	-12.072	-12.816	-18.756	-18.814
6	-2.747	-2.776	-2.805	-10.668	-11.170	-11.672	-12.316	-12.816	-18.756	-18.814
7	-2.818	-2.847	-2.876	-11.110	-11.612	-12.114	-12.858	-13.358	-19.298	-19.356
8	-4.244	-4.273	-4.302	-13.552	-14.054	-14.556	-15.300	-15.800	-21.740	-21.798
9	-2.670	-2.699	-2.728	-11.592	-12.094	-12.596	-13.340	-13.840	-19.780	-19.838
10	-1.772	-1.801	-1.830	-10.132	-10.634	-11.136	-11.880	-12.380	-18.320	-18.378
11	-0.745	-0.774	-0.803	-8.672	-9.174	-9.676	-10.420	-10.920	-16.860	-16.918
12	-0.004	-0.033	-0.062	-0.905	-1.407	-1.909	-2.653	-3.153	-9.093	-9.151
13	C.O	-1.526	-3.333	-11.175	50.985	59.509	56.659	45.236	-5.674	0.0
14	-1.932	-6.211	-5.009	6.419	-2.143	7.002	6.072	-8.701	-7.381	0.0
15	-11.551	-11.613	0.0	-10.759	-10.100	-12.130	-13.064	-15.104	-16.038	0.0
16	-13.350	-5.834	-10.396	-13.122	-14.026	-14.930	-14.937	-12.540	-2.715	0.0
17	-7.267	-3.678	-10.074	-13.017	-17.433	-17.217	-14.140	-8.154	-1.609	0.0
18	-2.807	-7.227	-8.667	-12.220	-14.004	-11.975	-10.874	-5.762	-0.715	0.0
19	-0.111	-2.107	-1.000	-10.550	-11.337	-10.013	-7.376	-3.770	-0.715	0.0
20	1.244	-1.672	8.426	-9.241	-9.020	-8.382	-5.244	-2.461	-0.534	0.0
21	4.440	-1.161	-0.076	-0.313	-7.466	-6.220	-3.486	-1.764	-0.424	0.0
22	0.794	-2.172	-1.785	-6.714	-5.522	-4.100	-2.682	-1.244	-0.103	0.0
23	-2.000	-8.000	-7.000	-3.325	-2.605	-2.100	-1.536	-0.732	-0.214	0.0
24	-14.998	-14.141	5.886	3.507	1.013	-0.127	-0.496	-0.308	-0.132	0.0
25	0.0	-4.034	0.545	8.442	3.471	1.119	0.331	-0.058	-0.050	0.0
26	0.0	C.O	C.O	0.115	2.115	1.297	0.266	0.105	-0.026	0.0
27	0.0	C.O	C.O	1.465	1.423	1.239	0.614	0.125	-0.017	0.0
28	0.0	C.O	C.O	0.177	0.541	1.157	0.433	0.060	-0.017	0.0
29	0.0	C.O	C.O	0.224	0.720	0.225	0.272	0.231	-0.022	0.0
30	0.0	C.O	C.O	0.441	0.332	0.352	0.152	-0.205	-0.024	0.0
31	0.0	C.O	C.O	0.116	0.017	0.022	0.052	-0.314	-0.022	0.0
32	0.0	C.O	C.O	0.223	0.442	0.154	0.049	-0.021	-0.014	0.0
33	0.0	C.O	C.O	0.190	0.190	0.116	0.713	-0.014	-0.014	0.0
34	0.0	C.O	C.O	0.108	0.124	0.093	0.027	-0.014	-0.011	0.0
35	0.0	C.O	C.O	0.137	0.126	0.071	0.025	-0.002	-0.007	0.0
36	0.0	C.O	C.O	0.110	0.102	0.065	0.014	-0.002	-0.004	0.0
37	0.0	C.O	C.O	0.087	0.087	0.047	0.023	0.002	-0.002	0.0
38	0.0	C.O	C.O	0.067	0.065	0.049	0.072	0.009	0.009	0.0
39	0.0	C.O	C.O	0.044	0.044	0.030	0.030	0.007	0.002	0.0
40	0.0	C.O	C.O	0.034	0.036	0.020	0.018	0.006	0.003	0.0
41	0.0	C.O	C.O	0.022	0.028	0.011	0.010	0.010	0.004	0.0
42	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.011	0.010	0.003	0.0
43	0.0	C.O	C.O	-0.004	-0.002	-0.002	0.006	0.010	0.003	0.0
44	0.0	C.O	C.O	-0.004	-0.001	-0.001	0.006	0.010	0.003	0.0
45	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.003	0.0
46	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.003	0.0
47	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.003	0.0
48	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.003	0.0
49	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.003	0.0
50	0.0	C.O	C.O	-0.003	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.003	0.0

Tabela 6.20. - Efeito da protensão dos cabos verticais - tensões principais máximas σ_{p2}

Unidade : Kgf/cm² - Resultados do PV2-A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0.0	C.O	C.O	J.O	0.0	0.0	0.0	0.0	2.118	0.705
4	0.000	C.O	C.O	0.022	0.046	0.085	0.143	0.238	4.057	-4.724
5	-0.304	-1.121	-0.350	-0.658	-0.409	-0.496	-0.495	-0.353	2.034	-2.079
6	-1.220	-1.304	-1.453	-1.621	-1.712	-1.621	-1.155	-0.994	0.102	1.679
7	-1.818	-1.815	-2.179	-2.608	-2.682	-2.137	-1.511	-0.823	0.217	4.854
8	-1.816	-2.077	-2.382	-2.739	-2.384	-1.416	-0.300	0.244	2.194	5.884
9	-1.251	-1.531	-1.245	-1.265	-0.692	0.127	1.102	2.170	1.250	5.224
10	-0.806	-0.781	-0.541	-0.206	0.252	0.936	1.493	2.182	2.915	3.424
11	-0.219	-0.184	C.O	0.257	0.504	0.785	1.000	1.355	1.252	1.784
12	0.374	0.445	0.250	0.237	0.241	0.264	0.207	0.293	3.267	0.151
13	0.0	1.431	0.003	12.518	150.611	150.059	158.025	155.040	16.602	0.0
14	1.172	1.450	7.442	50.336	133.437	151.319	151.796	134.835	37.027	0.0
15	-1.850	2.611	25.516	64.777	110.503	137.427	139.515	120.025	11.337	0.0
16	3.046	14.181	37.500	65.906	109.016	122.901	125.012	111.051	11.481	0.0
17	7.224	24.562	44.513	70.761	92.720	110.511	114.726	110.405	17.021	0.0
18	11.841	27.527	47.878	70.251	89.831	102.524	102.309	104.644	12.103	0.0
19	15.962	30.422	50.045	70.149	86.005	97.366	104.273	104.164	14.934	0.0
20	14.156	31.582	52.386	71.239	83.979	93.471	102.405	100.303	14.814	0.0
21	14.022	32.742	54.815	72.036	82.036	94.444	100.520	102.580	13.016	0.0
22	10.579	31.822	53.433	72.315	82.603	94.241	99.289	100.311	12.438	0.0
23	7.111	30.902	52.050	72.691	83.171	94.037	99.076	101.132	10.850	0.0
24	4.530	30.022	50.668	73.067	83.740	93.824	98.863	102.135	10.290	0.0
25	C.O	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
26	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
27	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
28	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
29	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
30	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
31	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
32	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
33	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
34	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
35	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
36	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
37	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
38	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
39	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0
40	0.0	30.000	50.000	73.000	83.000	93.000	97.000	100.000	100.000	0.0

Tabela 6.21. - Efeito da protensão dos cabos da laje - torções principais σ
 Unidade: Kgf/cm^2 - Resultados do PV2-A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	187,273
4	159,115	159,115	159,221	159,225	159,240	159,243	160,211	161,211	161,793	167,263
5	143,510	143,510	143,556	143,570	143,590	143,590	144,625	145,119	145,765	143,772
6	127,612	127,612	127,670	127,725	127,789	127,835	127,875	127,875	127,552	125,119
7	111,885	111,885	111,955	112,026	112,098	112,158	112,199	112,199	112,057	109,812
8	95,189	95,189	95,273	95,351	95,430	95,507	95,581	95,651	95,706	93,612
9	78,226	78,226	78,323	78,408	78,495	78,581	78,658	78,731	78,792	76,756
10	62,448	62,448	62,556	62,673	62,776	62,876	62,971	63,061	63,146	61,294
11	48,926	48,926	49,046	49,166	49,279	49,385	49,485	49,580	49,670	47,953
12	35,243	35,243	35,371	35,497	35,622	35,745	35,865	35,981	36,093	34,433
13	0,0	0,0	111,628	109,108	107,607	106,870	106,819	107,575	107,717	0,0
14	0,0	180,255	171,150	162,879	157,462	154,617	152,837	151,825	151,267	0,0
15	175,050	170,158	164,126	159,223	155,113	151,553	148,290	145,267	142,197	0,0
16	157,117	151,272	144,261	137,820	131,821	126,233	120,979	116,043	111,427	0,0
17	132,428	124,588	116,130	107,555	100,459	93,774	87,546	81,711	76,219	0,0
18	112,422	102,400	92,958	84,759	77,459	70,851	64,686	58,914	53,479	0,0
19	107,212	105,551	103,878	102,281	100,646	100,015	100,742	101,677	102,712	0,0
20	52,227	52,225	51,443	50,711	50,130	49,636	49,209	48,841	48,519	0,0
21	28,552	28,551	28,175	27,875	27,630	27,430	27,270	27,141	27,041	0,0
22	14,191	14,187	14,254	14,320	14,379	14,435	14,481	14,521	14,551	0,0
23	53,172	55,505	57,613	59,375	60,707	61,550	61,811	62,436	62,981	0,0
24	60,007	64,328	68,402	72,087	75,333	78,111	80,406	82,211	83,541	0,0
25	0,0	0,0	43,055	36,786	31,655	27,231	23,785	20,311	16,821	0,0
26	0,0	0,0	21,162	17,093	14,207	11,550	9,194	7,141	5,311	0,0
27	0,0	0,0	23,858	20,412	17,072	13,769	10,592	7,647	5,011	0,0
28	0,0	0,0	17,472	14,220	11,253	8,395	5,697	3,297	1,167	0,0
29	0,0	0,0	11,548	9,121	6,602	4,235	1,970	-0,112	-1,788	0,0
30	0,0	0,0	7,102	4,872	2,827	0,917	-0,921	-2,839	-5,127	0,0
31	0,0	0,0	3,282	1,499	-0,127	-1,582	-2,917	-4,137	-5,122	0,0
32	0,0	0,0	0,204	-1,054	-2,285	-3,314	-4,139	-4,741	-5,092	0,0
33	0,0	0,0	-1,919	-2,079	-3,133	-4,039	-4,759	-5,291	-5,641	0,0
34	0,0	0,0	-3,157	-3,162	-4,189	-5,001	-5,597	-6,026	-6,321	0,0
35	0,0	0,0	-4,691	-5,019	-5,380	-5,712	-6,018	-6,308	-6,570	0,0
36	0,0	0,0	-6,351	-6,924	-7,403	-7,794	-8,094	-8,333	-8,531	0,0
37	0,0	0,0	-8,174	-8,967	-9,704	-10,287	-10,717	-11,012	-11,211	0,0
38	0,0	0,0	-9,911	-10,950	-11,871	-12,642	-13,269	-13,791	-14,211	0,0
39	0,0	0,0	-11,528	-12,857	-14,000	-14,949	-15,699	-16,291	-16,771	0,0
40	0,0	0,0	-13,028	-14,633	-16,063	-16,983	-17,699	-18,261	-18,711	0,0
41	0,0	0,0	-14,435	-16,311	-17,464	-18,375	-19,031	-19,541	-20,011	0,0
42	0,0	0,0	-15,781	-17,933	-19,311	-20,000	-20,451	-20,791	-21,111	0,0
43	0,0	0,0	-17,011	-19,386	-20,997	-21,553	-21,911	-22,191	-22,451	0,0
44	0,0	0,0	-18,159	-20,901	-22,310	-22,730	-22,988	-23,188	-23,331	0,0
45	0,0	0,0	-19,201	-22,458	-23,483	-23,969	-24,239	-24,454	-24,611	0,0
46	0,0	0,0	-20,133	-23,884	-24,898	-25,470	-25,856	-26,171	-26,431	0,0
47	0,0	0,0	-20,966	-25,129	-26,072	-26,722	-27,189	-27,579	-27,911	0,0
48	0,0	0,0	-21,624	-26,197	-27,006	-27,770	-28,256	-28,571	-28,831	0,0
49	0,0	0,0	-22,151	-27,093	-27,783	-28,663	-29,171	-29,421	-29,611	0,0
50	0,0	0,0	-22,567	-27,866	-28,441	-29,411	-29,931	-30,211	-30,451	0,0
51	0,0	0,0	-22,887	-28,536	-29,112	-30,171	-30,711	-31,011	-31,271	0,0
52	0,0	0,0	-23,121	-29,111	-29,777	-30,921	-31,481	-31,851	-32,131	0,0
53	0,0	0,0	-23,271	-29,591	-30,247	-31,681	-32,261	-32,551	-32,751	0,0
54	0,0	0,0	-23,341	-29,976	-30,522	-32,441	-32,981	-33,281	-33,491	0,0
55	0,0	0,0	-23,331	-30,266	-30,797	-33,211	-33,771	-34,081	-34,301	0,0
56	0,0	0,0	-23,241	-30,466	-31,072	-33,981	-34,561	-34,881	-35,111	0,0
57	0,0	0,0	-23,071	-30,576	-31,347	-34,751	-35,351	-35,681	-35,921	0,0
58	0,0	0,0	-22,821	-30,596	-31,622	-35,521	-36,141	-36,481	-36,731	0,0
59	0,0	0,0	-22,491	-30,526	-31,897	-36,291	-36,931	-37,281	-37,541	0,0
60	0,0	0,0	-22,087	-30,366	-32,172	-37,041	-37,691	-38,051	-38,321	0,0

Tabela 6.22. - Efeito da protensão dos cabos da laje - torções principais mínimas σ
 Unidade: Kgf/cm^2 - Resultados do PV2-A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-9,846
4	-0,000	-0,001	0,0	-0,000	-0,001	-0,007	-0,030	-0,125	21,306	26,394
5	0,010	0,072	0,220	0,514	1,005	2,189	4,352	8,942	21,377	23,586
6	0,147	0,300	0,450	1,301	2,444	4,309	7,218	11,505	17,098	16,460
7	0,249	0,510	0,670	1,790	3,117	5,000	7,401	10,294	12,626	11,994
8	0,336	0,544	0,655	1,750	2,805	4,359	6,053	7,687	8,425	8,636
9	0,231	0,386	0,713	1,247	1,927	2,910	3,861	4,712	5,351	5,818
10	0,040	0,175	0,353	0,635	1,025	1,477	1,907	2,281	2,606	3,236
11	0,013	0,045	0,111	0,214	0,354	0,514	0,645	0,748	0,824	1,143
12	-0,000	0,000	-0,000	-0,000	-0,002	-0,005	-0,012	-0,024	-0,044	-0,085
13	0,0	0,0	11,628	109,108	107,607	106,870	106,819	107,575	107,717	0,0
14	0,0	180,255	171,150	162,879	157,462	154,617	152,837	151,825	151,267	0,0
15	175,050	170,158	164,126	159,223	155,113	151,553	148,290	145,267	142,197	0,0
16	157,117	151,272	144,261	137,820	131,821	126,233	120,979	116,043	111,427	0,0
17	132,428	124,588	116,130	107,555	100,459	93,774	87,546	81,711	76,219	0,0
18	112,422	102,400	92,958	84,759	77,459	70,851	64,686	58,914	53,479	0,0
19	107,212	105,551	103,878	102,281	100,646	100,015	100,742	101,677	102,712	0,0
20	52,227	52,225	51,443	50,711	50,130	49,636	49,209	48,841	48,519	0,0
21	28,552	28,551	28,175	27,875	27,630	27,430	27,270	27,141	27,041	0,0
22	14,191	14,187	14,254	14,320	14,379	14,435	14,481	14,521	14,551	0,0
23	53,172	55,505	57,613	59,375	60,707	61,550	61,811	62,436	62,981	0,0
24	60,007	64,328	68,402	72,087	75,333	78,111	80,406	82,211	83,541	0,0
25	0,0	0,0	43,055	36,786	31,655	27,231	23,785	20,311	16,821	0,0
26	0,0	0,0	21,162	17,093	14,207	11,550	9,194	7,141	5,311	0,0
27	0,0	0,0	23,858	20,412	17,072	13,769	10,592	7,647	5,011	0,0
28	0,0	0,0	17,472	14,220	11,253	8,395	5,697	3,297	1,167	0,0
29	0,0	0,0	11,548	9,121	6,602	4,235	1,970	-0,112	-1,788	0,0
30	0,0	0,0	7,102	4,872	2,827	0,917	-0,921	-2,839	-5,127	0,0
31	0,0	0,0	3,282	1,499	-0,127	-1,582	-2,917	-4,137	-5,122	0,0
32	0,0	0,0	0,204	-1,054	-2,285	-3,314	-4,139	-4,741	-5,092	0,0
33	0,0	0,0	-1,919	-2,079	-3,133	-4,039	-4,759	-5,291	-5,641	0,0
34	0,0	0,0	-3,157	-3,162	-4,189	-5,001	-5,597	-6,026	-6,321	0,0
35	0,0	0,0	-4,691	-5,019	-5,380	-5,712	-6,018	-6,308	-6,570	0,0
36	0,0	0,0	-6,351	-6,924	-7,403	-7,794	-8,094	-8,333	-8,531	0,0
37	0,0	0,0	-8,174	-8,967	-9,704	-10,287	-10,717	-11,012	-11,211	0,0
38	0,0	0,0	-9,911	-10,950	-11,871	-12,642	-13,269	-13,791	-14,211	0,0
39	0,0	0,0	-11,528	-12,857	-14,000	-14,949	-15,699	-16,291	-16,771	0,0
40	0,0	0,0	-13,028	-14,633	-16,063	-16,983	-17,699	-18,261	-18,711	0,0
41	0,0	0,0	-14,435	-16,311	-17,464	-18,375	-19,031	-19,541	-20,011	0,0
42	0,0	0,0	-15,781	-17,933	-19,311	-20,000	-20,451	-20,791	-21,111	0,0
43	0,0	0,0	-17,011	-19,386	-20,997	-21,553	-21,911	-22,191	-22,451	0,0
44	0,0	0,0	-18,159	-20,901	-22,310	-22,730	-22,988	-23,188	-23,331	0,0
45	0,0	0,0	-19,201	-22,458	-23,483	-23,969	-24,239	-24,454	-24,611	0,0
46	0,0	0,0	-20,133	-23,884	-24,898	-25,470	-25,856	-26,171	-26,431	0,0
47	0,0	0,0	-20,966	-25,129	-26,072	-26,722	-27,189	-27,579	-27,911	0,0
48	0,0	0,0	-21,624	-26,197	-27,006	-27,770	-28,256	-28,571	-28,831	

