

BR8105274 ✓

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

INIS. W.F. -
6720

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM MODELO DE
V.P.C.P. PARA REATOR NUCLEAR

Celso Vallin

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

Orientador: Dr. J. A. D. Diegues

SÃO PAULO
1980

Ao CIN.

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

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM MODELO DE
V.P.C.P. PARA REATOR NUCLEAR

Celso Vallin

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

Orientador: Dr. J. A. D. Diegues

Celso Vallin
19 FEV 81

SÃO PAULO
1980

AO Bruno Jim Te

Leia-se

quaisquer ...

... δ ...

... e δ é ...

... donde ...

... igual, mas ..

... contrário, ao ...

... o valor encontrado para 10 °C multiplicado
pela nova variação de temperatura ...

... podem ...

... Fig. 4.13. Gráfico de Deslocamentos e Pres-
são Interna ...

... 450.000 kgf/cm² < E < 530.000 kgf/cm² ...

... distoantes ...

... G.C. ...

... G.D. ...

Ordem 30

Dissertação de Mestrado de Celso Vallin

ERRATA

<u>Página</u>	<u>Linha</u>	<u>Onde se Lê</u>
27	15	qualquer ...
51	Fig. 3.6	... σ ...
52	3	... e é ...
52	6	... onde ...
52	10	... igual mas ...
52	10 e 11	... contrário ao ...
53	6	... o valor de temperatura ...
60	7	... pode, ...
78	1	
109	34	... 450.000, $\text{kgf/cm}^2 < e <$ 530.000 kgf/cm^2 ...
110	22	... distantes ...
135	22	... 6.C. ...
135	22	... 6.D. ...
30	Fig. 1.12b	Ordem 31

AGRADECIMENTOS

Ao povo paulista e brasileiro, pelo apoio financeiro às pesquisas de VPCP, dado através do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e da Comissão Nacional de Energia Nuclear .

A meus pais e ao Eng^o Salvador Perrotti pelo aconselho mento e apoio .

À querida Mei En Vallin, pelo incentivo nestes anos de estudos e trabalho .

Aos colegas do Grupo de Pesquisas de VPCP e do Centro ' de Engenharia Nuclear, pela ajuda, orientação e intercambio de conhecimentos e idéias .

À Eni Miyamoto e colegas da equipe científica do CPD , pela orientação estatística .

À Sueli Anselmo Alves Heringer , pela dedicação na apresentação deste trabalho .

A todos que auxiliaram no desenvolvimento desta Disserta ção .

Í N D I C E

	Pag.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Aspectos Gerais de Centrais Nucleares	1
1.2. Reatores Convencionais	4
1.3. Reatores Regeneradores	9
1.4. Reator GCFR de Demonstração de 300 MWe	11
1.4.1. Características Gerais	11
A - Introdução	11
B - Descrição da Usina	12
C - O Sistema Produtor de Vapor.....	14
D - O Balanço da Usina	18
1.4.2. O Vaso de Concreto	19
1.4.2.1. Bases de Projeto	19
A - Operação	19
B - Condições de Acidente	21
C - Requisitos Estruturais	21
1.4.2.2. Dimensões e Características Físicas	22
1.5. Comparação entre VPCP e Vasos de Aço	26
1.6. O Desenvolvimento das Pesquisas de VPCP no IPEN	28
1.7. Objetivos	31
1.8. Desenvolvimento da Dissertação	31
2. O MODELO DE VPCP E TESTES DO IPEN	32
2.1. Introdução	32
2.2. Modelo Físico	32
2.2.1. Descrição dos Modelos	32
2.2.2. Materiais da Construção	34
2.2.3. Protensão dos Modelos	36

2.3. Instrumentação	39
2.3.1. Sensores	39
2.3.2. Sistema de Aquisição de Dados (SAD)	41
2.3.3. Sistema de Pressurização	42
2.3.4. Gráficos	42
3. ESTUDO DAS INTERFERÊNCIAS DA TEMPERATURA NAS MEDIDAS DOS T.D. ...	43
3.1. Introdução	43
3.2. Análise Teórica	43
3.2.1. Dilatação do Fórtico da Instrumentação	44
3.2.2. Dilatação do Modelo	46
3.2.3. Variações nos T.D.	50
3.2.4. Movimentos de Corpo Rígido	51
3.3. Análise Experimental	53
3.4. Comparações e Sugestões	58
4. COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS ESTRUTURAIS CALCULADA E MEDIDA EXPERI- MENTALMENTE.....	62
4.1. Resposta Estrutural Calculada	62
4.1.1. Introdução	62
4.1.2. Cálculo com o FEAST	66
4.1.2.1. A Geometria da Estrutura	66
4.1.2.2. Características Físicas do Concreto	69
4.1.2.3. Diferença de Deslocamentos	75
4.1.2.4. Princípio da Superposição de Efeitos	75
4.1.3. Cálculo com o NONSAP	79
4.1.4. Cálculo com o PV2	79
4.2. Resultados Experimentais	81
4.2.1. Análise e Refinamento Preliminares.....	81
4.2.1.1. Definições	81
4.2.1.2. Valor Corrigido	84

4.2.1.3. Correções Entre Ciclos	84
4.2.1.4. Células de Carga	87
4.2.1.5. Transdutores de Pressão	87
4.2.1.6. "Strain-gages"	87
4.2.1.7. Transdutores de Deslocamentos	91
4.2.2. Estudo da Resposta dos TD na Fase Elástica do Modelo	92
4.2.2.1. Os Ciclos de Pressurização	92
4.2.2.2. A Comparação de Resultados	92
4.2.2.3. Proporcionalidade entre Pressão e Deslocamento	93
A - O ajuste linear pelo SAS	93
B - Gráficos	95
C.- Resultados do 1º ajuste	96
D - Ajuste sem Pontos Intermediários	98
E - Conclusão	101
4.3. Comparação das Respostas	101
4.3.1. Preparação dos Resultados Experimentais	101
4.3.2. Correlação Linear entre Respostas	102
4.3.3. Preparação dos Resultados Teóricos	104
4.3.4. Movimentos de Corpo Rígido	106
4.3.5. Ajuste Linear entre as Respostas Teóricas e Experimentais..	106
A - Tentativas	106
B - Resultados	108
C - Disparidades da Instrumentação em Regiões Diferentes...	110
D - Erros no Cálculo Teórico	111
E - Módulo de Elasticidade	112
4.4. Determinação do Limite de Elasticidade	112
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	131
5.1. Sugestões de Ordem Geral	131
5.2. Ensaio de Corpos de Prova	131
5.3. Instalações	131
5.4. Metodologia de Ensaio	132