Tabela 6.23. - Efeito da protensão dos cabos da laje - tensão principal máxima σ_2
 Unidade: Kgf/cm^2 - Resultados do PV2 - A.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,446	41,131
4	154,185	154,188	154,730	154,376	154,897	154,926	161,140	157,578	179,113	170,650
5	127,612	127,621	127,628	127,595	127,192	126,891	144,951	144,498	139,692	132,573
6	111,415	111,455	111,165	111,144	110,669	104,791	104,300	104,413	104,091	102,419
7	95,184	95,152	95,052	94,837	94,429	93,777	92,905	91,913	91,026	90,613
8	78,256	78,244	78,215	78,148	78,029	77,872	77,738	77,726	77,959	78,457
9	62,648	62,630	62,722	62,816	62,905	63,276	63,742	64,180	64,611	64,223
10	49,926	49,959	49,040	49,209	49,527	50,061	50,811	52,781	53,830	54,568
11	35,363	35,370	35,409	35,537	35,841	36,419	37,355	38,740	40,787	41,981
12										
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,0	2,224	15,105	39,780	57,077	54,731	56,795	30,832	9,116	0,0
2	6,149	10,131	41,124	67,185	76,297	80,120	87,617	174,739	125,457	0,0
3	90,119	110,527	54,446	53,897	46,155	107,171	111,222	172,195	174,460	0,0
4	135,292	113,041	110,550	109,944	111,015	116,743	121,079	134,974	130,202	0,0
5	124,230	117,941	114,432	114,975	113,073	123,723	127,788	135,763	137,619	0,0
6	114,327	111,495	111,784	113,169	117,313	122,782	127,936	130,917	130,691	0,0
7	102,404	101,443	107,152	105,478	110,777	117,647	124,194	129,761	130,458	0,0
8	50,499	45,752	49,048	49,129	49,194	106,523	115,196	126,179	129,597	0,0
9	70,567	77,072	74,946	74,110	82,461	84,343	95,965	104,757	127,177	0,0
10	68,633	67,115	67,611	66,177	65,532	65,502	61,155	57,616	4,693	0,0
11	67,120	67,145	58,951	53,689	59,448	45,279	35,238	16,730	2,245	0,0
12	49,073	40,545	45,930	44,449	35,776	28,677	17,778	4,211	0,647	0,0
13	0,0	5,272	44,704	33,016	21,022	14,516	6,678	1,153	0,161	0,0
14	0,0	0,0	43,434	34,027	21,704	9,162	3,259	0,702	0,064	0,0
15	0,0	0,0	42,551	32,559	21,115	9,455	3,138	0,709	0,034	0,0
16	0,0	0,0	41,416	30,511	19,739	9,687	3,377	0,857	0,064	0,0
17	0,0	0,0	34,371	23,375	10,352	9,392	3,090	1,099	0,194	0,0
18	0,0	0,0	31,447	20,060	16,953	7,672	1,791	1,141	0,144	0,0
19	0,0	0,0	32,042	21,591	15,534	6,722	3,422	1,294	0,174	0,0
20	0,0	0,0	29,104	21,126	14,295	6,109	3,952	1,354	0,199	0,0
21	0,0	0,0	25,450	18,767	17,494	7,075	3,977	1,365	0,211	0,0
22	0,0	0,0	21,524	16,432	11,582	7,277	3,777	1,397	0,215	0,0
23	0,0	0,0	18,622	14,279	10,271	6,684	3,673	1,363	0,213	0,0
24	0,0	0,0	18,955	12,176	9,046	6,759	3,393	0,773	0,174	0,0
25	0,0	0,0	12,669	10,294	7,870	5,451	3,162	1,274	0,233	0,0
26	0,0	0,0	10,449	8,596	6,770	4,805	2,923	1,217	0,193	0,0
27	0,0	0,0	8,230	7,045	5,740	4,281	2,458	1,174	0,195	0,0
28	0,0	0,0	6,447	5,757	4,891	3,760	2,464	1,139	0,165	0,0
29	0,0	0,0	4,525	4,604	4,002	3,279	2,259	1,125	0,145	0,0
30	0,0	0,0	3,565	3,598	3,365	2,842	2,080	1,151	0,244	0,0
31	0,0	0,0	2,359	2,709	2,729	2,447	1,926	1,210	0,474	0,0
32	0,0	0,0	1,419	1,591	1,196	1,101	1,002	1,361	1,036	0,0
33	0,0	0,0	7,712	1,625	1,298	1,028	1,711	1,589	1,517	0,0
34	0,0	0,0	0,258	0,964	1,393	1,599	1,668	1,738	1,987	0,0
35	0,0	0,0	0,000	0,599	1,099	1,410	1,647	1,319	2,347	0,0
36	0,0	0,0	-0,056	0,316	0,910	1,261	1,625	2,195	2,626	0,0
37	0,0	0,0	-0,088	0,111	0,636	1,158	1,655	2,724	2,832	0,0
38	0,0	0,0	-0,071	-0,027	0,479	1,067	1,667	2,317	2,972	0,0
39	0,0	0,0	-0,071	-0,109	0,362	1,019	1,679	2,198	3,060	0,0
40	0,0	0,0	-0,070	-0,146	0,295	0,994	1,685	2,407	3,193	0,0

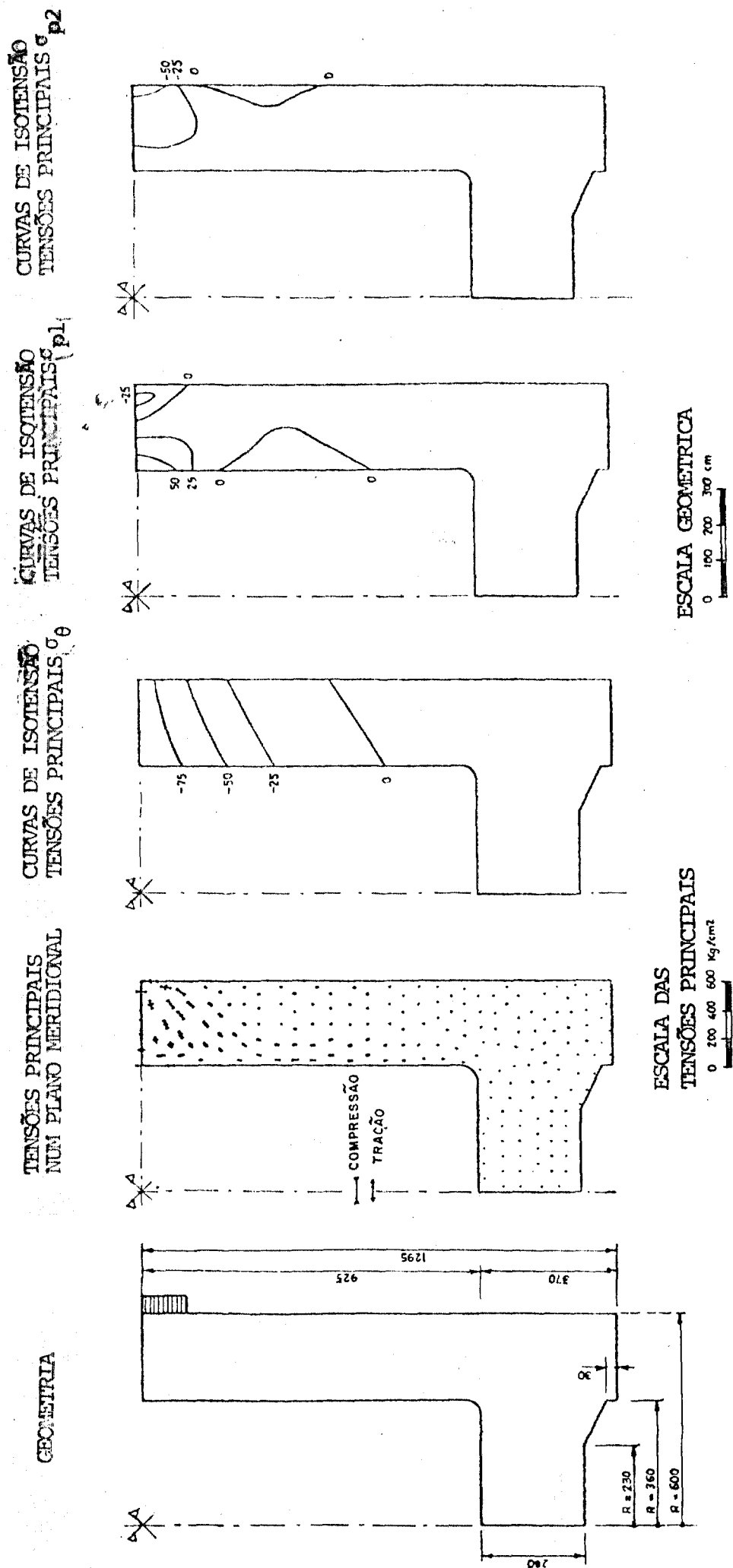


FIGURA 6.25- Efeito da Protensão dos Cabos do 1º Grupo - Estado Triaxial de Tensões .

CURVAS DE ISOTENSÃO
TENSÕES PRINCIPAIS σ_{p2}

CURVAS DE ISOTENSÃO
TENSÕES PRINCIPAIS σ_{p1}

CURVAS DE ISOTENSÃO
TENSÕES PRINCIPAIS σ_{θ}

TENSÕES PRINCIPAIS
NUM PLANO MERIDIONAL

GEOMETRIA

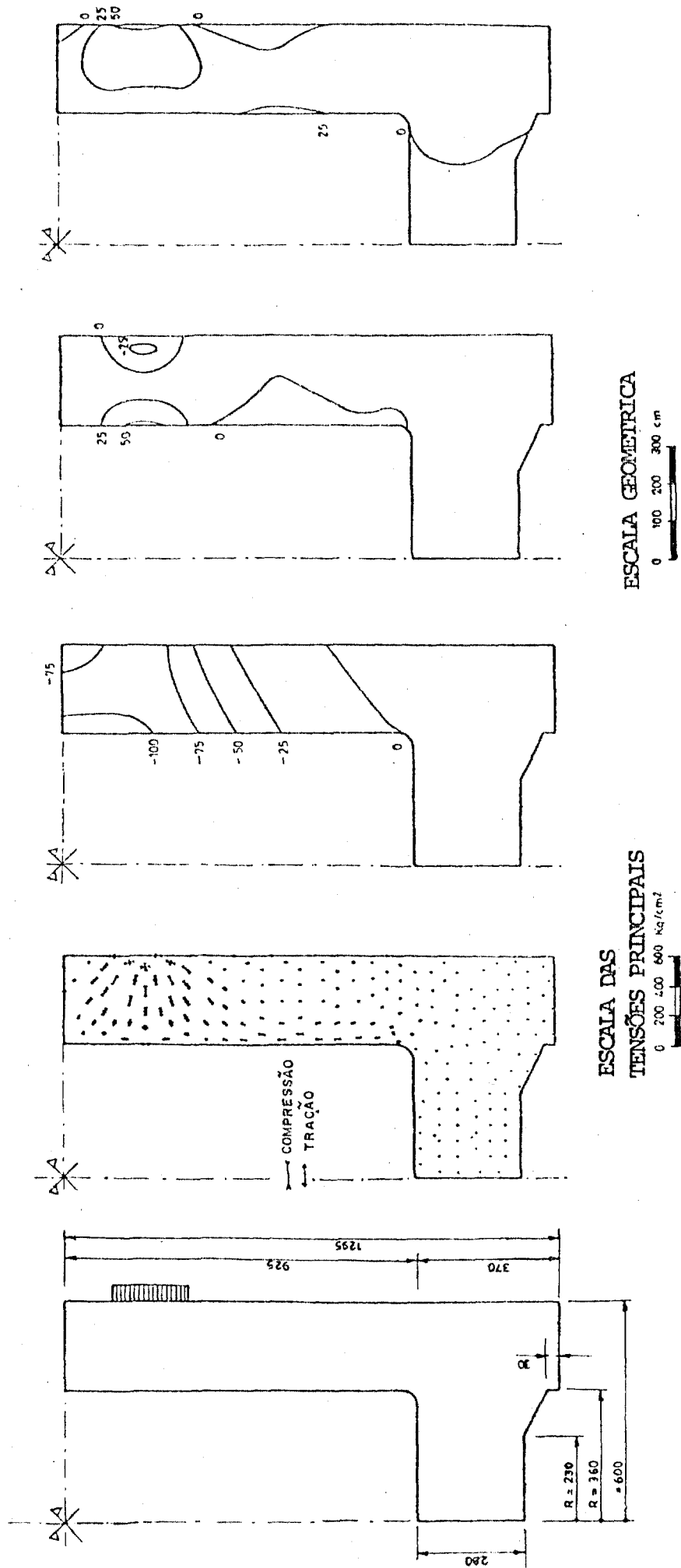


FIGURA 6.26 - Efeito da Protensão dos Cabos de 2º Grupo - Estado Triaxial de Tensões .

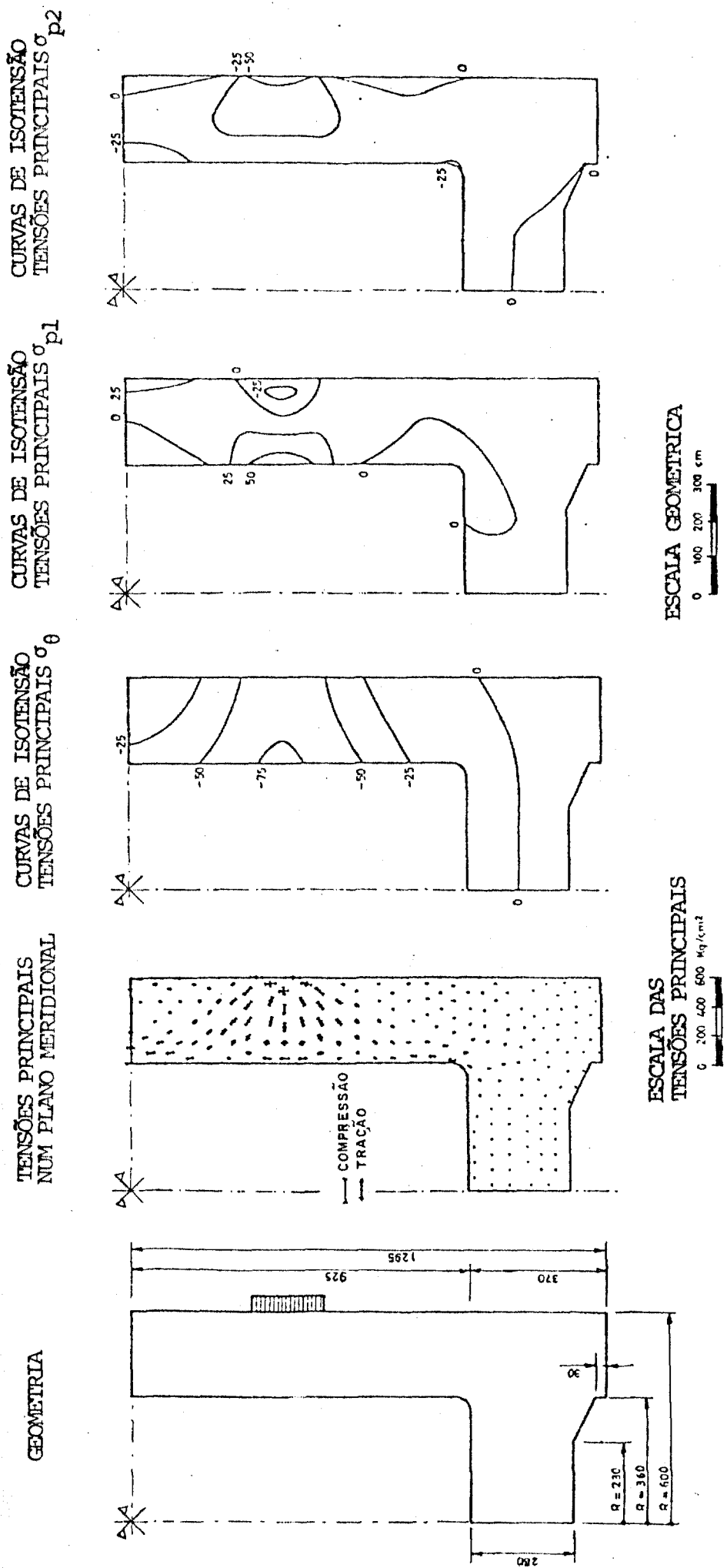


FIGURA 6.27 - Efeito da Protensão dos Cabos de 3º Grupo - Estado Triaxial de Tensões.

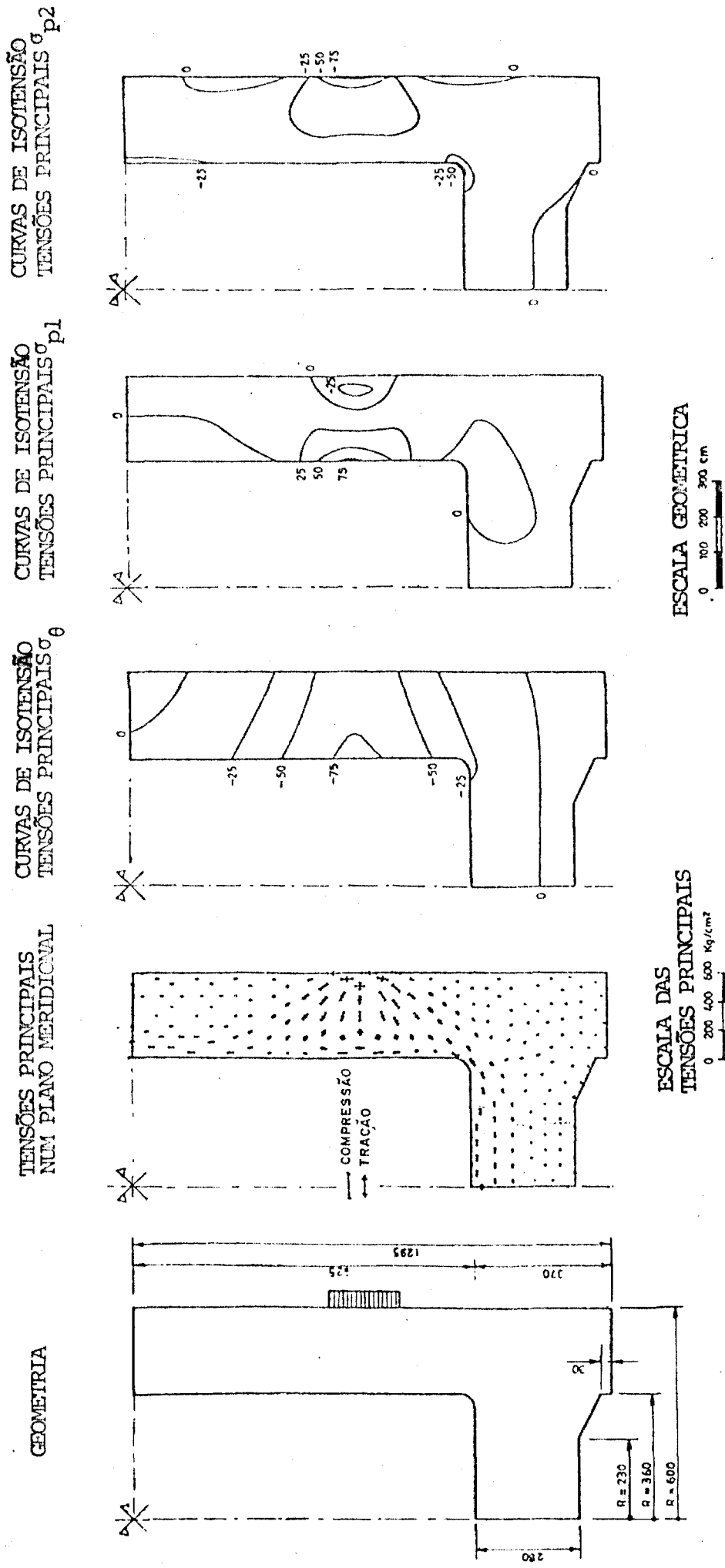


FIGURA 6.28 - Efeito da Protensão dos Cabos de 4º Grupo - Estado Triaxial de Tensões.

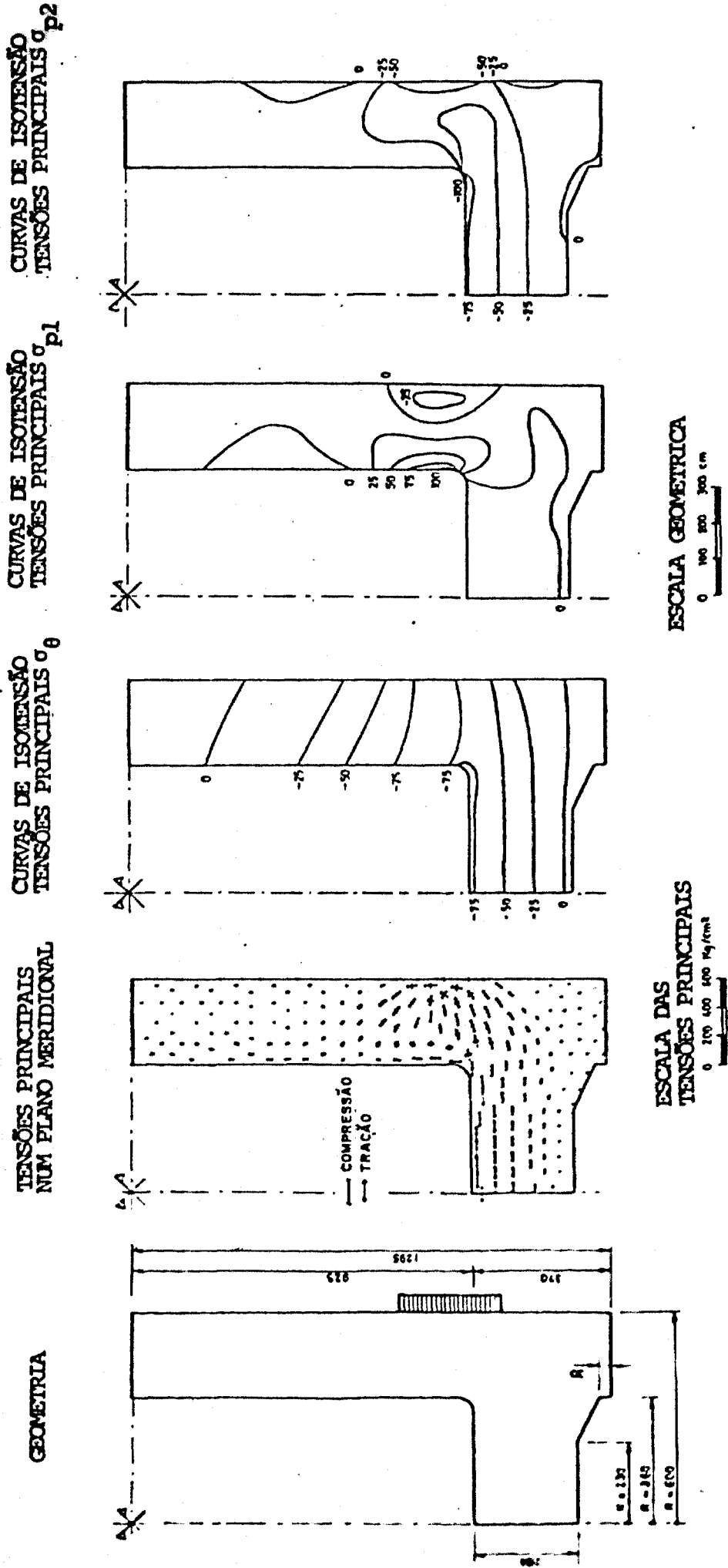


FIGURA 6.29 - Efeito da Protensão dos Cabos de 5ª Grupo - Estado Triaxial de Tensões

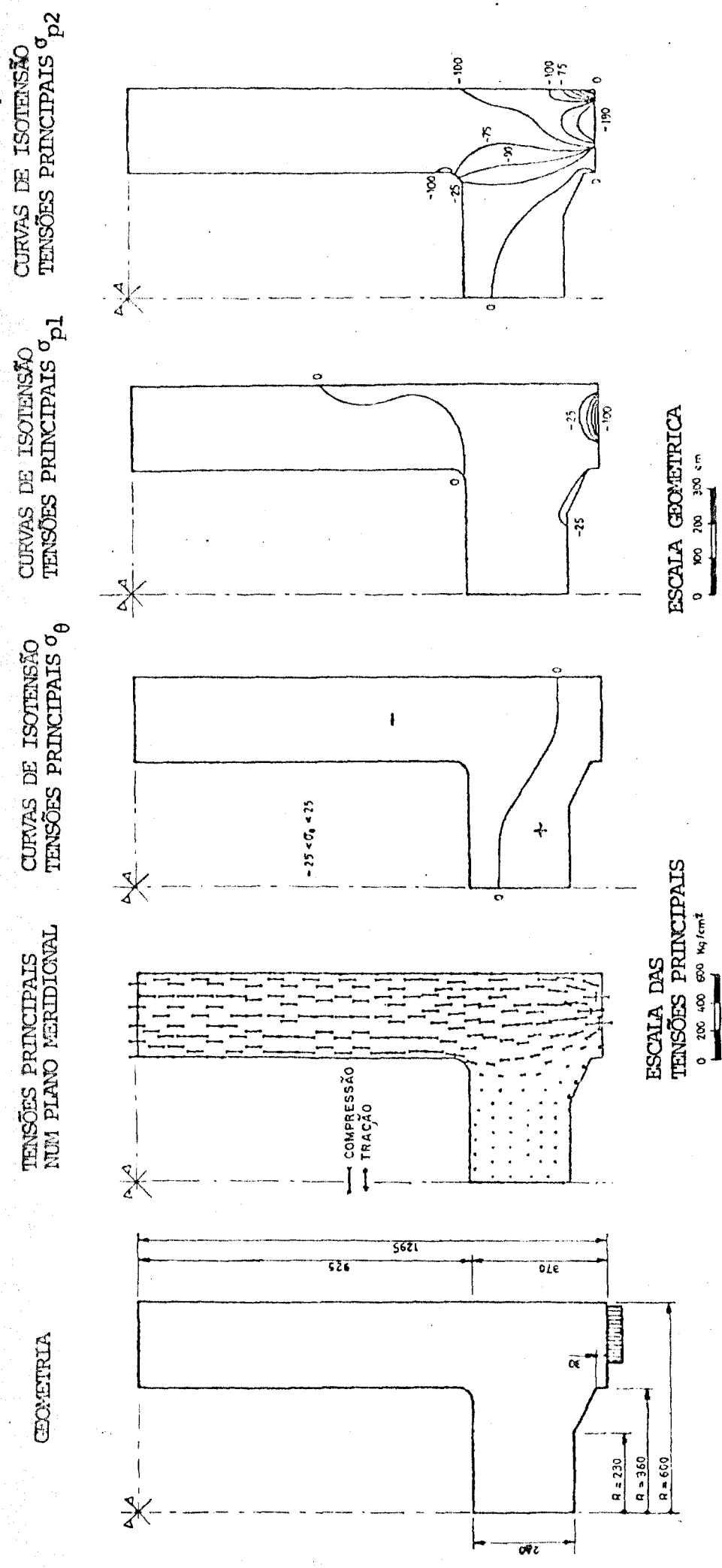


FIGURA 6.30 - Efeito da Protensão dos Cabos Verticais - Estado Triaxial de Tensões.

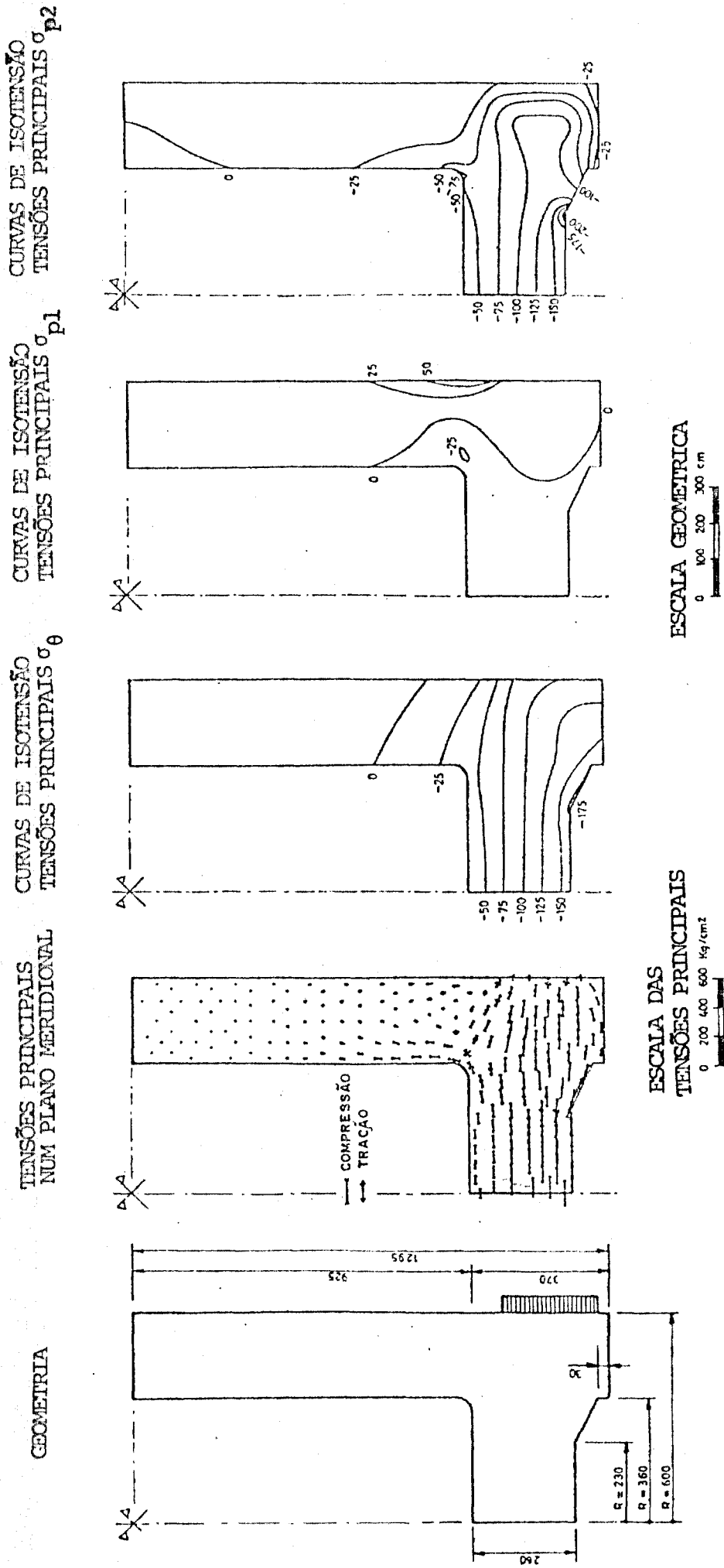


FIGURA 6.31 - Efeito da Protensão dos Cabos da Laje - Estado Triaxial de Tensões.

6.3 - Resultados da Análise do Modelo Experimental do ISMES

A pressurização interna do vaso foi realizada conforme a Figura 6.32 que representa a fase elástica. A leitura inicial foi obtida em 5 kg/cm^2 e a pressão máxima atingida foi de 75 kg/cm^2 , o ciclo do gráfico foi repetido cinco vezes. Foi constatada uma perfeita linearidade elástica da curva tensão - deformação confirmada pelos cálculos de PV2-A e FEAST-1.

As Figuras 6.33 e Tabela 6.24 apresentam os resultados da deformação para uma pressão interna de 70 kg/cm^2 .

Ambos os programas apresentam resultados com boa concordância entre si, contudo, na região equatorial do modelo reduzido, onde ocorre maior deformação, os resultados experimentais apresentaram deformações 20,7% menores em relação ao PV2-A e 17,4% em relação ao FEAST-1. O perfil dos dados experimentais, contudo, é acompanhado pelos resultados teóricos.

Quanto ao estado de tensão, analisado pelo programa PV2-A, podemos concluir que este permitiu boa simulação do comportamento da estrutura na fase inelástica, através da introdução dos códigos das fissuras. Conforme vemos na Figura 6.34 o início da fissuração se deu na pressão interna de 155 kg/cm^2 . Pelos cálculos do PV2-A, o mesmo fenômeno foi atingido com uma pressão interna de 154 kg/cm^2 , acarretando portanto uma diferença de 0,6% apenas. As Tabelas 6.25 a 6.30 apresentam os resultados teóricos das diversas tensões calculadas para essa pressão (154 kg/cm^2).

A Figura 6.35 apresenta o resultado teórico da localização da região interna do vaso em que se inicia essa fissura. A largura dessa fissura foi calculada pelo programa em $40,153 \times 10^{-4} \text{ cm}$ no bloco (12, 11) da malha de cálculo. Observações experimentais confirmaram a localização das fissuras.

CARREGAMENTO NO CAMPO ELÁSTICO

PROGRAMAÇÃO DE CARREGAMENTO

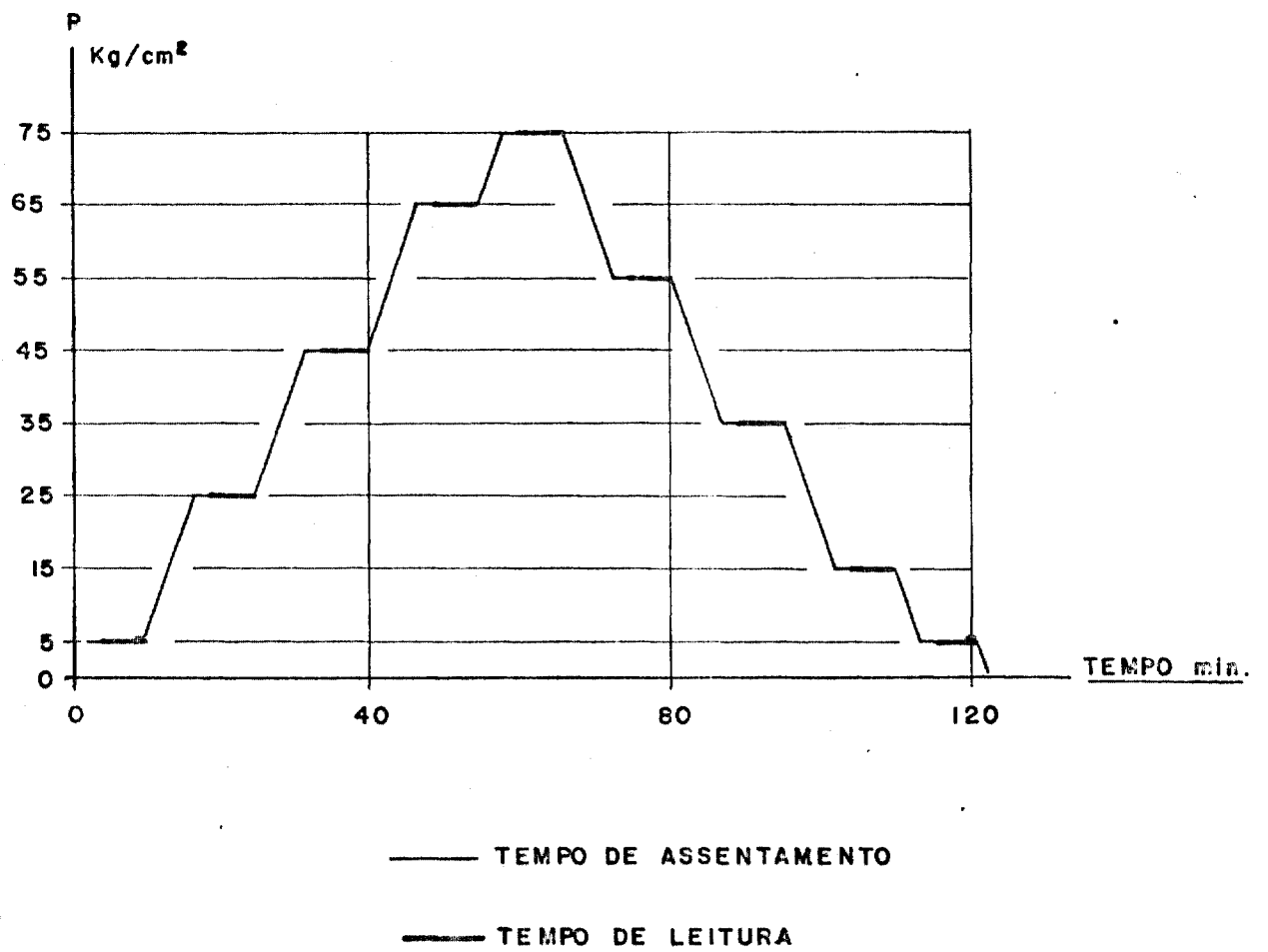


FIGURA 6.32- Pressurização Interna na Fase Elástica

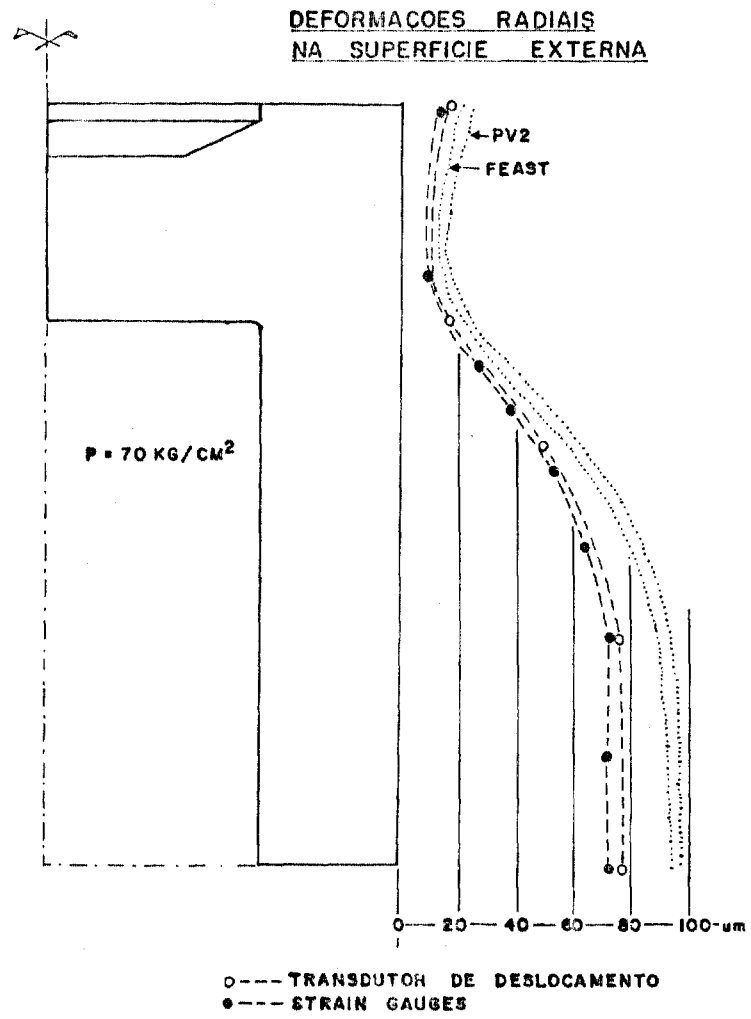


FIGURA 6.33 - Deformações Radiais na Superfície Externa para Pressão Interna de 70 kg/cm².

Tabela 6.24 - Deslocamentos Radiais Calculados pelos Programas
PV2-A e FEAST-1 (10^{-4} cm)

Bloco i	FEAST-1	PV2-A
1	19,766	23,783
2	18,533	22,296
3	17,231	20,770
4	15,824	19,031
5	14,467	17,284
6	13,560	16,197
7	13,181	15,607
8	13,264	15,666
9	13,967	16,371
10	15,796	18,230
11	19,157	22,029
12	23,977	27,608
13	30,038	34,537
14	36,931	42,164
15	44,931	49,888
16	51,200	57,080
17	57,960	63,869

Bloco i	FEAST-1	PV2-A
18	64,262	70,047
19	69,657	75,281
20	74,291	79,736
21	78,190	83,458
22	81,285	86,512
23	83,904	88,974
24	86,127	90,920
25	87,785	92,424
26	89,073	93,567
27	90,042	94,408
28	90,765	95,012
29	91,290	95,433
30	91,652	95,713
31	91,906	95,894
32	92,082	96,006
33	92,196	96,069
34	92,257	96,102