5.5. Sensores	132
5.5.1. "Strain-Gages"	133
5.5.2. Outros Sensores	133
5.6. Conclusões	133
5.7. Sugestões de Estudos Futuros	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

ÍNDICE DAS TABELAS

	Pag.
1.1. Potência Mundial Atual e Futura dos Vários Tipos de Reato <u>res</u>	5
1.2. Características Gerais dos Tipos de Reato <u>res</u>	6
1.3. Reato <u>res</u> Nucleares e Potencias de Cada País	6
1.4. Reato <u>res</u> Regeneradores	11
1.5. Condições de Projeto da Usina GCFR de Demonstração	15
1.6. Programas para Cálculo Estrutural à Disposição no Computa <u>dor</u> do IPEN	29-A
1.7. Escalas de Modelos Impostas pela ASME	29-B
2.1. Sequência de Protensão	38
3.1. Parâmetros e Condições Ambientais Usados no Cálculo pelo FEAST	47
3.2. Deslocamentos Resultantes da Variação de Temperatura	47
3.3. Dilatações do Concreto	49
3.4. Variação de Distância entre o Pórtico e o Vaso, causada por um acréscimo de temperatura do Vaso e de seu supor <u>te</u> de Aço	49
3.5. Notas dadas aos Comportamentos de TD	59
4.1. Máximas Tensões Principais Encontradas Para Carregamento Composto por Forças de Protensão e Pressão Interna	77
4.2. Resultados dos Ajustes de Deslocamento Versus Pressão dos Canais.....	100
4.3. Resultados dos Ajustes $y_o = a + b * y_t$	107
4.4. Equivalencia de Ordens e Pontos para os Gráficos das Figu <u>ras</u> 4.26 a 4.45	113
4.5. Resultados dos Ajustes $y_o = b * y_t$	114

ÍNDICE DAS FIGURAS

	Pag.
1.1. Esquema de Usinas Termo-elétrica e Nuclear	1
1.2. Esquemas de Usinas Nucleares	2
1.3. Dimensões de Vaso de Pressão para Diferentes Tipos de Reatores.	8
1.4. Transformações Sofridas pelo Th^{232} e U^{238}	10
1.5. Reator Regenerador Rápido Refrigerado a Gás de 300 MW(e)	13
1.6. Diagrama Simplificado de Fluxo-Usina GCFR de Demonstração	13
1.7. Sistema de Suprimento de Vapor Nuclear da Usina de Demonstração GCFR	16
1.8. Barreira Térmica Classe A do Grande HIGR	20
1.9. Instalação do Isolamento Cerâmico Interno à Parede do VPCP da HIGR de Fort St. Vrain.....	20
1.10. Planta com Disposições Gerais da Usina de Demonstração GCFR de 300 MW(e)	20
1.11. VPCP do GCFR de 300 MW(e)	23
1.12. Ciclos de Pressurização dos Modelos de VPCP do IPENr....	30
2.1. Modelo em Escala 1.20 do VPCP para GCFR de 300 MW(e)	33
2.2. Esquema Simplificado dos Modelos de VPCP SCM.4.1 e SCM 4.2. ...	33
2.3. Esquemas Detalhados dos Modelos SCM 4.1 e SCM 4.2.	35
2.4. Máquina de Protensão dos Modelos 1/20 VPCP	38
2.5. Ancoragens da Protensão Horizontal	38
2.6. Localização dos Sensores no Modelo	40
3.1. Esquema do T.D. e Fixação	44
3.2. Pórtico da Instrumentação	45
3.3. Malha de Nós e Elementos do Pórtico da Instrumentação	48
3.4. Esquema de Dilatação Térmica do Modelo, Seu Suporte e do Pórti- co	49-B
3.5. Interferência Teórica da Variação de Temperatura nos T.D.	50

3.6. Planta Simplificada do Modelo antes e após um Movimento de Translação Horizontal	51
3.7. Interferências Teóricas da Variação da Temperatura (Médias) nos TD	52
3.8. Mapa dos TD, canais e Posições em Torno do Vaso	54
3.9. Comportamento do Canal 2 com o Tempo	55
3.10. Variações de Temperatura com o Tempo	55
3.11. Comportamento do Canal 8 com o Tempo	57
3.12. Comportamento do Canal 50 com o Tempo	57
3.13. Deslocamentos Máximos Total e Diário dos TD	58
3.14. Média dos Deslocamentos Total e Diário dos TD para estudo Experimental	59
3.15. Interferência Teórica da Variação de Temperatura nos TD.....	60
4.1. Forças e Tensões em um Elemento Infinitesimal de volume num Sistema de Coordenadas Cilíndricas	62
4.2. Malhas de Nós e Elementos Usados no Cálculo com o FEAST e NONSAP	67
4.3. Deslocamentos Absolutos Radiais Calculados - Superfície Lateral	71
4.4. Deslocamentos Absolutos Verticais Calculados - Superfícies Horizontais (Superior ou Inferior)	71
4.5. Tensões Radiais em Elementos Laterais	72
4.6. Tensões Verticais nos Elementos das Superfícies Horizontais	72
4.7. Tensões Verticais em Elementos Laterais	73
4.8. Tensões Horizontais em Elementos das Superfícies Horizontais	73
4.9. Tensões Tangenciais nos Elementos Laterais	74
4.10. Tensões Tangenciais nos Elementos das Superfícies Horizontais	74
4.11. Deslocamentos radiais calculados, em Relação ao Carregamento de Protensão + Pressão Interna de 5 kgf/cm^2 - Superfície Lateral.....	76