PRESSÃO ATÉ FISSURA INICIAL

PROGRAMAÇÃO DE CARREGAMENTO

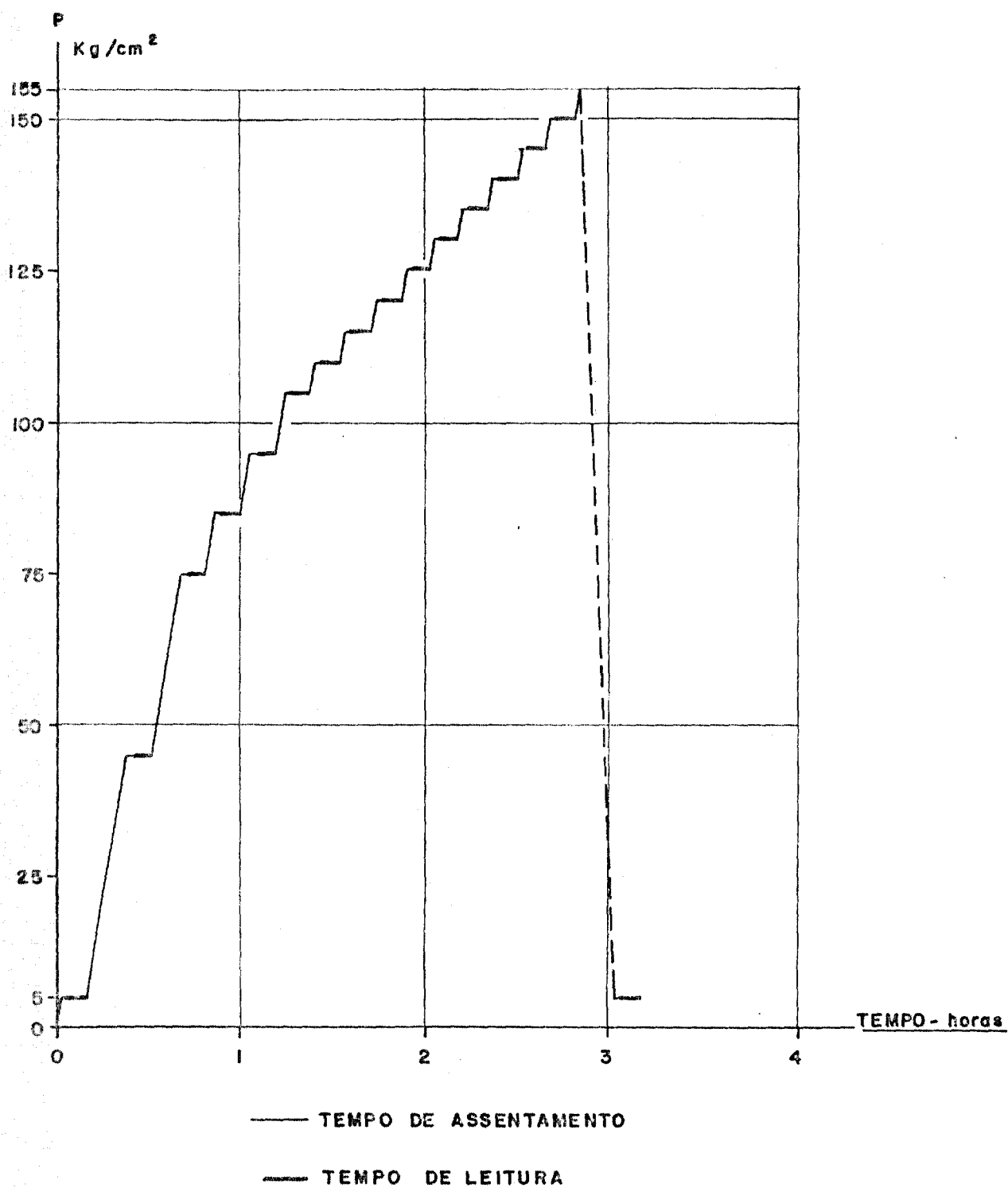


FIGURA 6.34- Pressurização Interna até o Início da Fissuração

Tabela 6.25 - Tensões Radiais para Pressão Interna de 154,0 Kg/cm² - Unidade 1 Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	C.O	C.C	C.C	O.O	O.O	O.O	O.O	C.O	O.O	27,932
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	C.O	0,0	170,160
4	16,415	22,114	34,215	60,823	92,491	131,220	185,274	261,171	122,620	170,310
5	42,602	72,251	111,442	171,291	252,870	366,180	522,050	731,171	1004,508	1384,450
6	101,094	168,461	255,959	384,728	566,935	824,784	1179,008	1664,437	2325,523	3246,066
7	167,190	272,314	408,703	612,758	899,598	1324,008	1904,008	2684,437	3724,751	5144,520
8	150,458	245,452	364,553	542,874	791,109	1144,008	1644,008	2284,437	3184,751	4344,520
9	174,322	281,324	424,511	624,911	914,123	1344,008	1944,008	2704,437	3744,751	5044,520
10	201,414	324,423	484,430	714,519	1024,432	1484,159	2144,008	2944,437	4044,751	5444,520
11	250,058	404,551	604,430	884,460	1284,009	1844,548	2644,520	3644,511	5044,215	-2,446
11	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	10,454	14,322	162,441	168,364	120,405	37,052	-2,445	C.O		
2	102,422	122,265	122,583	147,565	80,441	34,675	-2,088	O.O		
3	100,115	124,111	140,441	151,242	70,629	34,650	-2,584	O.O		
4	122,045	121,000	161,470	161,447	82,742	34,674	-3,260	O.O		
5	122,115	124,044	121,222	121,552	90,285	30,751	-3,454	O.O		
6	122,004	121,211	121,155	121,100	92,218	37,115	-3,104	O.O		
7	121,250	123,241	124,252	128,253	69,405	35,720	-3,459	O.O		
8	121,122	124,111	124,103	124,103	50,892	31,005	-3,209	O.O		
9	121,111	121,111	121,111	121,111	40,000	20,000	-3,000	O.O		
10	121,111	121,111	121,111	121,111	30,000	20,000	-3,000	O.O		
11	121,111	121,111	121,111	121,111	20,000	20,000	-3,000	O.O		
12	121,111	121,111	121,111	121,111	10,000	20,000	-3,000	O.O		
13	121,111	121,111	121,111	121,111	0,000	20,000	-3,000	O.O		
14	121,111	121,111	121,111	121,111	0,000	20,000	-3,000	O.O		
15	121,111	121,111	121,111	121,111	0,000	20,000	-3,000	O.O		
16	121,111	121,111	121,111	121,111	0,000	20,000	-3,000	O.O		
17	121,111	121,111	121,111	121,111	0,000	20,000	-3,000	O.O		
18	121,111	121,111	121,111	121,111	0,000	20,000	-3,000	O.O		

Tabela 6.26 - Tensões Tangenciais para Pressão Interna de 154,0 Kg/cm² - Unidade 1 Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	C.O	C.O	C.C	O.O	O.O	O.O	O.O	O.O	O.O	101,259
3	C.O	C.O	C.C	O.O	O.O	O.O	O.O	C.O	O.O	122,770
4	16,415	22,114	27,154	34,908	52,837	69,913	98,453	123,677	122,516	122,381
5	42,602	71,121	111,417	162,515	242,507	362,861	522,910	732,446	1004,105	1284,113
6	101,094	162,111	242,704	362,447	522,241	732,193	1004,193	1284,193	1764,073	2244,576
7	122,120	162,454	222,124	322,050	462,189	662,584	922,671	1282,671	1762,666	2242,688
8	150,458	192,114	262,124	382,430	542,955	762,437	1062,451	1442,116	1922,223	2502,101
9	174,322	222,120	312,455	442,934	622,177	862,253	1182,005	1622,177	2182,223	2822,250
10	201,414	262,241	362,523	502,444	702,792	982,495	1362,150	1842,150	2422,150	3222,479
11	250,058	322,250	422,470	562,731	762,547	1062,845	1442,354	1922,443	2502,061	3222,033
11	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	51,211	51,211	142,454	145,127	117,070	55,259	71,177	C.O		
2	111,062	122,011	142,240	140,040	129,174	101,441	84,850	O.O		
3	122,011	122,011	142,216	147,712	110,020	110,175	94,104	O.O		
4	122,011	122,111	142,198	145,265	132,430	110,465	102,400	O.O		
5	122,011	122,111	142,185	150,425	134,508	120,834	105,030	O.O		
6	122,011	122,111	142,171	140,422	132,009	121,221	110,402	O.O		
7	122,011	122,111	122,111	142,111	150,372	110,421	105,101	O.O		
8	122,011	122,111	122,111	122,111	122,111	112,101	102,027	O.O		
9	122,011	122,111	122,111	122,111	122,111	102,101	92,101	O.O		
10	122,011	122,111	122,111	122,111	102,101	102,101	82,101	O.O		
11	122,011	122,111	122,111	122,111	82,101	82,101	72,101	O.O		
12	122,011	122,111	122,111	122,111	62,101	62,101	52,101	O.O		
13	122,011	122,111	122,111	122,111	42,101	42,101	32,101	O.O		
14	122,011	122,111	122,111	122,111	22,101	22,101	12,101	O.O		
15	122,011	122,111	122,111	122,111	0,101	0,101	0,101	O.O		
16	122,011	122,111	122,111	122,111	0,101	0,101	0,101	O.O		
17	122,011	122,111	122,111	122,111	0,101	0,101	0,101	O.O		
18	122,011	122,111	122,111	122,111	0,101	0,101	0,101	O.O		

Tabela 6.27 - Tensões Verticais para Pressão Interna de 154,0 Kg/cm² - Unidade: Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.900
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.000	25.847	51.253
4	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-0.000	0.000	31.855	62.611	26.877	35.339
5	15.159	16.447	16.772	16.301	22.133	30.434	51.782	62.142	44.788	35.024
6	25.233	35.450	41.461	43.737	48.234	55.437	65.212	64.526	50.832	36.460
7	45.013	45.444	43.115	43.724	71.501	71.364	75.552	71.514	65.654	37.778
8	51.443	41.003	41.000	41.000	59.061	90.723	90.436	85.144	80.543	40.464
9	114.045	114.544	115.254	117.000	118.361	141.949	114.305	102.384	102.384	41.231
10	131.905	131.862	126.176	126.875	130.411	131.734	134.225	126.554	108.433	65.509
11	154.000	154.000	154.000	154.000	154.000	154.000	154.000	154.000	154.000	154.000
12	0.000	-0.000	171.410	171.410	171.226	35.422	0.000	0.0	0.0	0.0
13	25.436	21.433	125.435	144.162	139.192	57.955	23.746	3.1	3.1	3.1
14	11.153	26.161	51.462	120.677	111.006	69.105	45.444	0.0	0.0	0.0
15	22.003	22.711	72.467	52.005	80.337	71.305	70.355	0.0	0.0	0.0
16	25.461	25.701	52.464	65.356	70.046	72.303	82.122	0.0	0.0	0.0
17	23.226	22.171	31.250	54.250	58.372	60.455	80.513	0.0	0.0	0.0
18	11.159	12.172	27.206	42.566	49.628	62.182	64.210	0.0	0.0	0.0
19	11.032	12.411	16.429	25.088	43.192	56.011	74.143	0.0	0.0	0.0
20	-11.219	-0.500	11.551	25.463	30.455	40.320	61.442	0.0	0.0	0.0
21	-21.200	-2.074	6.444	21.761	34.173	37.408	40.611	0.0	0.0	0.0
22	-30.003	-20.054	7.473	23.411	27.083	29.519	24.925	0.0	0.0	0.0
23	-21.029	-21.454	-2.475	12.441	12.445	12.570	5.335	0.0	0.0	0.0
24	24.440	-24.326	-0.454	44.021	44.074	-0.081	-7.302	0.0	0.0	0.0
25	24.307	-0.411	-0.276	2.311	-3.463	-11.713	-22.945	0.0	0.0	0.0
26	35.437	13.012	6.150	3.733	-7.564	-14.540	-34.468	0.0	0.0	0.0
27	40.524	21.075	10.343	5.410	-4.742	-24.015	-40.466	0.0	0.0	0.0
28	40.101	22.631	12.000	5.306	-11.197	-20.066	-40.000	0.0	0.0	0.0
29	38.118	23.306	13.034	6.177	-11.728	-20.556	-39.415	0.0	0.0	0.0
30	35.452	24.444	12.251	6.714	-11.367	-20.262	-35.215	0.0	0.0	0.0
31	34.001	21.112	12.274	7.027	-10.003	-20.266	-33.835	0.0	0.0	0.0
32	25.004	20.364	12.421	7.134	-10.140	-24.175	-35.482	0.0	0.0	0.0
33	22.557	18.722	12.176	7.105	-9.453	-22.011	-32.057	0.0	0.0	0.0
34	22.460	17.055	11.423	7.010	-8.768	-21.178	-31.038	0.0	0.0	0.0
35	20.158	15.463	10.661	6.875	-8.101	-19.954	-29.454	0.0	0.0	0.0
36	18.140	12.832	5.468	6.740	-7.467	-18.553	-27.340	0.0	0.0	0.0
37	15.700	12.375	5.204	6.664	-6.878	-17.214	-25.495	0.0	0.0	0.0
38	12.100	11.016	6.566	6.485	-6.345	-16.001	-23.610	0.0	0.0	0.0
39	11.003	8.504	6.102	6.170	-5.872	-15.072	-22.360	0.0	0.0	0.0
40	10.223	8.221	7.024	6.285	-5.403	-13.936	-21.092	0.0	0.0	0.0
41	6.000	6.104	7.125	6.214	-5.129	-11.002	-20.005	0.0	0.0	0.0
42	4.016	5.473	6.467	6.150	-4.895	-11.002	-15.253	0.0	0.0	0.0
43	2.426	6.554	6.245	6.113	-4.837	-12.673	-10.444	0.0	0.0	0.0
44	0.748	6.074	6.410	6.085	-4.520	-12.193	-10.148	0.0	0.0	0.0
45	0.474	6.452	6.322	6.065	-4.444	-12.238	-10.012	0.0	0.0	0.0

Tabela 6.28 - Tensões de Cisalhamento para Pressão Interna de 154,0 Kg/cm² - Unidade: Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-49.345
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.503	-0.412	-0.127
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.545	-04.141	-05.702
5	0.0	-7.135	-15.575	-24.627	-34.554	-47.563	-65.287	-85.412	-04.141	-05.702
6	0.0	-12.423	-27.485	-42.472	-57.469	-73.498	-91.497	-102.042	-10.044	-10.360
7	0.0	-16.911	-33.411	-45.854	-66.611	-82.377	-92.911	-101.363	-12.665	-05.594
8	0.0	-17.000	-34.000	-50.834	-67.140	-81.577	-92.228	-101.488	-10.488	-05.559
9	0.0	-15.864	-31.455	-46.831	-61.505	-79.070	-95.474	-102.734	-04.474	-10.003
10	0.0	-13.210	-26.413	-35.002	-51.127	-62.690	-72.028	-85.143	-07.077	-10.565
11	0.0	-8.250	-16.401	-24.121	-31.322	-38.166	-44.863	-50.461	-05.675	-05.915
12	-21.137	-27.552	-44.614	-7.125	15.417	54.735	25.818	0.0	0.0	0.0
13	-21.724	-27.571	-45.444	-20.245	9.290	43.331	27.436	0.0	0.0	0.0
14	-06.377	-25.123	-24.104	-25.318	-0.045	25.205	15.407	0.0	0.0	0.0
15	-02.666	-25.644	-45.437	-26.732	-7.100	10.150	10.610	0.0	0.0	0.0
16	-12.067	-14.765	-40.722	-25.778	-16.731	-0.722	3.244	0.0	0.0	0.0
17	-03.343	-11.035	-31.551	-34.132	-20.222	-0.618	-2.411	0.0	0.0	0.0
18	-04.137	-11.212	-24.017	-35.564	-24.551	-19.045	-10.661	0.0	0.0	0.0
19	-105.000	-07.000	-11.355	-41.576	-31.624	-29.655	-14.305	0.0	0.0	0.0
20	-115.943	-11.366	-11.005	-42.866	-39.776	-21.195	-19.356	0.0	0.0	0.0
21	-104.154	-18.354	-06.000	-35.322	-31.176	-24.641	-16.170	0.0	0.0	0.0
22	0.0	-15.210	-04.144	-30.744	-49.405	-25.717	-12.104	0.0	0.0	0.0
23	0.0	-21.563	-04.250	-45.723	-40.440	-20.150	-13.132	0.0	0.0	0.0
24	0.0	-4.911	-22.122	-36.448	-32.984	-21.502	-12.595	0.0	0.0	0.0
25	0.0	-4.111	-18.444	-24.000	-22.074	-17.111	-5.609	0.0	0.0	0.0
26	0.0	-10.444	-11.854	-11.552	-12.549	-9.541	-4.599	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	-2.234	-3.623	-3.328	-1.226	0.214	0.0	0.0	0.0
28	0.0	1.484	0.872	-0.123	-0.712	-0.355	0.112	0.0	0.0	0.0
29	0.0	2.155	2.466	1.529	1.375	0.954	0.591	0.0	0.0	0.0
30	0.0	2.414	2.315	3.148	2.763	1.595	1.122	0.0	0.0	0.0
31	0.0	2.503	3.746	3.855	3.584	2.761	1.513	0.0	0.0	0.0
32	0.0	2.314	3.611	4.265	4.030	3.053	1.733	0.0	0.0	0.0
33	0.0	2.500	3.554	4.374	4.183	3.137	1.807	0.0	0.0	0.0
34	0.0	2.262	3.171	4.265	4.124	3.155	1.701	0.0	0.0	0.0
35	0.0	2.112	2.442	4.051	3.915	3.036	1.603	0.0	0.0	0.0
36	0.0	1.105	3.241	3.734	3.608	2.794	1.542	0.0	0.0	0.0
37	0.0	1.172	2.552	3.550	3.216	2.503	1.377	0.0	0.0	0.0
38	0.0	1.442	2.616	2.535	2.835	2.184	1.194	0.0	0.0	0.0
39	0.0	1.112	2.215	2.501	2.417	1.861	1.017	0.0	0.0	0.0
40	0.0	1.014	1.841	2.000	1.454	1.516	0.818	0.0	0.0	0.0
41	0.0	0.106	1.461	1.641	1.505	1.217	0.602	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.031	1.065	1.225	1.183	0.901	0.492	0.0	0.0	0.0
43	0.0	0.444	0.767	0.810	0.750	0.605	0.321	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.215	0.373	0.420	0.406	0.309	0.166	0.0	0.0	0.0

Tabela 6.29 - Tensões principais Mínimas para Pressão Interna de 154,0 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	(...)	C.C	-5,285
2	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	(...)	-12,336	-24,235
3	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	-14,876	-21,353	2,423	23,550
4	-0,229	-1,465	-2,520	-3,408	-4,352	-5,008	17,306	31,394	-0,650	7,556
5	11,229	11,764	12,654	13,739	-2,109	-3,317	0,047	15,333	10,257	4,162
6	28,428	32,624	37,513	42,165	6,522	12,195	2,205	2,318	1,662	-4,097
7	63,903	50,770	49,541	33,890	22,154	12,395	6,528	1,302	-6,373	-14,264
8	50,111	12,752	71,225	57,683	43,307	29,600	17,133	5,310	-11,174	-25,008
9	112,104	107,165	50,155	63,645	60,185	51,775	34,120	17,154	-11,270	-35,717
10	136,554	132,602	127,573	117,701	103,715	86,434	65,056	35,657	0,050	-47,621
11	153,556	152,610	152,766	151,079	147,261	138,223	117,620	83,001	35,264	-27,090

	11	12	13	14	15	16	17	18
1	-8,040	-7,664	141,450	141,316	114,940	10,167	-7,792	C.C
2	2,159	-2,146	52,350	147,323	67,665	9,774	-8,320	0,0
3	-4,245	3,111	73,415	118,162	67,977	18,160	-5,540	0,0
4	1,760	12,452	57,241	65,651	78,009	78,715	-4,011	C.C
5	C.C	10,740	40,541	49,715	69,345	35,079	-3,589	0,0
6	-7,691	1,430	41,031	45,247	54,947	30,965	-3,504	0,0
7	-71,145	-10,115	15,257	35,276	41,328	32,220	-3,500	C.C
8	-33,174	-22,100	3,185	24,815	28,764	22,641	-3,751	0,0
9	-52,612	-31,664	-5,542	15,743	17,707	12,911	-4,148	0,0
10	-18,001	-35,765	-32,115	6,304	9,440	5,174	-4,156	0,0
11	-122,227	-17,157	-27,465	-1,137	1,401	0,056	-3,770	0,0
12	-6,057	-15,623	-34,416	-11,445	-7,667	-5,818	-5,032	C.C
13	23,715	-25,834	-71,732	-11,431	-12,428	-12,255	-11,766	0,0
14	38,422	-2,410	-2,486	-5,368	-12,253	-10,110	-24,264	0,0
15	35,739	12,611	4,027	0,047	-11,060	-21,904	-34,870	0,0
16	60,665	20,004	5,547	4,618	-10,326	-24,379	-40,500	C.C
17	40,178	23,651	12,645	-5,273	-11,426	-20,065	-40,080	0,0
18	21,105	33,274	13,015	0,124	-11,770	-20,564	-35,940	0,0
19	25,441	33,763	12,236	0,606	-11,426	-20,267	-35,215	C.C
20	52,568	41,450	15,112	6,925	-10,504	-25,631	-37,250	0,0
21	65,950	40,253	12,681	6,552	-10,290	-24,275	-36,004	0,0
22	26,504	18,656	12,001	6,940	-9,432	-22,931	-33,880	0,0
23	23,164	10,572	11,275	6,945	-8,954	-21,500	-31,664	0,0
24	40,888	15,028	10,515	6,725	-8,277	-20,075	-29,480	0,0
25	16,240	15,163	5,714	6,405	-7,673	-18,706	-27,414	0,0
26	15,163	12,245	5,184	6,455	-7,008	-17,420	-25,520	0,0
27	12,745	11,024	4,882	6,357	-6,448	-16,277	-23,828	0,0
28	11,655	9,656	4,552	6,313	-5,950	-15,265	-22,354	0,0
29	10,221	8,511	4,243	6,242	-5,527	-14,368	-21,102	0,0
30	5,028	4,110	3,056	6,144	-5,165	-13,480	-20,072	C.C
31	6,110	3,485	6,751	6,125	-4,681	-13,106	-19,257	0,0
32	1,254	6,550	6,561	6,104	-4,668	-12,492	-18,251	0,0
33	6,746	6,661	6,407	6,081	-4,524	-12,376	-18,245	0,0
34	1,474	6,451	6,322	6,065	-4,445	-12,235	-18,032	0,0

Tabela 6.30 - Tensões Principais Máximas para Pressão Interna de 154,0 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,285
2	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	C.C	12,336	24,235
3	C.C	C.C	C.C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	145,052	205,669
4	16,463	17,641	44,815	44,211	90,043	137,020	145,824	241,225	215,805	264,090
5	69,251	31,806	52,126	113,574	130,120	168,131	191,505	157,352	200,339	159,312
6	102,755	111,455	120,512	105,178	140,193	169,323	157,535	200,540	159,493	158,023
7	128,250	126,420	145,553	125,542	181,065	196,057	202,249	201,366	201,866	155,562
8	151,040	151,251	166,563	150,452	191,465	200,001	204,414	200,652	200,050	154,678
9	175,174	175,514	184,450	170,802	196,259	200,165	201,595	200,272	155,504	154,683
10	207,625	207,442	216,435	201,443	198,127	195,654	192,792	185,761	184,693	161,470
11	232,620	245,352	237,202	235,727	190,609	101,325	170,700	167,450	168,731	174,644

	11	12	13	14	15	16	17	18
1	24,774	15,513	115,564	122,459	176,650	50,466	5,347	0,0
2	145,660	126,141	111,644	145,405	132,364	87,865	25,275	0,0
3	488,227	442,444	310,455	353,737	320,338	120,338	85,663	52,000
4	152,246	151,511	110,114	144,565	92,550	79,345	11,106	0,0
5	151,510	453,627	142,054	175,235	91,087	73,296	63,257	0,0
6	150,414	450,542	142,413	173,165	90,643	68,645	60,514	C.C
7	155,058	444,104	178,143	175,742	97,235	60,658	64,332	0,0
8	150,131	435,154	164,646	160,757	94,276	65,156	74,645	0,0
9	162,584	435,152	145,102	142,052	88,474	62,512	62,525	0,0
10	164,114	436,100	112,308	109,231	79,556	52,001	42,054	C.C
11	23,704	77,623	25,180	51,365	64,301	40,176	28,241	0,0
12	155,816	160,224	111,545	57,056	62,815	35,742	12,175	C.C
13	150,652	153,132	114,528	101,042	63,444	30,083	2,852	0,0
14	145,717	151,221	141,751	103,560	62,522	27,163	0,061	C.C
15	165,034	155,621	141,760	109,837	61,021	25,074	-0,564	C.C
16	146,552	154,610	141,647	110,230	60,774	24,513	-0,686	0,0
17	148,115	154,623	141,510	110,478	62,055	25,436	-0,576	0,0
18	147,764	154,605	142,727	116,717	64,035	26,412	-0,447	C.C
19	146,865	154,616	142,614	116,814	64,464	26,741	-0,342	0,0
20	144,161	154,614	142,614	116,577	64,316	26,430	-0,258	0,0
21	147,036	154,676	142,652	116,781	64,455	26,491	-0,185	0,0
22	146,530	154,656	142,652	116,610	64,351	27,011	-0,152	0,0
23	146,615	154,607	142,600	115,756	64,253	27,005	-0,165	0,0
24	146,747	154,617	142,781	115,419	64,163	26,992	-0,111	0,0
25	146,601	154,621	142,646	115,476	64,080	26,964	-0,107	0,0
26	146,616	154,631	142,625	115,365	64,004	26,930	-0,110	0,0
27	146,601	154,604	142,715	115,275	63,927	26,894	-0,118	0,0
28	146,595	154,585	142,657	115,204	63,876	26,866	-0,128	0,0
29	146,586	154,561	142,641	115,146	63,826	26,832	-0,138	0,0
30	146,575	154,512	142,624	115,106	63,786	26,791	-0,145	0,0
31	146,559	154,474	142,612	115,074	63,753	26,766	-0,155	0,0
32	146,534	154,442	142,602	115,054	63,729	26,747	-0,167	0,0
33	146,524	154,414	142,591	115,038	63,713	26,732	-0,172	0,0
34	146,514	154,382	142,584	115,031	63,707	26,726	-0,175	0,0

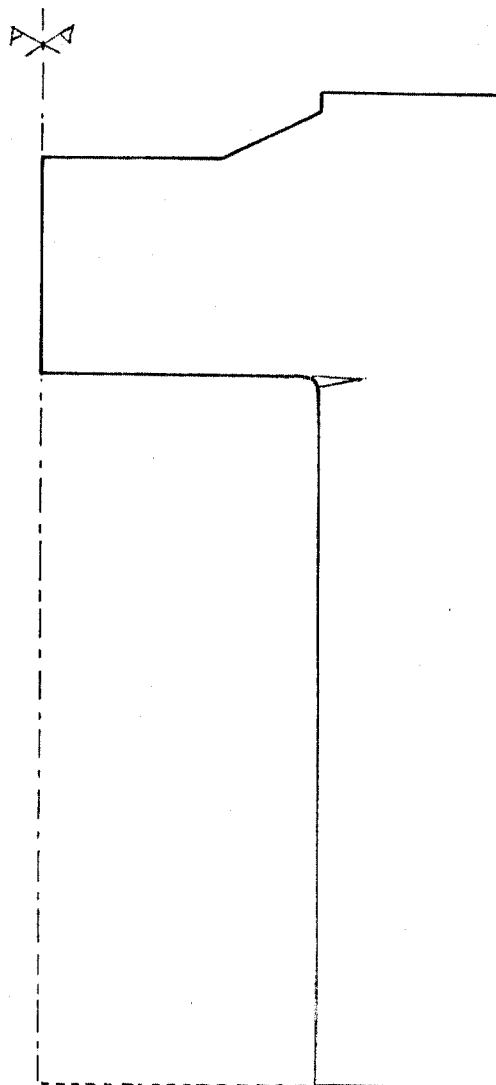


FIGURA 6.35 - Esquema de Fissuração Prevista pelo Cálculo à Pressão Interna de 154 kg/cm^2

O colapso estrutural foi observado experimentalmente em uma pressão interna de 237 kg/cm^2 e este fenômeno foi confirmado pelos cálculos em 193 kg/cm^2 , ocorrendo, portanto, uma diferença de 18,5%.

A Figura 6.36 apresenta um esquema de fissuração prevista pelos cálculos com uma pressão interna de 193 kg/cm^2 . As regiões rachuradas representam as fissuras radiais no plano I, J. Observamos, também, a ruptura dos cabos circunferenciais das paredes laterais nos blocos de $I = 13$ a 34. O mesmo fenômeno - foi também observado experimentalmente nas regiões previstas pela teoria.

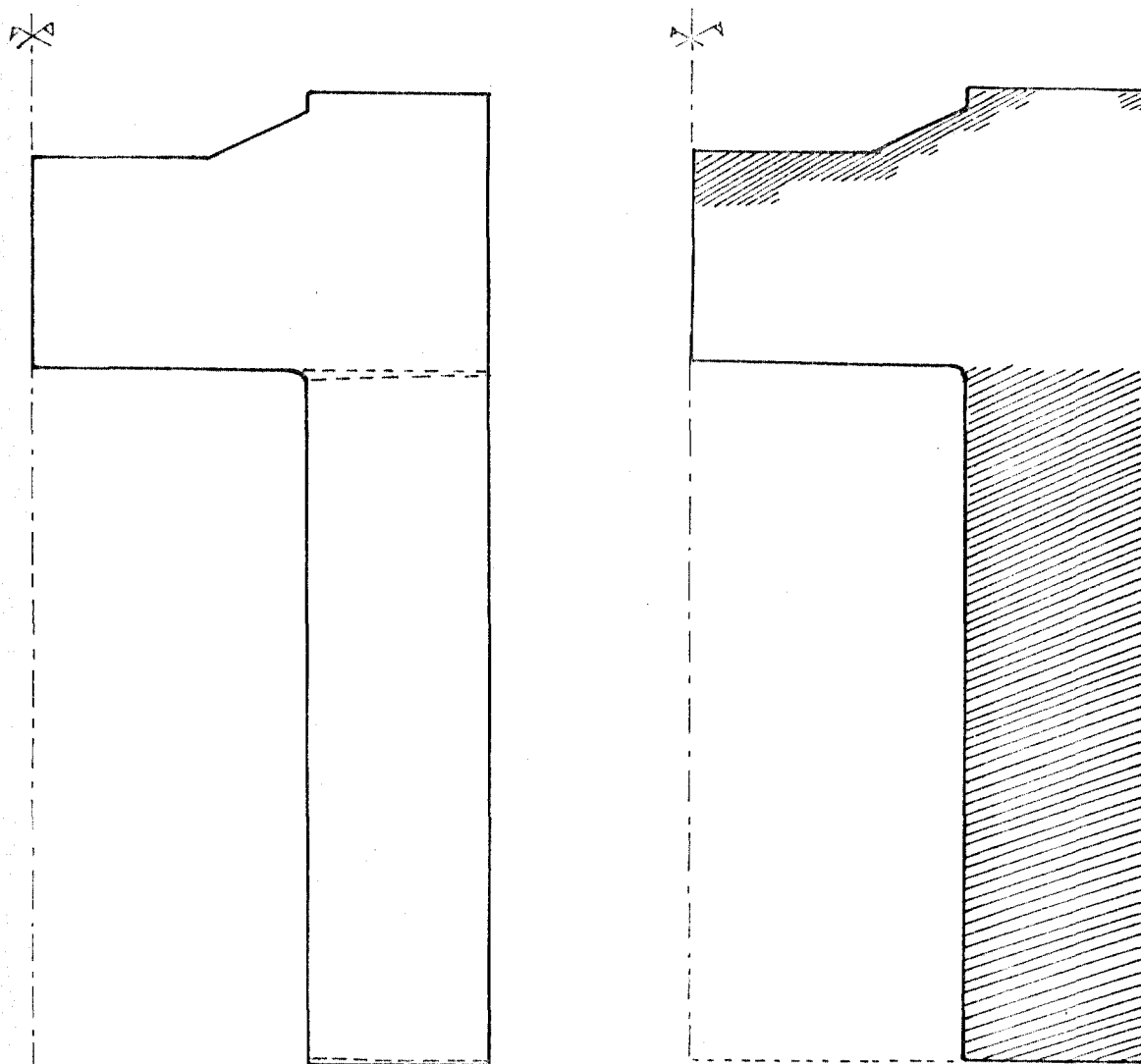
Quanto à discrepância de alguns resultados teóricos em comparação com a experiência, é necessário considerar os efeitos dos seguintes fatores:

- a) Existência da membrana de cobre na superfície interna do vaso:

No modelo teórico, a membrana interna não foi considerada, para simplificação das malhas. A sua inclusão na modelação dos cálculos levaria a uma redução das deformações nos resultados teóricos, conforme constatou-se também nos trabalhos descritos na referência /21/, com problemas similares.

- b) Função hereditariedade do concreto:

No modelo experimental, as experiências na fase elástica foi repetida cinco vezes, acarretando o fenômeno de histerese no comportamento do concreto, ditada pela função hereditariedade. Ocorre então, que as deformações posteriores à primeira - pressurização tendem a apresentar resultados menores que os previstos teoricamente sem levar em conta este fenômeno.



FISSURAS HORIZONTAIS

FISSURAS RADIAIS

FIGURA 6.36- Esquema de Fissuração prevista pelo Cálculo a Pressão Interna de 193 kg/cm^2 .

c) Retração e deformação lenta do concreto:

No modelo físico, as protensões foram realizadas sequencialmente e o histórico das deformações causadas pelos seus esforços são difíceis de serem avaliadas, devido aos fenômenos das retrações e deformações lentas que ocorrem nessas fases da protensão.

d) Efeito do "buttress":

No modelo matemático, a região do "buttress" foi homogeneizada, mas no modelo experimental há "strain-gauges" e transdutores dispostos nesta região. Uma análise com a utilização de programas tridimensionais poderia introduzir os efeitos das perturbações ocasionadas por essas discontinuidades, o que não foi considerado neste trabalho.

e) Efeito da bainha dos cabos:

Quando aplicamos uma pressão interna, a estrutura é fortemente confinada pelas armaduras (bainhas) distribuídas dentro da estrutura.

A rigidez de tais armaduras foram simplificadas pela homogeneização dos módulos de elasticidade.

f) Variação do módulo de elasticidade:

O módulo de elasticidade não é constante em toda a estrutura. No cálculo adotamos um valor médio para este parâmetro o que impossibilita uma análise específica de uma pequena região .

6.4- Resultados da Análise do Modelo Experimental do IPEN

As pressurizações, na fase elástica, foram repetidas cinco vezes e o valor máximo da pressão interna atingida foi de $140,0 \text{ kg/cm}^2$. As Tabelas 6.31 e Figuras 6.37 apresentam os deslocamentos radiais e verticais, calculados pelo PV2-A para uma pressão interna de $90,0 \text{ kg/cm}^2$ (pressão de operação) e $140,0 \text{ kg/cm}^2$ (pressão limite da fase elástica).

Os coeficientes angulares das retas deformação-pressão interna para três primeiros ciclos, obtidos a partir dos resultados da leitura dos transdutores de deslocamento situados na linha equatorial, estão apresentados na Tabela 6.32, abaixo.

Tabela 6.32- Coeficiente Angular da Reta Deformação Radial - Pressão Interna. Unidade: $10^{-8} \text{ m/kg/cm}^2$.

	<u>IDA</u>	<u>VOLTA</u>
1º ciclo	45,29	45,44
	44,27	45,11
2º ciclo	33,78	34,11
	45,22	45,89
3º ciclo	47,11	46,33
	47,33	42,11

O valor médio é de $43,25 \times 10^{-8} \text{ m/kg/cm}^2$.

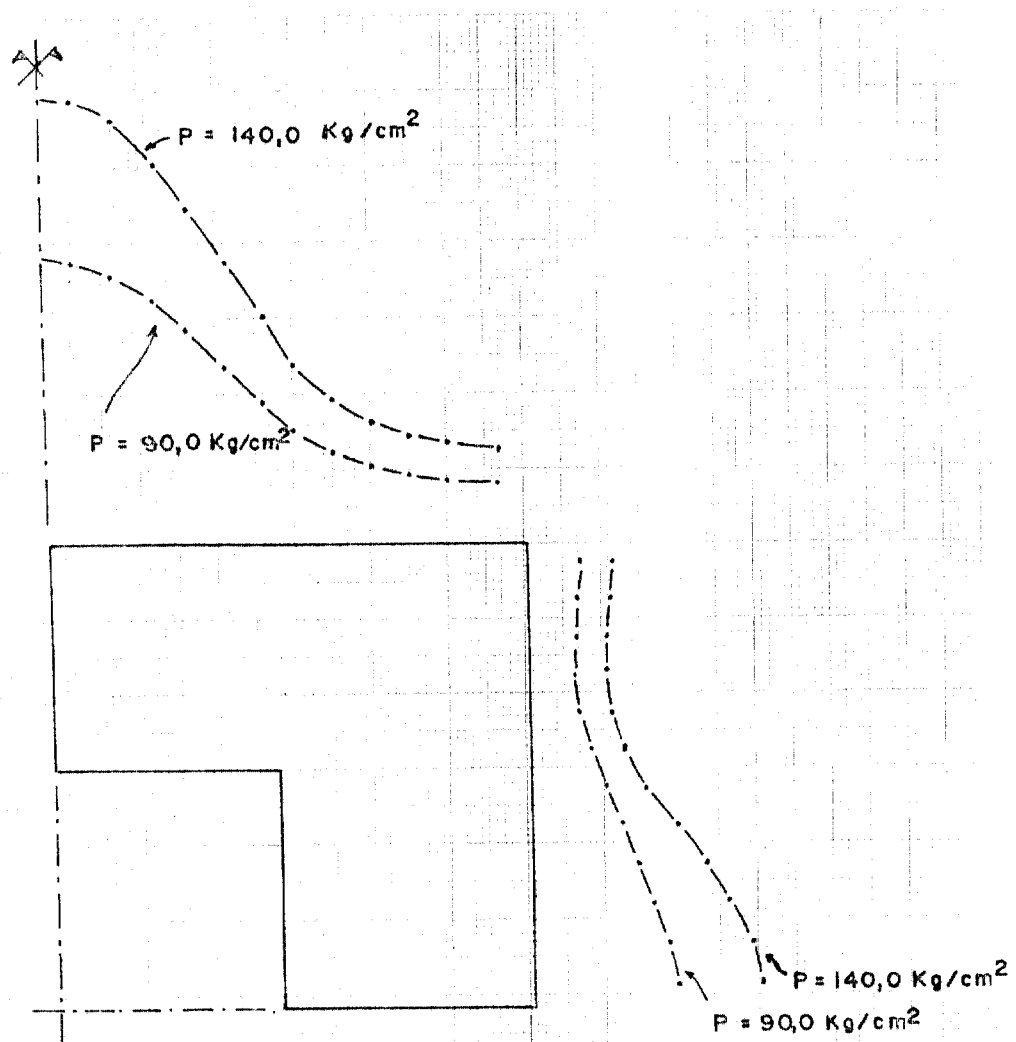
O resultado teórico foi de $45,6 \times 10^{-8} \text{ m/kg/cm}^2$.

Portanto, a diferença teórico experimental foi de 5,4%.

Tabela 6.31 - Deslocamentos Radiais e Verticais Calculados pelo PV2-A, para Pressão Interna de 90 kg/cm^2 e 140 kg/cm^2 . Unidade: 10^{-4} cm .

P R E S S ã O I N T E R N A (kg / cm^2)

BLOCO	90		140	
	RADIAIS	VERTICAIS	RADIAIS	VERTICAIS
1	14,945	74,437	23,735	118,225
2	13,894	71,133	22,066	112,977
3	13,066	64,862	20,751	103,019
4	12,955	56,338	20,576	89,482
5	13,960	46,656	22,171	74,106
6	16,342	37,785	25,954	60,009
7	20,083	30,214	31,894	47,981
8	24,724	24,221	39,268	38,468
9	29,501	20,366	46,854	32,347
10	33,705	18,184	53,531	28,880
11	36,835	17,066	58,502	27,105
12	38,790	16,239	61,608	25,791



ESCALA DOS DESLOCAMENTOS (10^{-4} CM)

0 20 40 60 80

FIGURA 6.37- Deslocamentos Radiais e Verticais para Pressão Interna de 90 kg/cm^2 e 140 kg/cm^2 Calculados - pelo PV2-A

Os coeficientes angulares da reta deformação vertical-pressão interna para três primeiros ciclos, determinados pelos dados da leitura dos transdutores de deslocamento dispostos a uma distância de 125 mm do eixo de simetria vertical estão apresentados na Tabela 6.33.

Tabela 6.33 - Coeficiente Angular da Reta Deformação Vertical-Pressão Interna. Unidade 10^{-8}m/kg/cm^2

	<u>IDA</u>	<u>VOLTA</u>
1º ciclo	72,75	69,67
2º ciclo	71,89	70,89
3º ciclo	72,44	70,11

A média desses valores é $71,29 \times 10^{-8} \text{m/kg/cm}^2$; portanto, a diferença entre os dados teórico e experimental foi de 7 %.

Os resultados experimentais obtidos além da pressão interna de $140,0 \text{ kg/cm}^2$ não são confiáveis devido a problemas técnicos surgidos, surgidos, na ocasião do ensaio, com o rompimento da membrana interna. Este fato, como consequência, ocasionou a infiltração da água nas fissuras do concreto, levando-se assim a uma condição de fissura pressurizada. Isto, impossibilitou submeter o vaso à condição de pressurização máxima de cálculo ($280,0 \text{ kg/cm}^2$), conforme o critério de projeto pré-estabelecido. O critério de pressão era de três vezes a pressão de trabalho ($90,0 \text{ kg/cm}^2$).

Conforme vemos pelas Tabelas 6.34 a 6.39, o vaso submetido a uma pressão interna de $140,0 \text{ kg/cm}^2$ apresentou tensões de tração no canto interno causando o surgimento de primeiras fissuras nessas regiões. Sob condição de fissura pressurizada, a velocidade de propagação da fissura, desde a superfície interna até a externa, é mais rápida do que em condição normal.

Tabela 6.34 - Tensões Radiais para Pressão Interna de 140,0 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm².