4.12. Deslocamentos Verticais Calculados, em Relação ao Carregamento de Protensão + Pressão Interna de 5 kgf/cm ² - Superfícies Horizontais	76
4.13. Gráfico de Deslocamentos & Pressão Interna	78
4.14. Comparação de Níveis de Pressão para VPCPs	78
4.15. Comparação dos Deslocamentos Calculados Pelo PV2, FEAST e NONSAP	80
4.16. Posições e Localizações dos TD, Conforme o Canal	83
4.17. Deslocamentos Medidos pelos Canais 78 e 79 para Todas as Ordens	86
4.18. Comportamento da Célula de Carga do Canal 108 Perante as variações de Pressão	86
4.19. Comportamento do "Strain Gage" do Canal 122	89
4.20. Comportamento do "Strain Gage" do Canal 134	89
4.21. Comportamento do "Strain Gage" do Canal 127	90
4.22. Comportamento do "Strain Gage" do Canal 115	90
4.23. Gráfico de Resíduos Versus Deslocamento Ajustado - Ajuste de Deslocamentos Versus Pressão	97
4.24. Curva Típica de Tensão - Deformação do Concreto	96
4.25. Módulos de Elasticidade em Função da Idade e Condições de Unidade	112
4.26. Gráfico de Resíduos Versus Valor Teórico Ajustado	115
4.27. Gráfico de Resíduos Versus Posição	115
4.28. Gráfico de Resíduos Normais Gerados Versus Resíduos	116
4.29. Comparação Gráfica de Deslocamentos Observados e Teóricos Ajustados	116
4.30. Gráficos de Resíduos Versus Valor Teórico Ajustado	117
4.31. Gráfico de Resíduos Versus Posição	117
4.32. Gráfico de Resíduos Normais Versus Resíduos	118
4.33. Comparação gráfica de deslocamentos observados e teóricos Ajustados	118

4.34. Gráfico de Resíduos e Posição	119
4.35. Comparação Gráfica de deslocamentos Observados e teóri cos ajustados	120
4.36. Gráfico de Resíduos Normais Gerados e Resíduos	121
4.37. Gráfico de Resíduos e Posição	122
4.38. Gráfico de Resíduos Normais Gerados e Resíduos	123
4.39. Comparação Gráfica de Deslocamentos Observados e teó ricos Ajustados	124
4.40. Gráfico de Resíduos e Posição	125
4.41. Gráfico de Resíduos Normais Gerados e Resíduos	126
4.42. Comparação Gráfica de Deslocamentos Observados e Teóri co Ajustados	127
4.43. Gráfico de Resíduos e Posição	128
4.44. Gráfico de Resíduos Normais Gerados e Resíduos	129
4.45. Comparação Gráfica de Deslocamentos Observados e Teóri cos Ajustados	130

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM MODELO DE V.P.C.P. PARA REATOR NUCLEAR

RESUMO

⁷²⁻⁶²
É feito um balanço do comportamento de cada conjunto de sensores usado nas medidas de deformações e deslocamentos dos ensaios de um modelo em escala 1/20, simplificado, de Vaso de Pressão de Concreto Protendido (VPCP), realizados no IPEN. Entre os três tipos de sensores usados, "strain gages", células de carga e transdutores de deslocamento (TD), os últimos mostraram melhor comportamento.

Um estudo estatístico dos resultados dos TD, depois de tratados e corrigidos, mostra o comportamento linear da estrutura nos primeiros ensaios. Conclui-se que os resultados da fase elástica são proporcionais aos previstos em cálculo e determina-se a perda de linearidade do modelo entre as pressões de 110 atm e 125 atm, através da relação estatística linear entre resultados teóricos esperados e experimentais observados.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A NUCLEAR REACTOR P.C.P.V. MODEL

ABSTRACT

A comprehensible analysis was made on the performance of each set of sensors used to measure the strain and displacement of a 1/20 scale Prestressed Concrete Pressure Vessel (PCPV) model tested at the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Among the three kinds of sensors used (strain gage, displacement transducers and load cells) the displacement transducers showed the best behavior .

The displacement transducers data was statistically analysed and a linear behavior of the model was observed during the first pressurization tests. By means of a linear statistical correlation between experimental and expected theoretical data it was found that the model loses the linearity at a pressure between 110-125 atm . *author*

1. INTRODUÇÃO

Em 1973, época em que a energia nuclear era praticamente desconhecida no Brasil, embora já estivesse em avançado estágio de desenvolvimento e utilização em mais de 15 outros países, o IPEN se iniciou nas pesquisas de vasos de pressão para reatores do tipo mais avançado de todo o mundo, os regeneradores .

O IPEN, preparou e ensaiou dois modelos em escala reduzida (1:20) do Vaso de Pressão de Concreto Protendido (VPCP) a ser usado num projeto integrado completo de uma Usina de Demonstração de 300 MW(e) tipo GCFR. Este trabalho trata do comportamento estrutural desses modelos de VPCP .

1.1. Aspectos gerais de centrais nucleares

Uma Central de Energia Nuclear se assemelha muito a uma Central de Energia Termo-elétrica convencional. Na Figura 1.1. comparamos duas dessas centrais. A diferença básica está na forma de reação para liberação de energia que é em forma de calor em ambas, pois todo o resto do transporte de energia térmica e transformação em energia elétrica, para permitir a distribuição, é absolutamente idêntico : turbinas, geradores, condensadores e bombas .

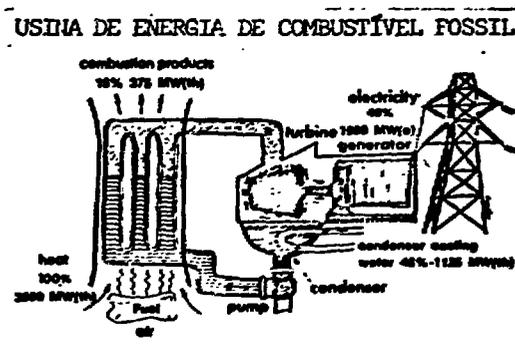


Figura 1.1.a - Esquema de Usina Termo-elétrica /30/

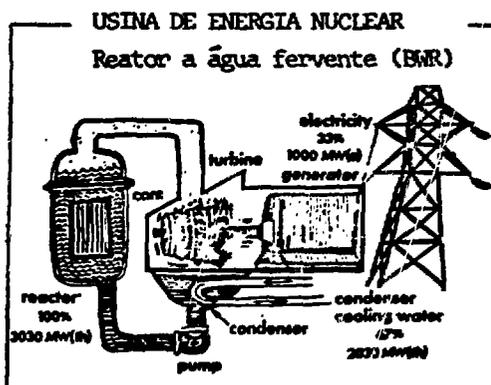
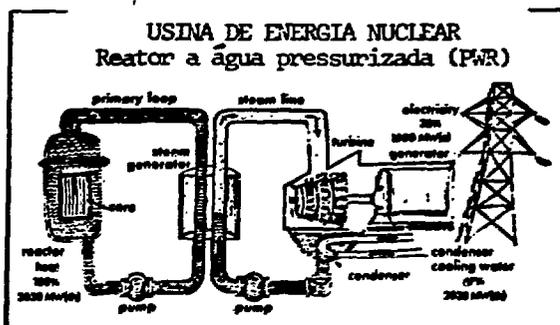
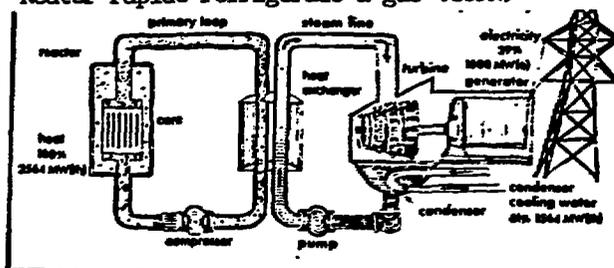


Figura 1.1.b - Esquema de Usina Nuclear



USINA DE ENERGIA NUCLEAR
Reator de alta temperatura refrigerado a gás (HTGR)
Reator rápido refrigerado a gás (GCFR)



USINA DE ENERGIA NUCLEAR
Reator Regenerador Rápido a Metal Líquido (LMFR)

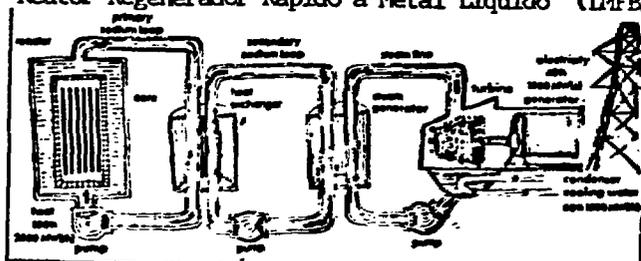


Figura 1.2. - Esquema de Usinas Nucleares /30/ .

É no chamado reator nuclear que ocorre a "queima" ou fissão do combustível nuclear. A fissão nuclear ocorre quando um átomo fissionável é atingido por um neutron com determinadas condições de velocidade e em certas condições de choque. Há choques, chamados elásticos, em que não ocorre a fissão. Como resultado de uma fissão temos a formação de produtos de fissão, liberação de radiações, principalmente β e γ , liberação de 2 a 3 neutrons e a liberação de energia em forma de calor (aproximadamente 180 MeV por núcleo de U^{235}).

A energia liberada, depois de transformada em eletricidade através de um ciclo termodinâmico, com rendimento térmico de 30 a 40%, é aproveitada para satisfazer a demanda da população. Dos neutrons liberados, pelo menos um é usado para manter a reação em cadeia, os demais são absorvidos pelos materiais não físeis, materiais estruturais e blindagens.

O núcleo do reator é constituído basicamente por elementos combustíveis. No caso dos reatores térmicos ou lentos inclui-se ainda o moderador cuja função é diminuir a velocidade dos neutrons livres, facilitando assim a ocorrência dos choques que causarão fissão. Considerando que os reatores rápidos se valem de fissões com neutrons de alta energia cinética, neles não há necessidade de moderador.

Por entre os elementos combustíveis circula um fluido, comumente chamado de refrigerante, que tem a função de retirar do núcleo a energia produzida pela reação nuclear, que se dá nos elementos combustíveis e transportá-la até as turbinas, onde será transformada em energia elétrica.

O vaso de pressão é a estrutura que envolve os componentes principais do reator nuclear: os elementos combustíveis, eventuais elementos moderadores, refrigerante, barras de controle e às vezes até mesmo os trocadores de calor e recirculadores, além de outros componentes secundários. Em condições normais de operação, o vaso de pressão deve suportar as pressões e temperatura do refrigerante, que variam com o tipo e a potência do reator.

1.2. Reatores Convencionais /12/

Conforme o elemento refrigerante usado, o moderador (nos reatores térmicos), o combustível e a faixa de energia média dos neutrons que causarão fissão, podemos ter vários tipos de reatores. A Tabela 1.1 nos dá a visão exata da situação mundial quanto ao tipo de reator. A sua popularidade e desenvolvimento, são expressos pela potência e número de reatores instalados e em construção de cada tipo.

A Tabela 1.2 nos mostra as principais características de cada tipo de reator.

Os reatores tipo PWR, operam na faixa de 140 a 150 atm de pressão de refrigerante, enquanto que nos reatores tipo BWR o refrigerante trabalha na faixa de 70 a 80 atm. Os dois reatores utilizam os mesmos componentes e materiais, mas diferem no arranjo termohidráulico do sistema. Como pode ser observado na Figura 1.1.b., no reator tipo BWR o vapor gerado dentro do vaso de pressão vai acionar a turbina. No caso de um reator tipo PWR, a fim de evitar uma possível contaminação da turbina, utilizam-se dois circuitos independentes: o circuito primário e o secundário, conforme a Figura 1.2. No circuito primário a água atua como refrigerante que devido a alta pressão não se vaporiza. O calor retirado pela água do circuito primário é transferido para a água do circuito secundário no gerador de vapor.

Os reatores brasileiros, Angra I, Angra II, ambos em construção, assim como os demais que se tem em vista, serão do tipo PWR.

Da Tabela 1.1 fica fácil ver que atualmente, e mesmo a médio prazo, os reatores PWR são dos de maior aceitação mundial, comprovando o seu alto grau de desenvolvimento tecnológico. Os BWR, embora haja muitos deles já em operação e embora sejam anteriores aos PWR, têm sido construídos e encomendados cada vez menos, o que pode ser explicado pelo fato de que a mesma água que passa pelo núcleo do reator vai até as turbinas, criando assim, inúmeros problemas para a sua manutenção.