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-5.858	1.802	16.631	37.485	62.497	88.390	119.135	160.921	178.811	184.809
2	41.223	45.901	55.283	69.348	87.586	107.063	121.959	125.181	130.871	128.192
3	76.337	78.183	82.280	89.407	100.189	111.971	117.233	112.885	111.027	110.532
4	107.957	106.535	104.190	102.282	103.648	111.145	112.796	105.332	102.250	105.112
5	145.088	140.077	130.076	115.589	99.790	98.603	100.258	92.111	92.362	100.307
6	196.762	188.838	172.472	146.053	105.005	38.403	52.283	67.217	80.340	92.693
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.243	69.461	78.654	84.989
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	136.060	106.651	93.484	88.314
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	135.434	117.387	102.701	93.255
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.930	120.474	107.049	96.653
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.575	121.264	108.831	98.434
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.357	121.476	109.527	99.204
11	11	12	13							
1	169.062	126.444	0.0							
2	124.486	120.346	0.0							
3	114.967	125.994	0.0							
4	113.547	125.691	0.0							
5	112.002	125.563	0.0							
6	106.481	125.693	0.0							
7	87.670	83.689	0.0							
8	85.783	84.113	0.0							
9	87.685	84.457	0.0							
10	89.583	84.820	0.0							
11	90.744	85.054	0.0							
12	91.264	85.198	0.0							

Tabela 6.35 - Tensões Tangenciais para Pressão Interna de 140,0 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-5.858	-2.332	4.555	14.420	26.638	39.585	57.157	88.738	105.489	120.407
2	41.223	43.303	47.449	53.643	61.924	71.731	83.980	98.498	107.655	112.940
3	76.337	77.045	78.539	81.004	84.780	89.889	96.585	103.794	108.609	110.977
4	107.957	107.154	105.616	103.549	101.484	103.579	102.494	106.152	108.949	110.712
5	145.088	142.704	137.855	130.393	120.213	108.567	104.144	106.087	107.913	109.547
6	196.762	193.115	185.643	173.832	156.307	118.217	99.741	103.187	104.590	105.863
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.329	96.686	98.522	99.155
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	84.799	88.806	91.163	91.992
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.025	81.263	84.209	85.421
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68.973	75.051	78.465	80.004
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.987	70.618	74.350	76.104
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.941	67.931	71.848	73.713

11 12 13

1	122.408	102.154	0.0
2	111.879	103.706	0.0
3	110.819	109.269	0.0
4	111.932	114.064	0.0
5	111.700	116.095	0.0
6	108.039	114.036	0.0
7	99.176	97.330	0.0
8	91.820	90.624	0.0
9	85.460	84.543	0.0
10	80.255	79.442	0.0
11	76.494	75.730	0.0
12	74.170	73.451	0.0

Tabela 6.36 - Tensões Verticais para Pressão Interna de 140,00 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.000	-0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	18.000	112.000	135.000	169.000
2	19.456	18.689	16.948	14.107	11.235	13.649	35.382	92.917	124.068	145.315
3	50.866	49.381	45.891	39.677	31.254	26.819	40.064	75.905	104.265	119.696
4	87.104	85.551	81.562	73.127	57.135	34.819	33.154	59.728	85.115	99.311
5	119.878	119.069	116.690	110.286	91.978	37.907	15.024	46.067	71.611	85.543
6	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	45.850	-14.472	40.046	65.574	77.863
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-37.718	35.686	61.646	74.222
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.878	37.497	56.567	67.852
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	49.610	49.349	57.107	63.264
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.655	59.572	59.759	60.885
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.431	66.406	62.302	59.874
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.576	70.314	63.998	59.489
11		12	13							
1	155.000	34.000	0.0							
2	131.137	59.023	0.0							
3	112.769	81.575	0.0							
4	100.559	96.241	0.0							
5	91.669	102.573	0.0							
6	84.297	59.779	0.0							
7	81.639	84.191	0.0							
8	73.007	72.083	0.0							
9	65.201	61.508	0.0							
10	59.555	52.917	0.0							
11	55.969	46.875	0.0							
12	53.947	43.322	0.0							

Tabela 6.37. - Tensões de Cisalhamento para Pressão Interna de 140,0 Kg/cm² - Unidade Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.0	-9.728	-18.881	-26.711	-32.377	-36.013	-42.128	-51.535	-27.123	-13.752
3	0.0	-15.705	-30.871	-44.700	-55.898	-62.736	-64.209	-59.456	-35.979	-13.239
4	0.0	-18.119	-36.188	-53.851	-69.657	-79.019	-73.440	-57.270	-34.851	-12.855
5	0.0	-16.387	-33.332	-51.495	-71.135	-88.267	-76.971	-50.494	-31.292	-15.025
6	0.0	-10.061	-20.729	-33.244	-50.933	-83.966	-77.554	-41.049	-30.201	-21.122
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-162.996	-49.920	-39.503	-31.348
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-50.409	-45.707	-35.767
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-26.022	-33.820	-30.521
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-14.918	-22.600	-22.557
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-8.556	-13.870	-14.709
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.056	-6.839	-7.510
11		12	13							
2	10.126	31.962	9.0							
3	12.423	28.805	0.0							
4	7.300	18.732	0.0							
5	-0.423	8.088	0.0							
6	-11.675	-3.565	0.0							
7	-24.719	-19.910	0.0							
8	-26.099	-15.465	0.0							
9	-23.076	-13.508	0.0							
10	-18.016	-10.973	0.0							
11	-12.260	-7.712	0.0							
12	-6.421	-4.093	0.0							

Tabela 6.38 - Tensões Principais Míнимas para Pressão Interna de 140,0 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-6.736	-6.308	-5.753	-5.122	-4.372	-4.125	12.842	105.075	132.734	168.948
2	17.734	9.091	0.270	-6.817	-10.933	-9.001	9.202	62.632	104.691	128.120
3	48.314	34.739	18.862	3.246	-9.471	-12.409	4.265	43.992	83.181	110.302
4	83.999	68.000	47.719	24.467	-0.062	-15.135	-2.864	33.437	68.664	96.320
5	118.249	106.870	83.044	61.168	22.206	-13.889	-17.196	24.437	55.619	78.786
6	139.889	138.816	135.125	121.766	84.509	-39.088	-70.443	11.228	41.539	61.852
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-40.749	-69.808	3.210	31.131	49.635
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.816	19.961	34.165	47.457
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.407	41.538	44.280	50.347
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.155	56.085	53.422	54.173
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.261	65.169	59.946	57.330
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.556	70.169	63.717	59.186

11 12 13

1	149.376	33.314	0.0
2	106.719	55.754	0.0
3	56.892	78.595	0.0
4	56.319	94.786	0.0
5	91.494	102.517	0.0
6	76.759	58.511	0.0
7	62.896	75.093	0.0
8	58.840	68.683	0.0
9	56.565	59.980	0.0
10	55.197	52.247	0.0
11	54.372	46.652	0.0
12	53.763	43.297	0.0

Tabela 6.39 - Tensões Principais Máximas para Pressão Interna de 140,0 Kg/cm² - Unidade : Kg/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.878	8.110	22.424	42.607	66.868	92.515	124.294	167.845	181.077	184.851
2	42.944	55.499	71.961	90.273	109.854	129.712	148.139	155.466	150.248	145.396
3	78.889	92.824	109.309	125.838	149.914	151.199	153.032	144.798	132.112	119.925
4	111.063	124.036	138.033	150.942	160.846	161.099	148.814	131.623	118.701	108.103
5	146.717	152.276	158.722	164.707	169.563	155.399	132.478	113.741	108.854	107.064
6	196.373	190.023	177.347	164.287	160.496	123.341	108.254	96.035	104.375	108.694
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.749	97.333	101.937	109.169	109.576
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	139.122	124.187	115.880	108.708
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	136.638	125.198	115.528	106.172
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	135.431	123.962	113.385	103.365
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.745	122.501	111.187	100.977
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	134.377	121.621	109.808	99.507

	11	12	13
1	174.686	127.129	0.0
2	148.905	129.615	0.0
3	130.843	128.974	0.0
4	117.787	127.146	0.0
5	112.177	125.618	0.0
6	114.019	126.960	0.0
7	106.412	92.787	0.0
8	99.949	87.513	0.0
9	96.321	86.025	0.0
10	93.940	85.489	0.0
11	92.341	85.281	0.0
12	91.448	85.223	0.0

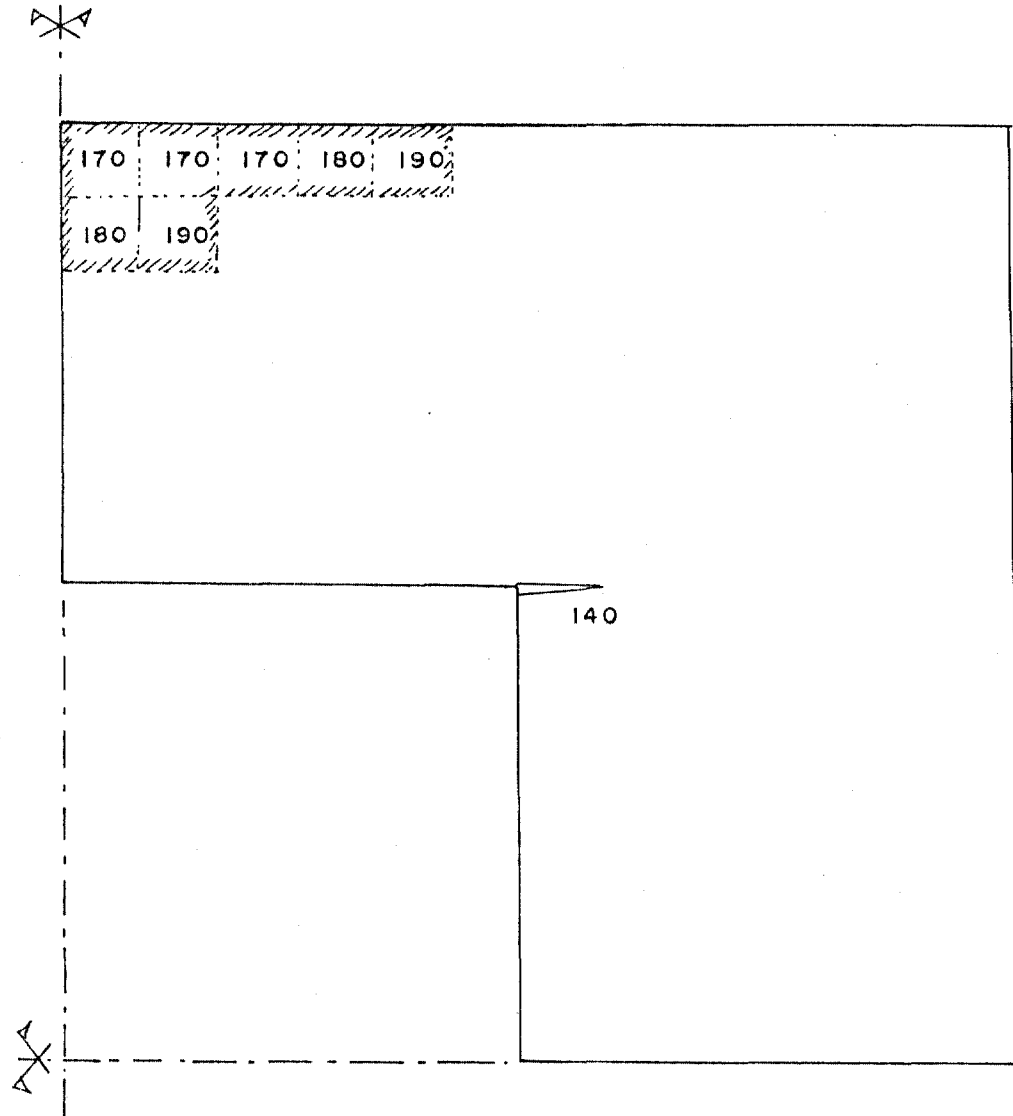


FIGURA 6.38- Esquema de Fissuração do Modelo de IPEN para Diversas Pressões Internas.

Na ocasião do ensaio, observamos um vazamento de água na superfície externa, em uma pressão interna de aproximadamente $150,0 \text{ kg/cm}^2$, molhando-se inclusive os "strain-gauges" colados no vaso, perdendo-se assim a confiabilidade da leitura dessas informações.

O esquema de fissura previsto pelo PV2-A, a partir da pressão interna de $140,0 \text{ kg/cm}^2$ está apresentado na Figura 6.38; onde é mostrado uma fissura horizontal no canto interno, em uma pressão de $140,0 \text{ kg/cm}^2$. A partir de $170,0 \text{ kg/cm}^2$ surgiram as primeiras fissuras radiais nas superfícies superiores da laje. As fissuras horizontais no canto interno foram constatadas pelos corpos de prova retirados do próprio vaso, após o término do ensaio.

6.5- Conclusões e Recomendações Finais

Dentre os fatores que influenciam na deformação da estrutura, citados na Seção 6.3 do Capítulo 6, o módulo de elasticidade representa fator preponderante.

O resultado do ensaio uniaxial do concreto para determinação do módulo de elasticidade, segundo o relatório do ISMES, variou de 350.000 kg/cm^2 a 370.000 kg/cm^2 . Entretanto, para estruturas fortemente confinadas como os vasos de concreto protendido, o estado de tensões é triaxial, e sabe-se que o módulo de elasticidade para o estado triaxial de tensões é maior que os módulos obtidos a partir de

carregamentos uniaxiais /*/ .

O valor inicial médio adotado para o cálculo, levando-se em conta, as observações da Referência /*/ e rigidez dos cabos de protensão, foi de 410.000 kg/cm^2 . Os valores das deformações do modelo na região equatorial (região onde ocorre maior deformação), apresentaram resultados 20,7% menores em relação ao PV2-A e 17,4% em relação ao FEAST-1 (pressão interna de 70 kg/cm^2).

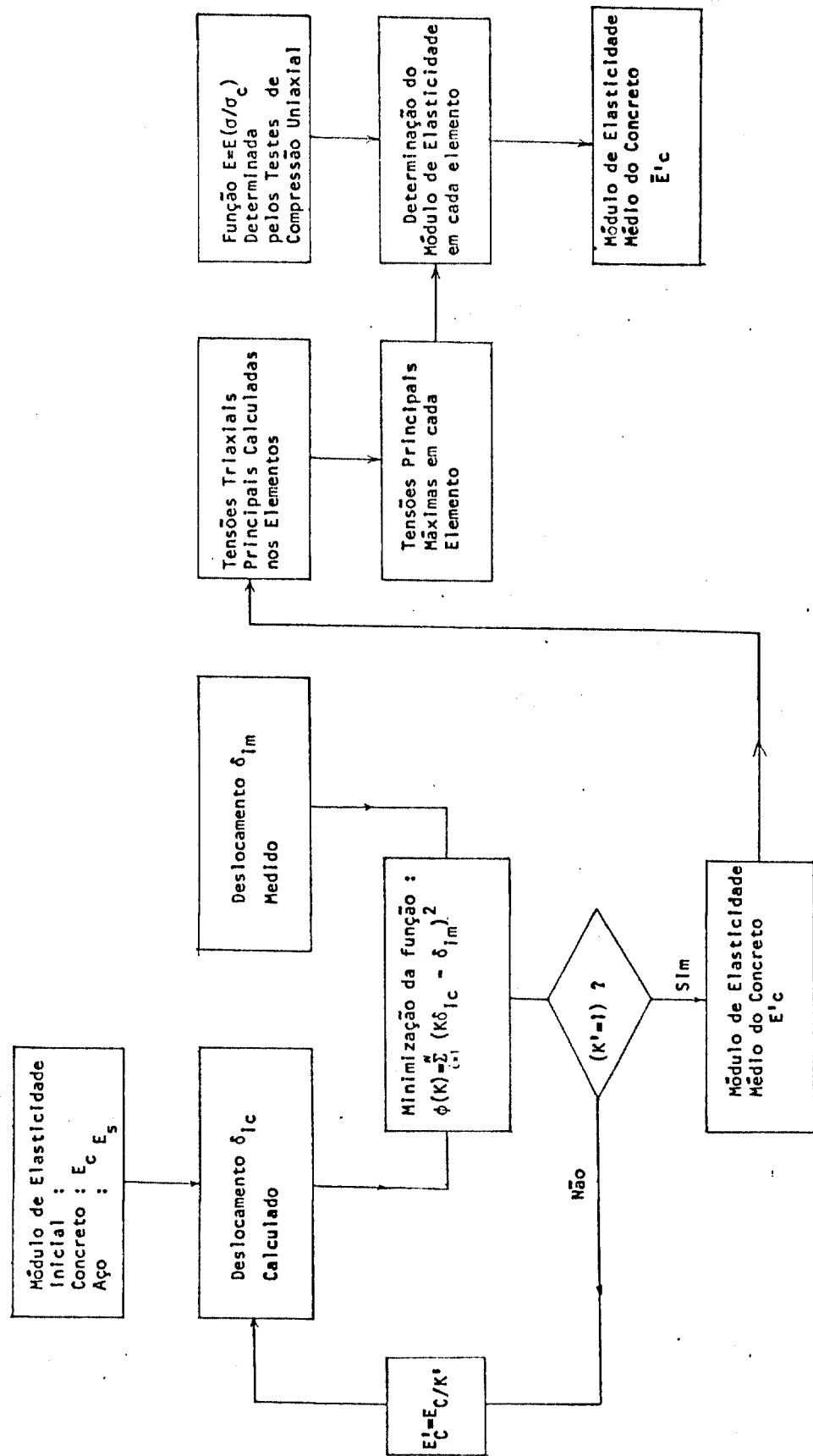
No caso do modelo do IPEN, o módulo de elasticidade, obtido a partir dos ensaios uniaxiais, realizados na firma S. A. Falcão Bauer, apresentou um valor médio de 350.000 kg/cm^2 . O valor inicial médio, adotado para o cálculo, levando-se em conta, as observações do SMITH e a rigidez dos cabos de protensão foi de 450.000 kg/cm^2 , e os resultados da deformação medida na região equatorial apresentaram-se 5,5% menores que os calculados por PV2-A (pressão interna de 90 kg/cm^2).

A dificuldade de escolha do valor do módulo de elasticidade é ainda reforçada pela variação do mesmo em toda a estrutura.

A fim de contornar essa dificuldade, recomenda-se a adoção de um módulo de elasticidade obtido através do método iterativo, descrito na Referência/15/. Pela comparação sucessiva dos deslocamentos do modelo físico e modelo matemático, obtem-se um valor normalizado para o módulo. A Figura 6.39 apresenta uma sequência lógica desse processo.

/*/ SMITH, J.R., Problems in assessing the correlation between the observed and predicted behaviour of models; Proceedings of the Conference organized by The British Nuclear Energy Society in London 10-11 July, 1969.

Figura 6.39 - Processo de Determinação do Módulo de Elasticidade Médio do Concreto.



Apesar que a influência de tal parâmetro sobre o estado de deformação é bastante significativa, o mesmo não acontece com o estado de tensão.

O comportamento dos modelos de ISMES e IPEN apresentou grande semelhança entre si, e os modelos teóricos, de fato, são capazes de prever esse comportamento.

Conclui-se que os programas computacionais utilizados são satisfatórios para dimensionamento dos modelos, possibilitando assim, a definição de geometrias e prevenção das regiões frágeis que deverão ser reforçadas pela utilização de armaduras passivas, além de indicar as sequências de protensão, de forma a não produzir tensões de tração em nenhuma região do vaso. O programa PV2-A, além disso, permite uma análise do comportamento da estrutura fissurada, que é muito útil para previsão e simulação do comportamento da estrutura na ruína. Por outro lado, o FEAST-1 não foi adaptado para análise de estruturas de concreto e apresenta melhor eficiência para estruturas metálicas.

No tocante aos aspectos operacionais dos dois programas utilizados, os seguintes comentários são tecidos:

A introdução dos dados de entrada no FEAST-1 é muito simples, e o tempo de processamento é pequeno. Isto não ocorre com o PV2-A, devido ao problema de ajuste dos parâmetros de convergência do programa, pela escolha do fator de amortecimento viscoso e tempo de iteração, requer muitas iterações, principalmente num regime de fissura estabilizada, causando conseqüentemente, um aumento no tempo de processamento do programa. Nesses casos, recomenda-se a solução "passo a passo", utilizando-se uma fita para gravação dos valores iniciais para o primeiro passo. Dessa forma, economiza-se o tempo do computador, pois o campo de variação dos valores dentro de um passo será relativamente pequeno e, por conseguinte, apenas um pequeno número de iterações será necessário para a convergência dos problemas tratados.

Uma desvantagem adicional do PV2-A é que ele utiliza somente elementos retangulares e, portanto, há casos, como nos contornos esféricos, onde a superfície é simulada por meio de aproximações por linhas em zigue-zague. Isto não acontece no caso do FEAST-1, pois este permite o uso de elementos triangulares e, portanto, tais contornos são aproximados por linhas poligonais.

A grande vantagem do programa PV2-A é a de permitir a variação dos esforços de protensão pela deformação da estrutura; o mesmo não acontecendo com o FEAST-1. Recomenda-se uma adaptação no FEAST-1, para consideração desse efeito.

A outra vantagem do PV2-A é a impressão, em saída dos resultados, na forma matricial, dispostos conforme o corte vertical da estrutura, dando um aspecto visual facilmente compreensível. No caso do FEAST-1, os resultados são apresentados ordenados por nós, o que não permite uma visualização imediata.

Recomenda-se aperfeiçoar tanto o PV2-A como o FEAST-1 pela adaptação de sub-rotinas para traçar curvas de isotensão e plotagem das tensões principais, melhorando-se, ainda mais os aspectos de visualização dos resultados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. ANS topical meeting gas-cooled reactors: HTGR and GCFBR, May 7-10, 1974, Gatlinburg Tennessee. Oak Ridge, Tenn. 1974 (CONF-740501).
2. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME boiler and pressure vessel code an American National Standard. Section III. Rules for construction of nuclear power plant components. Division 2. Code concrete reactor vessels and containments. Jul. 1, 1972. (ASME-BPV-III-2).
3. ANDERSEN, S.I. & OTTOSEN, N.S. Ultimate load behaviour of PCRV top closures. Theoretical and experimental investigations: reprints of the 2nd international conference on "Structural mechanics in Reactor Technology", Berlin, Germany 10-14 September, 1973, v.3, Pt. H. sem local, editor e data.
4. ANDERSEN, S.I.; HAMRE, E.; TARANTI, T. The Scandinavian PCRV project: stress calculation and experimental verification: proceedings of the first international conference on "Structural mechanics in Reactor Technology", Berlin, Germany 20-24 September, 1972. v.4, Pt. H. sem local e data.
5. BEAUJOINT & GUERY, A. Experience in operation and inspection of prestressed concrete pressure vessels belonging to electricite de France. In: EXPERIENCE in the design, construction, and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read at conference held in York, England, 8-12 September, 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p. 457-64. (IMEche conference publication, 8).
6. BRITISH NUCLEAR ENERGY SOCIETY. Model techniques for prestressed concrete pressure vessels: proceedings of the conference on... held in London 10-11 July, 1969. London, 1969.
7. BURROW, R.E.D. & WILLIAMS, A.J. Hartlepool. AGR reactor pressure vessel. Nucl. Eng. Int., 14(162):973-80, Nov. 1969.