Os GCR (ou MAGNOX) foram os primeiros reatores a serem usados comercialmente em todo o mundo, como mostra a Tabela 1.3. Embora a França,

Tabela 1.1. - Potencia Mundial atual e futura dos vários tipos de Reatores /37/ .
 * Somente Reatores com mais de 30 MW(e)

Colocação	TIPO DE REATOR	USINAS INSTALADAS			EM CONSTRUÇÃO			EM CONSTRUÇÃO + EM OPERAÇÃO			ENCOMENDADAS			
		Nº	POTÊNCIA		Nº	POTÊNCIA		Nº	POTÊNCIA		Nº	POTÊNCIA		
			MW(e)	%		MW(e)	%		MW(e)	%		MW(e)	%	
1	PWR	110	77.723	53,7	129	124.874	65,5	239	202.597	60,4	41	40.756	63,2	Reator a água pressurizada
2	BWR	61	37.777	26,1	44	45.400	23,9	105	83.177	24,8	15	16.311	25,3	Reator a água fervente
3	GCR-AGR	42	11.332	7,8	5	3.100	1,6	47	14.432	4,3	4	2.640	4,1	Reator refrigerado a gás ou MAGNOX e Reator avançado a Gás
4	LGR	17	9.760	6,7	6	6.000	3,1	23	15.760	4,7				Reator a grafite e água pressurizada
5	PHWR	14	6.140	4,2	19	9.399	4,9	33	15.539	4,6	5	4.124	6,4	Reator a água Pesada e Pressurizada
6	LMFER	4	1.433	1,0	2	1.495	0,8	6	2.928	0,9	2	650	1,0	Reator Regenerador Rápido a Metal Líquido
7	HTGR	1	330	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Reator Refrigerado com Gás a Alta temperatura
8	GCHWR	2	180	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Reator Moderado por Água Pesada e Refrigerado por Gás
9	HWLWR	1	92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Reator Moderado por Água Pesada e Refrigerado por água leve
10	LWBR	1	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Reator Regenerador a Água leve
11	HTR	-	-	-	1	296	0,2	-	-	-	-	-	-	Reator de Alta Temperatura com Tório

Tabela 1.2. - Características gerais dos tipos de Reatores /12,36 /

TIPO DE REATOR	COMBUSTÍVEL		REFRIGERANTE	MODERADOR	CIRC. DE REFR.	ENERGIA DOS NEUTRONS P/FISSÃO	C RAZÃO DE CONVERSÃO	EFICIÊNCIA	TAXA DE QUEIMA MW. dia/t	DENSIDADE DE POTÊNCIA KW/LITRO
	MATERIAL	% DE ENR.								
BWR	UO ₂	2,7	Água (fervente)	Água	Simples	Baixa	0,7	34%	27.500	56
PWR	UO ₂	3,1	Água (Pressurizada)	Água	Duplo	Baixa	0,6	33%	31.500	93
PHWR	UO ₂	0	Água Pesada (pressurizada)	Água Pesada	Duplo	Baixa	0,5 a 0,6	26%		
LGR			Água (pressurizada)	Grafite	Duplo	Baixa	0,5 a 0,6			
GCR (ou MAGNOX)	U _{met}	0	CO ₂	Grafite	Duplo	Baixa	0,6	33%	3.000	
AGR	UO ₂	2,3	CO ₂	Grafite	Duplo	Baixa	0,5	42	18.000	2,7
HTGR	UC ₂ e ThO ₂	4,1	Hélio	Grafite	Duplo	Baixa	0,65	38%	98.000	8,4
LMFBR	PuO ₂ e UO ₂	11,5	Sódio	-	Duplo	Alta	1,27	42%	67.000	380
GCFR	UO ₂ e PuO ₂	12,7	Hélio	-	Duplo	Alta	1,4	36%	73.000	259

Tabela 1.3. - Reatores Nucleares e Potencias de cada país /37/
 * somente Reatores com mais de 30 MW(e)

COLOCAÇÃO	PAÍS	POTÊNCIA NUCLEAR INSTALADA MW(e)	PRINCIPAIS TIPOS DE USINAS	Nº DE USINAS	% MUNDIAL	PRIMEIROS REATORES					
						ANO	TIPO	POT MW(e)	ANO	TIPO	POT MW(e)
1	EUA	54.045	PWR (65%) BWR(33%)	73	37,3	8/60 6/61	BWR PWR	200 175	12/62 8/63	BWR BWR	63 63
2	URSS	16.495	LGR(54%) PWR(42%)	33	11,6	2/58 /64	LGR LGR	6-100 100	10/64 1/66	PWR BWR	210 50
2	FRANÇA	16.438	PWR (85%)	25	11,4	4/59 5/60	GCR GCR	40 40	2/65 4/67	GCR PWR	210 310
4	JAPÃO	15.111	BWR(51%)PWR(47%)	23	10,4	7/66	GCR	159			
5	ALEMANHA FEDERAL	8.813	PWR(61%) BWR(38%)	1	6,1	10/62	PIWR	52	4/67 3/69	BWR PWR	237 328
5	INGLATERRA	8.680	GCR/AGR (96%)	34	6,0	9/56 11/58	GCR GCR	4-50 4-50	10/62 11/62	GCR GCR	2-138 2-150
7	SUÉCIA	5.500	BWR(69%) PWR(31%)	8	3,8	12/69	PWR	350	/62	BWR	
7	CANADÁ	5.476	PIWR (95%)	10	3,8	9/68	PIWR	206			
19	SUIÇA	1.940	PWR (84%)	4	1,3	/72	PWR				
10	BÉLGICA	1.650	PWR (100%)	3	1,1	/75	PWR				
11	ALEMANHA DEMOCRÁTICA	1.390	PWR (100%)	4	1,0	5/66	PWR	70			
11	ITÁLIA	1.387	BWR (71%)	4	1,0	1/64	GCR	150	6/64 1/65	BWR PWR	150 247
24	BRASIL	-	PWR (100%)	0	-						

a Itália e outros países possuem reatores desse tipo, praticamente, só a Inglaterra, que foi a pioneira, dá preferência a esse tipo de reator como pode ser observado na Tabela 1.3. O reator HTGR embora use Hélio como refrigerante, ao invés de CO₂ usado nos GCR e AGR, é um reator muito semelhante aos outros dois e poderia até ser classificado conjuntamente. Em 1963, a Inglaterra fez o primeiro AGR do mundo, que é um avanço sobre o GCR e de 1972 em diante, abandonou definitivamente os GCR construindo somente reatores tipo AGR. Pelo fato de utilizar-se gás como refrigerante estes reatores não têm as limitações termodinâmicas dos reatores a água, pois o gás permite atingir temperaturas de refrigeração bem maiores. Assim, é possível chegar a centrais nucleares com rendimentos térmicos mais altos. Os primeiros reatores a gás foram construídos com vasos de pressão de aço mas atualmente a totalidade dos reatores a gás, nas diversas versões, utiliza vasos de pressão de concreto protendido.

Ainda devemos destacar os reatores PHWR semelhantes aos PWR mas usando água pesada como moderador e refrigerante, e urânio natural como combustível, construídos principalmente pelo Canadá, embora a Alemanha Federal tenha sido a primeira a construir e operar comercialmente um reator desse tipo com mais de 30 MWe.

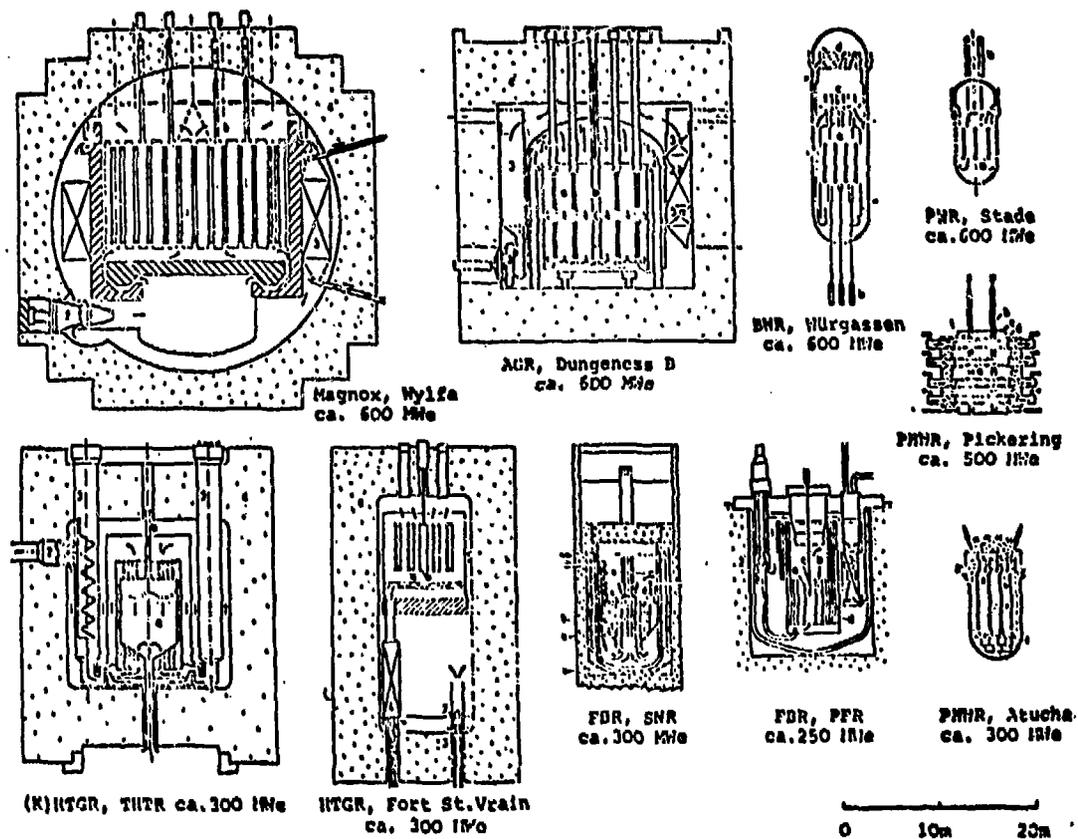
Há ainda os LGR que são usados quase que somente pela URSS embora ela própria use, também, em grande porcentagem reatores tipo PWR.

Com exceção dos reatores a gás, normalmente usam-se vasos de pressão de aço na maioria dos reatores. De qualquer forma não há nada que impeça a utilização de vasos de pressão de concreto em qualquer tipo de reator.

O principal fator que determinou a preferência de utilização do concreto na construção dos vasos de pressão para reatores a gás, foi o seu tamanho. As propriedades termodinâmicas dos gases em geral, são tais que requerem uma superfície de contato para troca de calor muito maior do que para líquidos em geral. Isso pode ser medido exatamente pelo fator Densidade de Potência, constante da Tabela 1.2 que é a razão entre o volume útil do núcleo do reator e sua potência. A densidade de potência varia também com as condições de pressão e temperatura do refrigerante.

A Figura 1.3 compara 10 vasos de reatores dos diferentes tipos,

FIGURA 1.3. - Dimensões do Vaso de Pressão para diferentes tipos de reatores. /36/



mostrando os seus tamanhos e potências.

1.3. Reatores Regeneradores /23/

Os reatores tipo FWR, BWR, LGR, GCR ou PHWR, que são os responsáveis por 98,5% da produção atual de energia nuclear, são do tipo lento ou térmicos e retiram energia quase que somente do isótopo 235 do Urânio.

Os reatores regeneradores, são reatores que devido às condições em que ocorrem as fissões em seus núcleos são capazes de, enquanto geram energia através do U^{235} , ou Pu^{239} , ou U^{233} , produzir novos núcleos de Pu^{239} , ou U^{233} , em quantidade igual ou superior aos consumidos. O fator C, razão de conversão mostrado na Tabela 1.2 que é a razão entre o número médio de átomos físséis produzidos em um reator e o número de átomos consumidos em fissões, mostra quanto cada tipo de reator se aproxima dos regeneradores. Para um reator ser regenerador é preciso ter $C > 1$, isto é, transformar mais átomos férteis em físséis do que o número de átomos físséis que consome. Isto é possível graças às propriedades físico nucleares dos isótopos Th^{232} e U^{238} , que são abundantes na natureza. As cadeias de transformação de Th^{232} em U^{233} e de U^{238} em Pu^{239} são esquematizadas na Figura 1.4

Tendo em vista que :