8. CALLAHAN, J.P.; CANONICO, D.A.; RICHARDSON, M.; CORUM, J.M.; DODGE, W.G.; ROBINSON, G.C.; WHITIMAN, G.D. Prestressed concrete reactor vessel thermal cylinder model study. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Jun. 1977. (ORNL/TM-5613).
9. CARMICHEL, G.D.T. & HORNBY, I.W. The strain behavior of concrete in prestressed concrete pressure vessels. Mag. Concr. Res., 25(82):5, Mar. 1973 apud GREENSTREET, W.L.; OLAND, C.B.; CALLAHAN, J.P.; CANONICO, D.A. Feasibility study of prestressed concrete pressure vessels for coal gasifiers. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Aug. 1977. p.31. (ORNL-5312).
10. CHARLTON, T.M. Model analysis of structures spon. London, sem editor, 1954.
11. CORUM, J.M. & SMITH, J.E. Use of small model in design and analysis of prestressed-concrete reactor vessels. Oak Ridge, Tenn. Oak Ridge National Laboratory, May 1970. (ORNL-4346).
12. DAVIDSON, I. The analysis of cracked structures. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1974. (IEA-Pub-337).
13. DAVIDSON, I. Response of structures to seismic excitation. J. Br. Nucl. Energy Soc., 12:257-60, 1973.
14. DAVIDSON, I.; BASTOS, M.R. de A.; CAMARGO, P.B. de O método da relaxação dinâmica na análise estrutural de vasos de pressão de concreto. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1977. (IEA-Pub-471).
15. FANELLI, M.; RICCIONI, R.; ROBUTTI, G. Finite element analysis of PCPV. Bergamo, Instituto Sperimentale Modelli e Strutture, 1974.
16. FAYA, S.C.S. Estudo do comportamento térmico e mecânico do envoltório de tório metálico em reatores rápidos refrigerados por gás. São Paulo, 1975. (Dissertação de mestrado, Escola Politécnica. Universidade de São Paulo).
17. FILONENKO-BORODICH, M. Theory of elasticity. Moscow, Pea-
ce, 1963.

18. FUMAGALLI, E. & VERDELLI, G. Small scale model of PCPV for high temperature gas reactors. Modelling criteria and typical results. Bergamo, Instituto Sperimentale Modelli e Strutture, Oct. 1974.
19. FURNAS, Preliminary facility description and safety analysis report, v.2. sem local, 1972. (Furnas. Centrais Elétricas. Usina Nuclear de Angra . Unidade nº 1).(FURNAS-72/1/v.2).
20. GARCEZ, L.N. Elementos de mecânica dos fluidos: hidráulica geral. 2. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1960.
21. GENERAL ATOMIC DIVISION. Prestressed concrete reactor vessel model 1. San Diego, Calif., Oct. 1966 (GA-7097).
22. GENERAL ATOMIC DIVISION. Prestressed concrete reactor vessel model 2. San Diego, Calif., Nov. 1966. (GA-7150).
23. GLASSTONE, S. & SESONSKE, A. Nuclear reactor engineering. Princeton, N.J., Van Nostrand, 1967.
24. GOODJOHN, A.J. Large HTGR design status. San Diego, Calif., General Atomic Division, 1970. (GA-10017).
25. GOODPASTURE, D.W.; BURDETTE, E.G.; CALLAHAN, J.P. Design and analysis of multicavity prestressed concrete reactor vessels. Nucl. Engng. Des., 46:81-100, 1978.
26. GREENSTREET, W.L.; OLAND, C.B.; CALLAHAN, J.P.; CANONICO, D.A. Feasibility study of prestressed concrete pressure vessels for coal gasifiers. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, Aug. 1977. (ORNL-5312).
27. HANNAH, I.W. Prestressed concrete pressure vessels in the United Kingdom. In: EXPERIENCE in the design, construction, and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read at conference held in York, England, 8-12 September 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p.1-8 . (IMEche conference publication, 8).

28. HARVEY, J.F. Pressure vessel designs: nuclear and chemical applications. Princenton, N.J., Van Nostrand 1963.
29. HAY, J.D. & EADIE, D.M. The prestressed concrete pressure vessels for Hinkley Point 'B' and Hunterston 'B'. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advanced and high-temperature gas-cooled reactors: proceedings of a symposium on...held in Jülich, 21-25 October, 1968. Vienna, 1969. p.501-16. (Proceedings series).
30. HIGARA, K.L. TAKEMORI, T.; TERADA, K.; MOGAMI, WATANABE, K.; SATAKE, M. Summary of experimental investigations on the wedge winding method for prestressing cylindrical concrete pressure vessel structures. Nucl. Eng. Des. 22:124-37, 1972.
31. HOLLAND, J.A. Dynamic relaxation applied to local effects. In: UDALL, M.S., editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on...at Church House, Westminster, S.W.I., 13-17 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.587-95.
32. HOUGHTON BROWN, A. & DARTON, A.J. The Oldbury vessels. In: UDALL, M.S., editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on ... at Church House, Westminster, S.W.I., 13-17 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.3-11.
33. HRENNIKOFF, A. Solution of problems in elasticity by the framework method. J. appl. Mech., 8:A169-75, 1941.
34. ISTITUTO SPERIMENTALE MODELLI E STRUTTURE. Differenti soluzioni di un contenitore in C.A.P. per un reattore nucleare tipo "B.W.R." Bergamo, 1974. (Pratica, 1017).
35. ISTITUTO SPERIMENTALE MODELLI E STRUTTURE. Static tests on a continuous 1:10 scale model prestressed concrete pressure vessel for "BWR" nuclear reactor (Model Scandy SC-8). Bergamo, 1975.

36. JONES, W.C. & TAYLOR, S.J. Construction of the PCPVs at Hinkley Point "B" and Hunterston "B". In: EXPERIENCE in the design, construction, and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read at conference held in York, England, 8-12 September, 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p. 271-7. (IMEche conference publication, 8).
37. LAMIRAL, G.; BONELLE, R.; VAUJOUR, J.A.; ROUGIER, A. Pressure vessels for electricité de France nuclear power stations. In: UDALL, M.S., editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on...at Church House, Westminster, S.W.I., 13-17 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.29-33.
38. LEONHARDT, F. Prestressed concrete. 2. ed. Berlin, Ernst & John, 1964.
39. LIVESLEY, R.K. Métodos matriciales para cálculo de estructuras. Madrid, Blume, 1970.
40. MCHENRY, D. A lattice analogy for the solution of plane stress problems. Proc. Instn. civ. Engrs, 21(2):59-82, 1943-44.
41. MACKEN, T.; DEE, J.B.; DAVIDSON, I. PCRV design and development for the GCFR. In: EXPERIENCE in the design, construction and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read at conference held in York, England, 8-12 September, 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p.489-97. (IMEche conference publication, 8).
42. MASON, J. & SOUZA, J.M. Métodos de energia. Rio de Janeiro, Intenciência, 1976.
43. MELESE-d'HOSPITAL, G. Status report on fast breeder reactors (Whay breeders?). San Diego, Calif., Gulf General Atomic, Jan. 1971. (GA-10171).
44. MELESE-d'HOSPITAL, G. & DEE, J.B. Gas-cooled fast breeder reactor designs. San Diego, Calif., Gulf General Atomic, Jan. 1972. (GA-10325).

45. MELESE-d'HOSPITAL, G. & MEYER, L. Gas-cooled fast breeder developments as seen from the U.S.A. San Diego, Calif., Gulf General Atomic, Oct. 1972. (GULF-GA-A-12316).
46. NEYLAN, A.J.; BARKER, R.A.; DEARDORFF, A.F. Leaktightness in HTGRs-experience at Fort St. Vrain. In: EXPERIENCE in the design, construction, and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read at conference held in York, England, 8-12 September, 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p.179-84. (IMEche conference publication, 8).
47. NORTHUP, T.E. The ACI-ASME code for concrete reactor vessels and containments (USA). In: EXPERIENCE in the design, construction, and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read to conference held in York, England, 8-12 September, 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p.125-31. (IMEche conference publication, 8).
48. NORTHUP, T.E. Pressure and temperature tests and evaluation of a model prestressed concrete pressure vessel. San Diego, Calif., Gulf General Atomic, Sep. 1969. (GA-9673).
49. OPLE JR., F.S. & GOTSCHALL, H.L. Fort St. Vrain unit 1 PCRV pressure test report for the public service. San Diego, Calif., Gulf General Atomic, Dec. 1971. (GULF - GA-A-10839).
50. OPLE JR., F.S. & NEYLAN, A.J. Construction, testing, and initial operation of Fort St. Vrain PCRV. In: EXPERIENCE in the design, construction, and operation of prestressed concrete pressure vessels and containments for nuclear reactors: papers read at conference held in York, England, 8-12 September 1975. London, Mechanical Engineering, 1976. p.291-304. (IMEche conference publication, 8).

51. ORR, R.S. & HOLLAND, D.A. Theoretical analysis of model spherical vessel. In: UDALL, M.S. editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on...at Church House, Westminster, S.W.I., 13-17 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.339-48.
52. OTTER, J.R.H. Computations for prestressed concrete reactor pressure vessels using dynamic relaxation. Nucl. Struct. Engng, 1:61-75, 1965.
53. OTTER, J.R.H.; CASSELL, A.C.; HOBBS, R.E. Dynamic relaxation. Proc. Instn. civ. Engrs., 35:633-56, 1966.
54. PROGRAM "Feast 1-65": user's manual. Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Technology. Department of Civil Engineering, May 1967.
55. PRZEMIENIECKI, J.S. Theory of matrix structural analysis. New York, N.Y., McGraw-Hill, sem data.
56. RACHID, Y. & ROCKENHAUSER, W. Pressure vessel analysis by finite element techniques. San Diego, Calif., General Atomic, Division, Feb. 1967. (GA-7810).
57. ROCKEY, K.C.; EVANS, H.R.; GRIFFITHS, D.W.; NETHERCOT, D.A. The finite element method: a basic introduction. London, Crosby Lockwood Staples, sem data.
58. SCOTTO, F. Thin-walled prestressed concrete pressure vessel for high temperature reactors: Experimental investigations on three 1:20 scale PCPV models and design philosophy proposals. In: SECOND international conference on structural mechanics in reactor technology, Berlin, September 1973. sem local, editor e data apud SCOTTO, F. L. Triaxial state of stress "Thin Walled" PCPV for HTGR. Comparison with a conventional "Thick Solution". Bergamo, Istituto Sperimentale Modelli e Strutture, Oct. 1974. p.2.
59. SHAMES, I.H. Mechanics of fluids. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1962.

60. SOKOLNIKOFF, I.S. Mathematical Theory of elasticity. 2. ed. New York, N.Y., Mc-Graw-Hill, 1956.
61. STEWART, H.B.; RICKARD, C.L.; MELESE, G.B. Gas-cooled reactor technology. San Diego, Calif., Gulf General - Atomic, Dec. 1966. (GA-6756).
62. SWART, F.E. & KANTOR, M.E. Preoperational and Startup testing experience at Fort St. Vrain Nuclear Generating Station. San Diego, Calif., Gulf General Atomic Project, Sep. 1972. (GULF-GA-A12244).
63. TATE, L.A. & SMITH, J.R. Design of vessel penetrations correlation of theory and practice. In: UDALL, M.S., editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on...at Church House, Westminster, S.W.I., 13-17 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.555-62.
64. TAYLOR, R.S. The Wylfa vessels. In: UDALL, M.S., editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on... at Church House, Westminster, S.W.I., 13-17 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.13-9.
65. TIMOSHENKO, S. & GOODIER, J.N. Teoria de la elasticidad. 2. ed. Bilbao, URMO, 1934.
66. TURNER, M.J.; CLOGH, R.W.; MARTIN, H.C.; TOPP, L.J. Stiffness and deflection analysis of complex structures. J. aeronaut. Science, 23(9):805-23, 1956.
67. VENÂNCIO, F. Análise matricial de estruturas. Rio de Janeiro, Interciência, 1976.
68. WARNER, P.C. The Dungeness B vessels. In: UDALL, M.S., editor. Prestressed concrete pressure vessels: conference on...at Church House, Westminster, S.W.I., 13-16 March, 1967. London, The Institution of Civil Engineers, 1968. p.21-7.
69. ZERNA, W.; SCHNELLENBACH, G.; SCHIMMELPEENNING, K. Construction and calculation of three-dimensional structures with particular reference to prestressed concrete pressure vessels. Bergamo, Instituto Sperimentale Modelli e Strutture, 1974.

70. ZIENKIEWICZ, O.C. The finite element method in engineering science. London, McGraw-Hill, 1971.

APÊNDICE A - Equações Usadas no Programa PV2-A, Pelo Método da Relaxação Dinâmica

A nomenclatura utilizada é a seguinte:

A_{ij} - Tensão horizontal
 B_{ij} - Tensão circunferencial
 C_{ij} - Tensão vertical
 T_{ij} - Tensão de cisalhamento
 i, j - Coordenada do bloco
 U_{ij} - Velocidade radial
 W_{ij} - Velocidade vertical
 WT_{ij} - Velocidade vertical acima da fissura
 DU_{ij} - Deslocamento radial
 DW_{ij} - Deslocamento vertical
 DWT_{ij} - Deslocamento vertical acima da fissura
 ΔR_j - Dimensão radial do bloco
 ΔZ_i - Dimensão vertical do bloco
 P_{ij} - Força distribuída horizontal
 Q_{ij} - Força distribuída vertical

As constantes são:

K = Coeficiente de amortecimento
 E = Módulo de elasticidade
 ν = Coeficiente de Poisson
 ρ = Densidade
 Δt = Intervalo de tempo
 $G1 = \frac{1-K/2}{1+K/2}$
 $G2 = \frac{\Delta t}{\rho+K/2}$

$$G3 = \frac{G2}{\frac{1}{\Delta R_j^2} + \frac{1}{\Delta Z_i^2}}$$

$$G4 = \frac{E \cdot \Delta t \cdot \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$G5 = \frac{E \cdot \Delta t}{2(1+\nu)}$$

$$G6 = \frac{E \cdot \Delta t (1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$G7 = \frac{E \cdot \Delta t}{1-\nu^2}$$

A Figura A.1 mostra a convenção de sinal adotada no programa (positivo no sentido indicado), para um bloco definido pela linha i e coluna j .

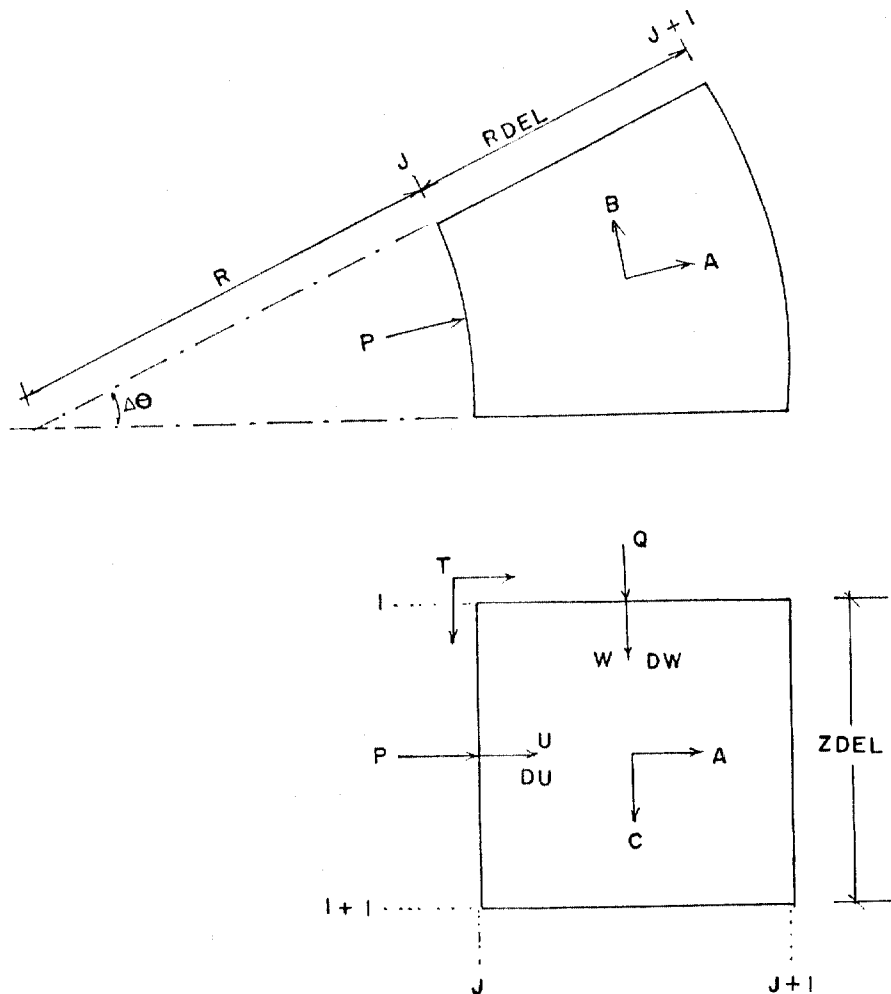
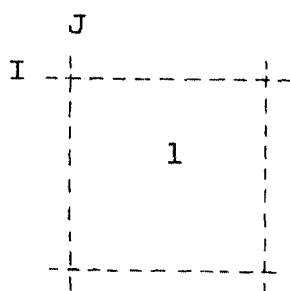


FIGURA A.1- Convenção de Sinal para um Bloco Normal

Apresentamos a seguir, a relação de todas as equações usadas, juntamente com os códigos numéricos das correspondentes condições de contorno.

Os índices a e b se referem, respectivamente, após e antes da iteração.