1. O enriquecimento de urânio, para que se possa usá-lo nos reatores convencionais, é uma das partes mais caras de sua produção ;
2. O urânio, como se encontra na natureza, tem 99,3% do isótopo 238, e 0,7% do isótopo 235, e os reatores convencionais aproveitam quase que somente o U^{235} ;
3. Os reatores regeneradores podem usar como combustível fértil até mesmo o urânio empobrecido que sobra como resíduo do processo de enriquecimento usado para outras usinas;

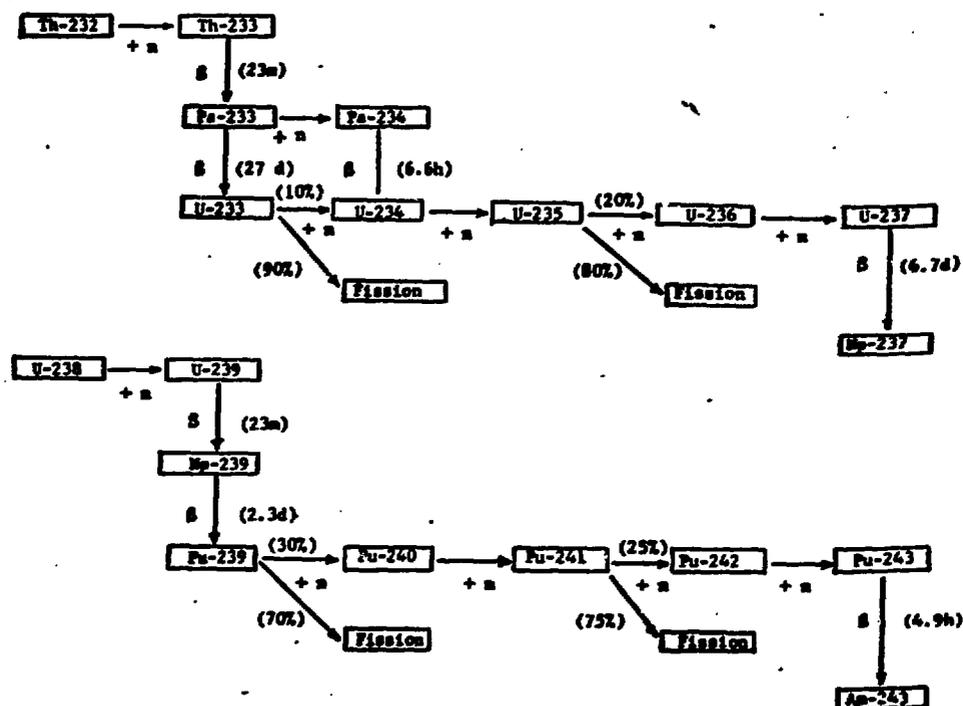


Figura 1.4. - Transformações sofridas pelo Th^{232} e pelo U^{238} . /9/

4. Embora as reservas de urânio sejam grandes, se utilizarmos somente 0,7% (a parte de U^{235}) essas reservas de esgotarão rapidamente;

percebe-se a necessidade do desenvolvimento da tecnologia e do uso cada vez maior dos reatores regeneradores .

Há no mundo, hoje, quatro reatores produtores ou regeneradores usados em escala comercial, como mostra a Tabela 1.4 .

O GCFR, é um projeto da Gulf General Atomic, de um reator regenerador refrigerado pelo gás hélio, do tipo rápido e portanto sem moderador, que usa como combustível, ambos, óxido de plutônio e óxido de urânio. Embora os reatores do tipo LMFBR, estejam num avançado estágio de desenvolvimento, o GCFR é importante por se tratar de uma possível alternativa futura .

Tabela 1.4. - Reatores Regeneradores . /26, 31/

TIPO	PAÍS	USINA	POT. (MW.e)	% DE CONSTR.	INÍCIO DE OPERAÇÃO COMERCIAL
LMFBR	USA	Enrico Fermi FBR	60	100	*/63
LMFBR	URSS	BN-350	350	100	/73
LMFBR	França	Phenix	233	100	12/73
LMFBR	Inglaterra	Dounreay PFR	250	100	8/76
LWBR	E.U.A.	Shippingport	60	100	12/77
LMFBR	URSS	BN-600	600	100	/80
LMFBR	França	Creys-Malville	1200	45	12/83
LMFBR	Alemanha Fed.	Kalkar SNR-300	295	48	6/85
LMFBR	Japão	Monsu	300	-	4/85
LMFBR	E.U.A.	Clinch River BRP	350	-	indef.

* A Central Enrico Fermi nos Estados Unidos começou a ser construída em 1956 e operou de 1963 a 1966 quando parou para um conserto de defeito de concepção mecânica. Operou novamente de 1970 a 1972 .

1.4. Reator GCFR de demonstração de 300 MW(e) /1/ .

1.4.1. Características gerais

A - Introdução

Embora estudos sobre o GCFR tenham começado em 1962, antes do atual Programa de Utilização do GCFR os esforços nunca foram concentrados sobre uma Usina de Demonstração de 300 MW(e). Este programa começou na metade de 1968 e por volta de 1974 já era suportado por 54 Companhias de Eletricidade Americanas (entre elas a GA) e 4 Européias .

Uma boa parte dos primeiros anos foi dedicada a uma avaliação do rumo que deveria ser tomado para pesquisar o objetivo de usinas comerciais. Ficou decidido com o maciço apoio das companhias utilitárias participantes, fazer-se diretamente uma usina de demonstração. Por volta do início de 1970, um projeto de referência do Sistema de Produção

de Vapor Nuclear (NSSS-Nuclear-Steam Suply System) de uma central de Demonstração de 300 MW(e) começou a ser preparado. Seguiu-se a submissão de um Documento de Informação de Segurança Preliminar (PSAR) à diretoria de licenciamento norte americana, no início de 1971. Completou-se um Plano de Programa de Desenvolvimento em setembro de 1972. Esse documento foi preparado sob os auspícios da AEC e do Utility Program e descreveu todo o trabalho de desenvolvimento necessário ao projeto e construção da usina de demonstração e os custos e esquemas para o trabalho.

Um comitê de revisão do programa caracterizado por membros das companhias utilitárias participantes recomendou que uma firma de engenharia fosse designada para preparar um projeto de usina, estimativa de custos e esquema de construção. Esse trabalho foi dado para a Bechtel Corporation e ficou pronto em julho de 1973. Segue uma descrição do projeto da usina de 300 MW(e) .