- Bloco Normal:



$$A_{ij}^a = A_{ij}^b + G_6 \left[\frac{U_{ij} - U_{ij+1}}{R_j} \right] - G_4 \left[\frac{U_{ij} + U_{ij+1}}{2R + RDEL} \right] + G_4 \left[\frac{W_{ij} - W_{i+1,j}}{ZDEL} \right]$$

$$B_{ij}^a = B_{ij}^b + G_4 \left[\frac{U_{ij} - U_{ij+1}}{R_j} \right] - G_6 \left[\frac{U_{ij} + U_{ij+1}}{2R + RDEL} \right] + G_4 \left[\frac{W_{ij} - W_{i+1,j}}{ZDEL} \right]$$

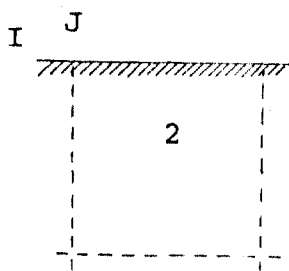
$$C_{ij}^a = C_{ij}^b + G_4 \left[\frac{U_{ij} - U_{ij+1}}{R_j} \right] - G_4 \left[\frac{U_{ij} + U_{ij+1}}{2R + RDEL} \right] + G_6 \left[\frac{W_{ij} - W_{i+1,j}}{ZDEL} \right]$$

$$T_{ij}^a = T_{ij}^b + G_5 \left[\frac{U_{i-1,j} - U_{ij}}{ZDEL} + \frac{W_{ij-1} - W_{ij}}{RDEL} \right]$$

$$U_{ij}^a = G_1 \cdot U_{ij}^b + G_3 \left[\frac{P_{ij} + A_{i,j-1} - A_{ij}}{RDEL} - \frac{A_{ij-1} + A_{ij} - B_{ij-1} - B_{ij}}{2R} \right. \\ \left. + \frac{T_{ij} - T_{i+1,j}}{ZDEL} \right]$$

$$W_{ij}^a = G_1 \cdot W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j} - C_{ij}}{ZDEL} + \frac{R \cdot T_{ij} - (R + RDEL) \cdot T_{ij+1}}{(R + RDEL/2) RDEL} \right]$$

- Fronteira Superior:

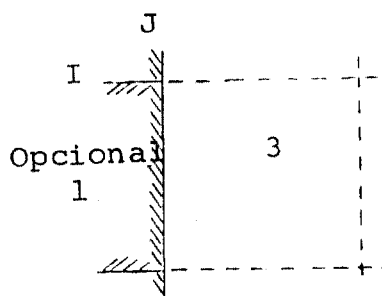


$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, U_{ij} = \text{normal}$$

$$T_{ij} = 0$$

$$W_{ij}^a = W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} - C_{ij}}{ZDEL} \right] * 2$$

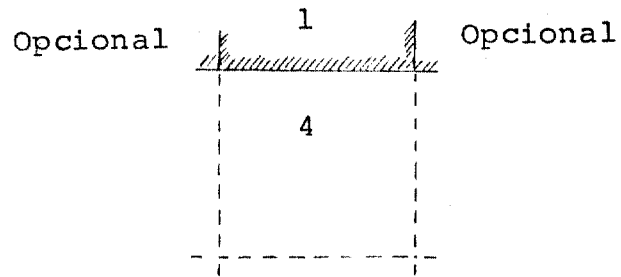
- Bloco com Fronteira à Direita:



$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, T_{ij}, W_{ij} = 0$$

$$U_{ij}^a = G_1 U_{ij}^b + G_3 \left[\frac{P_{ij} + A_{ij-1}}{ZDEL} - \frac{A_{ij-1} - B_{ij-1}}{2R - RDEL/2} \right] * 2$$

- Bloco com Fronteira Inferior:



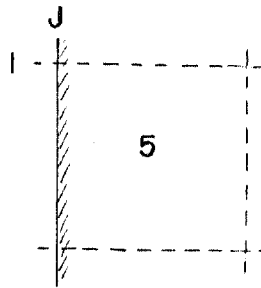
$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = 0$$

$$T_{ij} = 0$$

$$U_{ij} = 0$$

$$W_{ij}^a = G_1 W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j}}{ZDEL} \right] * 2$$

- Bloco com Fronteira à Esquerda:

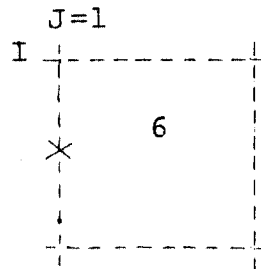


$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$$

$$T_{ij} = 0$$

$$U_{ij}^a = G_1 \cdot U_{ij}^b + G_3 \left[\frac{P_{ij} - A_{ij}}{RDEL} - \frac{A_{ij} - B_{ij}}{2R + RDEL/2} \right] * 2$$

- Bloco Normal no Eixo Polar :



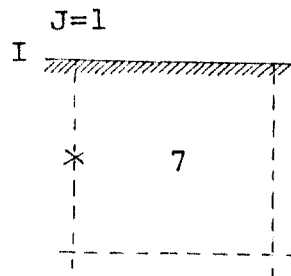
$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

$T_{ij} = 0$

$U_{ij} = 0$

$W_{ij} = \text{normal}$

- Bloco com Fronteira Superior no Eixo Polar:



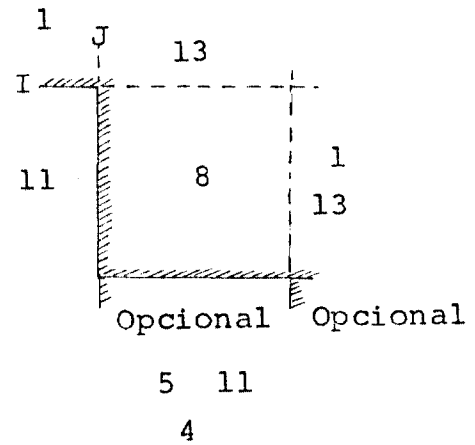
$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

$T_{ij} = 0$

$U_{ij} = \text{código 6}$

$W_{ij} = \text{código 2}$

- Canto Interno Saliente:



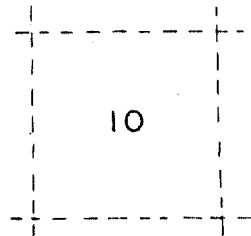
$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

$$T_{ij}^a = T_{ij}^b + 0,33 \times G_5 \left[\frac{U_{i-1,j} - U_{ij}}{ZDEL} - \frac{W_{ij-1} - W_{ij}}{RDEL} \right]$$

$$U_{ij}^a = G_1 \cdot U_{ij}^b + G_3 \left[\frac{P_{ij} - A_{ij}}{RDEL} - \frac{A_{ij} - B_{ij}}{2 \cdot R + RDEL/2} + \frac{T_{ij}}{2 \cdot ZDEL} \right] * 2$$

$$W_{ij}^a = G_1 \cdot W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j} - C_{ij}}{ZDEL} - \frac{R \cdot T_{ij} - 2(R+RDEL) \cdot T_{i,j+1}}{(2 \cdot R + RDEL) RDEL} \right]$$

- Bloco Vazio:



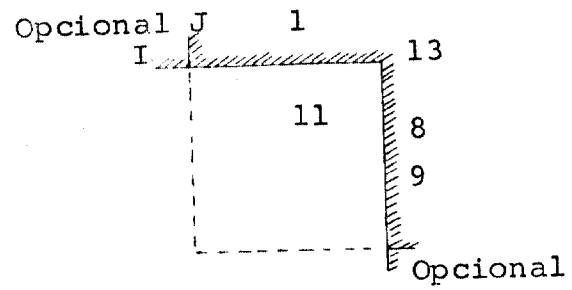
$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = 0$

$$T_{ij} = 0$$

$$U_{ij} = 0$$

$$W_{ij} = 0$$

- Canto Interno Vazio:



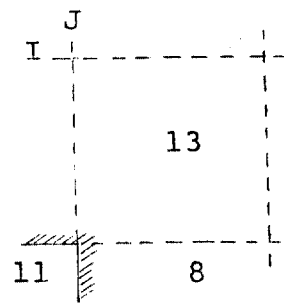
$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = 0$$

$$T_{ij} = 0$$

$$U_{ij} = 0$$

$$W_{ij}^a = G_1 \cdot W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j}}{ZDEL} - \frac{(R+RDEL)T_{i,j+1}}{(2R+RDEL)RDEL} \right] * 2$$

- Canto Interno:



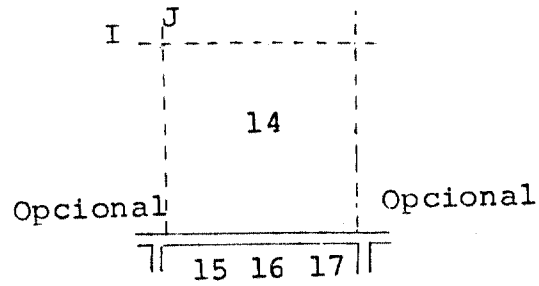
$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$$

$$T_{ij} = \text{normal}$$

$$U_{ij}^a = G_1 U_{ij}^b + G_3 \left[\frac{P_{ij} + A_{i,j+1} - A_{ij}}{RDEL} - \frac{A_{ij-1} + A_{ij} - B_{i,j-1} - B_{ij}}{2 \cdot R} + \frac{2 \cdot T - T_{i+1,j}}{2 \cdot ZDEL} \right]$$

$$W_{ij} = \text{normal}$$

- Superior à Fissura Horizontal:



$$A_{ij}^a = A_{ij}^b + G_6 \left[\frac{U_{ij} - U_{ij+1}}{RDEL} \right] - G_4 \left[\frac{U_{ij} + U_{ij+1}}{2R + RDEL} \right] + G_4 \left[\frac{W_{ij} - WT_{i+1,j}}{ZDEL} \right]$$

$$B_{ij}^a = B_{ij}^b + G_4 \left[\begin{array}{c} " \\ " \end{array} \right] - G_6 \left[\begin{array}{c} " \\ " \end{array} \right] + G_4 \left[\begin{array}{c} " \\ " \end{array} \right]$$

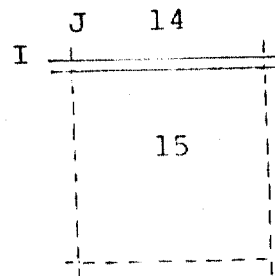
$$C_{ij}^a = C_{ij}^b + G_4 \left[\begin{array}{c} " \\ " \end{array} \right] - G_4 \left[\begin{array}{c} " \\ " \end{array} \right] + G_6 \left[\begin{array}{c} " \\ " \end{array} \right]$$

$$T_{ij} = \text{normal}$$

$$U_{ij} = \text{código 13}$$

$$W_{ij} = \text{normal}$$

- Inferior à Fissura Horizontal



$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$$

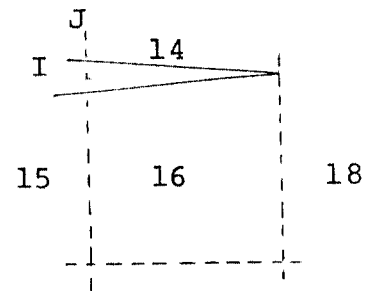
$$T_{ij} = 0$$

$$U_{ij} = \text{normal}$$

$$W_{ij}^a = G_1 * W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} - C_{ij}}{ZDEL} \right] * 2$$

$$WT_{ij}^a = G_1 * WT_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j}}{ZDEL} \right] * 2$$

- Inferior Externo à Fissura Horizontal:



$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

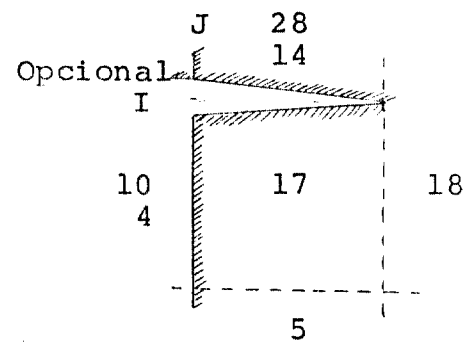
$T_{ij} = 0$

$U_{ij} = \text{normal}$

$$W_{ij}^a = G_1 * W_{ij}^b + G_3 * \left[\frac{Q_{ij} - C_{ij}}{ZDEL} - \frac{(R+RDEL) \cdot T_{i,j+1}}{2 \cdot R + RDEL) RDEL} \right] * 2$$

$$WT_{ij}^a = G_1 * WT_{ij}^b + G_3 * \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j}}{ZDEL} - \frac{(R+RDEL) \cdot T_{ij+1}}{(2 \cdot R + RDEL) (RDEL)} \right] * 2$$

- Fissura Horizontal no Lado Interno da Parede:



$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

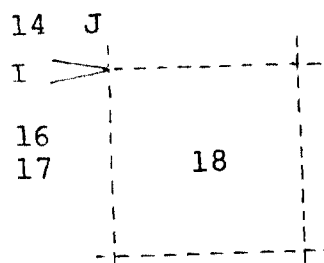
$T_{ij} = 0$

$U_{ij} = \text{código 5}$

$W_{ij} = \text{código 16}$

$WT_{ij} = \text{código 16}$

- Extremidade da Fissura Horizontal:



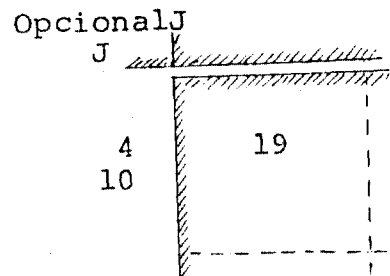
$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

$$T_{ij}^a = T_{ij}^b + G_5 \left[\frac{U_{i-1,j} - U_{ij}}{ZDEL} + \frac{0,5(W_{ij-1} + WT_{ij-1}) - W_{ij}}{RDEL} \right]$$

$U_{ij} = \text{normal}$

$W_{ij} = \text{normal}$

- Fissura Horizontal do Lado Interno da Parede:



$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$

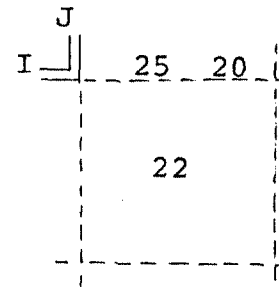
$T_{ij} = 0$

$U_{ij} = \text{código 17}$

$W_{ij} = \text{código 15}$

$WT_{ij} = \text{código 15}$

- Fissura Horizontal no Interior do Cilindro



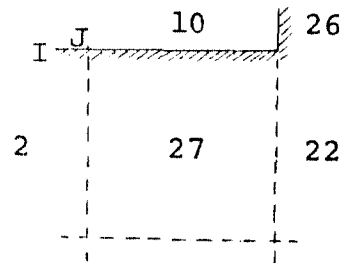
$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$$

$$T_{ij} = \text{código } 8$$

$$U_{ij}^a = G_1 \cdot U_{ij}^b + G_3 \left[\frac{P_{ij} + A_{ij-1} - A_{ij}}{RDEL} - \frac{A_{ij-1} + A_{ij}}{2 \cdot R} \frac{B_{ij-1} - B_{ij}}{2 \cdot ZDEL} + \frac{T_{ij} - 2 \cdot T_{i+1,j}}{2 \cdot ZDEL} \right]$$

$$W_{ij}^a = G_1 \cdot W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j} - C_{ij}}{ZDEL} + \frac{R \cdot T_{ij} - 2(R+RDEL) \cdot T_{ij+1}}{(2 \cdot R + RDEL) \cdot RDEL} \right]$$

- Canto Interno com Fronteira Superior:



$$A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = \text{normal}$$

$$T_{ij} = 0$$

$$U_{ij} = \text{normal}$$

$$W_{ij}^a = G_1 \cdot W_{ij}^b + G_3 \left[\frac{Q_{ij} - C_{ij}}{ZDEL} - \frac{(R+RDEL) \cdot T_{ij+1}}{(2 \cdot R + RDEL) \cdot RDEL} \right] * 2$$

APÊNDICE B: Equações dos Cabos de Protensão Utilizados no Cálculo do Vaso de ISMES, pelo Programa PV2-A

As Figuras B.1 e B.2, representam as curvas de tensão-deformação dos cabos de 7mm e 8mm, respectivamente. Para a dedução das equações dos cabos introduzidas no programa, as curvas acima citadas foram divididas em cinco trechos de retas; e os parâmetros utilizados no cálculo foram resumidos nas Tabelas B.1 e B.2. Os deslocamentos radiais (DU) foram obtidos multiplicando-se os respectivos raios de curvatura dos cabos pela deformação, ajustada na origem zero para força inicial de protensão.

FORÇA (kg)	DEFORMAÇÃO (%)	DESLOCAMENTO RADIAL (10^{-4} cm)		
		R1	R2	R3
4.886,0	0	0	0	0
5.200,0	0,04	204,6	222,6	233,0
6.192,0	0,26	1.330,0	1.446,9	1.514,5
6.501,6	0,40	2.046,0	2.226,0	2.330,0
7.043,4	0,61	3.120,2	3.394,6	3.553,2

Onde: R1 = 51,16 cm

R2 = 55,65 cm

R3 = 58,25 cm

Tabela B.1 - Parâmetros Utilizados no Cálculo das Equações dos Cabos de 7mm de Diâmetro.

FORÇA (kg)	DEFORMAÇÃO (%)	DESLOCAMENTO RADIAL 10^4 cm		
		R1	R2	R3
6.339,0	0	0	0	0
7.800,0	0,15	767,2	834,7	873,7
8.754,8	0,34	1.739,1	1.892,1	1.980,5
8.958,4	0,46	2.352,9	2.559,9	2.679,5
9.120,0	0,64	3.273,6	3.561,6	3.728,0

Tabela B.2 - Parâmetros Utilizados no Cálculo das Equações dos Cabos de 8 mm de Diâmetro.

As equações obtidas para cada trecho de reta , em função do carregamento inicial (PEXT), deslocamento radial (DU) e alongamento (X) são apresentadas a seguir:

a) Equações dos cabos horizontais de 7 mm com raio de curvatura $R1 = 51,15$ cm

Trecho 1 : $DU \leq 0, \quad P = PEXT$

Trecho 2 : $0 < DU \leq 204,6$
 $P = (1 + 3,15 \times 10^{-4} DU) PEXT$

Trecho 3: $204,6 < DU \leq 1,330,$
 $P = (1,0274 + 1,804 \times 10^{-4} DU) PEXT$

Trecho 4: $1330 < DU \leq 2.046,$
 $P = (1,150 + 0,883 \times 10^{-4} DU) PEXT$

Trecho 5: $2046 < DU \leq 3120,2$
 $P = (1,1195 + 1,032 \times 10^{-4} DU) PEXT$

Na Ruptura: $DU > 3120,2, \quad P = 0$

b) Equações dos cabos horizontais de 7 mm, com raio de curvatura $R_2 = 55,65$ cm:

$$\text{Trecho 1 : } DU \leq 0, \quad P = P_{EXT}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 2 : } & 0 < DU \leq 222,6 \\ & P = (1 + 2,887 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 3 : } & 222,6 < DU \leq 1446,9 \\ & P = (1,0273 + 1,658 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 4 : } & 1446,9 < DU < 2226,0 \\ & P = (1,1496 + 0,8135 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 5 : } & 2226,0 < DU \leq 3394,65 \\ & P = (1,1194 + 0,949 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\text{Na Ruptura: } DU > 3394,65, \quad P = 0$$

c) Equações dos cabos horizontais de 7mm , com raio de curvatura , $R_3 = 58,25$ cm:

$$\text{Trecho 1: } DU \leq 0, \quad P = P_{EXT}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 2: } & 0 < DU \leq 233,0 \\ & P = (1 + 2,758 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 3: } & 233,0 < DU \leq 1,514,5 \\ & P = (1,514,5 + 1,585 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 4: } & 1,514,5 < DU \leq 2,330,0 \\ & P = (1,1496 + 0,777 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trecho 5: } & 2,330,0 < DU < 3,553,25 \\ & P = (1,1195 + 0,906 \times 10^{-4} DU) P_{EXT} \end{aligned}$$

d) Equações dos cabos verticais de 8 mm:

$$\text{Trecho 1: } X \leq 0, \quad Q = Q_{EXT} = 6339$$

$$\text{Trecho 2: } 0 < X \leq 0,15 \\ Q = (1 + 1,5365 X) Q_{EXT}$$

$$\text{Trecho 3: } 0,15 < X \leq 0,34 \\ Q = (1,1115 + 0,7928 X) Q_{EXT}$$

$$\text{Trecho 4: } 0,34 < X \leq 0,46 \\ Q = (1,2901 + 0,2677 X) Q_{EXT}$$

$$\text{Trecho 5: } 0,46 < X \leq 0,64 \\ Q = (1,3481 + 0,1416 X) Q_{EXT}$$

$$\text{Na Ruptura : } X > 0,64, \quad Q = 0$$

e) Equações dos cabos horizontais de 8 mm, com raio de curvatura , $R_l = 51,16$ cm

$$\text{Trecho 1: } DU \leq 0, \quad P = P_{EXT} = 6339$$

$$\text{Trecho 2: } 0 < DU \leq 767,25 \\ P = (1 + 3,003 \times 10^{-4} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 3: } 767,25 < DU \leq 1739,1 \\ P = (1,1116 + 1,549 \times 10^{-4} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 4: } 1739,1 < DU \leq 2352,9 \\ P(1,2901 + 5,2328 \times 10^{-5} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 5: } 2352,9 < DU \leq 3.273,6 \\ P = (1,3481 + 2,7688 \times 10^{-5} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Na Ruptura : } DU > 3273,6, \quad P = 0$$

f) Equações dos cabos horizontais de 8 mm, com raio de curvatura, $R_2 = 55,65$ cm:

$$\text{Trecho 1: } DU \leq 0, \quad P = P_{EXT} = 6339$$

$$\text{Trecho 2: } 0 < DU \leq 834,75 \\ P = (1,2761 \times 10^{-4} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 3: } 834,1 < DU \leq 1.892,1 \\ P = (1,1116 + 1,4245 \times 10^{-4} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 4: } 1.892,1 < DU \leq 2559,9 \\ P = (1,2901 + 4,8096 \times 10^{-5} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 5: } 2559,9 < DU \leq 3561,6 \\ P = (1,3481 + 2,5450 \times 10^{-5} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Na Ruptura: } DU > 3561,6, \quad P = 0$$

g) Equações dos cabos horizontais de 8 mm, com raio de curvatura, $R_3 = 58,25$ cm:

$$\text{Trecho 1: } DU \leq 0, \quad P = P_{EXT} = 6.339$$

$$\text{Trecho 2: } 0 < DU \leq 873,75 \\ P = (1 + 2,6378 \times 10^{-4} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 3: } 873,75 < DU \leq 1980,5 \\ P = (1,1116 + 1,3609 \times 10^{-4} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 4: } 1980,5 < DU \leq 2679,5 \\ P = (1,2901 + 4,5949 \times 10^{-5} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Trecho 5: } 2679,5 < DU \leq 3.728,0 \\ P = (1,3481 + 2,4314 \times 10^{-5} DU) P_{EXT}$$

$$\text{Na Ruptura: } DU > 3728,0, \quad P = 0$$

FIGURA B.1- Curva Tensão-Deformação do Cabo de 7 mm

CABO DE PROTENSÃO