B - Descrição da usina

Entre 1970 e 1974 inúmeras mudanças foram feitas na usina de Demonstração de GCFR de 300 MW(e), anteriormente citada, como um resultado de revisões de critérios de segurança, de projeto e de estudos de engenheiros e arquitetos. Foram providenciados cada um dos maiores componentes do Sistema Produtor de Vapor Nuclear (NSSS) e à Bechtel Corporation um projeto de Balanço da Usina (que é basicamente o balanço das temperaturas, pressões, fluxos de massa, e de calor) .

O propósito dessa usina é demonstrar o funcionamento do GCFR concebido sob condições normais de operação e de utilidade. Mais especificamente, a usina demonstrará o desempenho do combustível e do ciclo do combustível para as condições do protótipo e demonstrará também o desempenho em serviço do sistema de refrigeração do reator e dos sistemas de controle da usina .

O NSSS (Sistema Produtor de Vapor) foi deliberadamente baseado em extrapolações diretas a partir da tecnologia dos componentes do HTGR e da utilização física e tecnológica do elemento combustível do LMFR (Reator Regenerador Rápido refrigerado com Metal Líquido) .

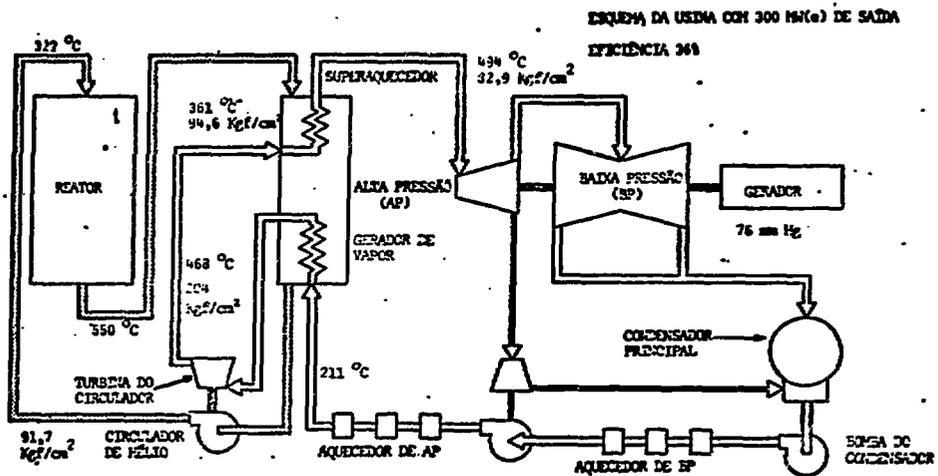


Figura 1.6. - Diagrama Simplificado de Fluxo - Usina GCR de Demonstração .

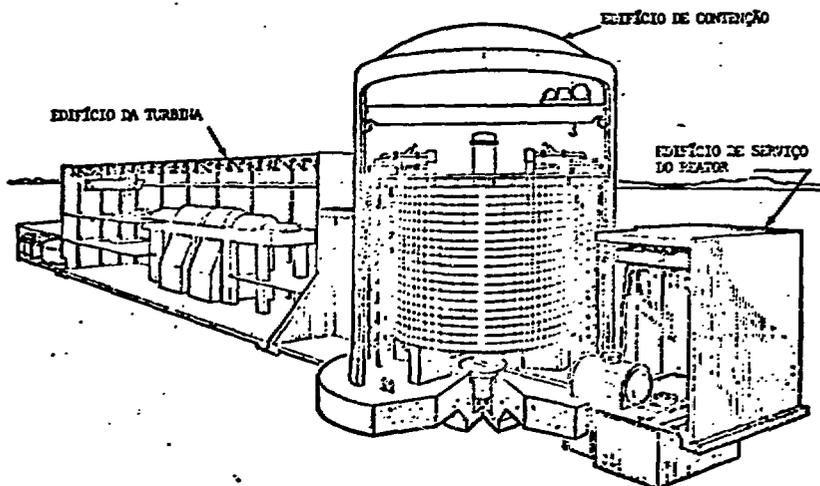


Figura 1.5. - Reator Proprietário Rápido Refrigeração a Gás de 300 MW(e) .

No ciclo de vapor do GCFR, todo o fluxo do gerador de vapor, passa através de turbinas de vapor de simples estágio, impulsionando os circuladores de hélio principais, após o que se dirige para os super-aquecedores antes de deixar o edifício de contenção do reator para a turbina principal (Figura 1.5 e Figura 1.6). Essa disposição, conseguiu muitas das vantagens dos super-aqueced. normais incluindo uma maior eficiência de ciclo e reduzida unidade de vapor contido nos últimos estágios da turbina principal. Talvez, entretanto, a maior vantagem seja o aumento da confiabilidade de refrigeração do caroço, após falha do reator ou da turbina, já que cada circulador é impulsionado independentemente por seu gerador de vapor associado

A usina tem uma eficiência da ordem de 40% com uma pressão de condensador de turbina de 3" (76 mm) de Hg, típico de torres de refrigeração molhadas. As condições de vapor da válvula reguladora da turbina principal são 922 °F (495 °C) e 1179 psia (80 atm). A Razão de Conversão é em torno de 1,4, baseada no uso de óxido de tório ou óxido de urânio em tres camadas de envoltória radial. Outros importantes dados de projeto são dados na Tabela 1.5 .

C. O Sistema produtor de vapor nuclear (NSSS)

O sistema produtor de vapor do GCFR, inclui o conjunto do caroço do reator, um sistema de refrigeração primário de hélio com tres circuladores e mais tres circuladores auxiliares de refrigerante do núcleo. Tudo isso é contido por um vaso de pressão de concreto protendido (VPCP) como mostra a Figura 1.7. Incluem-se também no NSSS equip. auxiliares tais como : sistemas de serviço dos circuladores principais e auxiliares, um sistema de purificação do hélio, um sistema para rejeito radioativo gasoso e equipamento de recarga de combustível .

No sistema de circulação primário revisado, os dutos de hélio quente e frio, ambos, são localizados próximos ao topo do VPCP, com o cilindro suporte do caroço cilíndrico separando a entrada e saída de gás do reator. O hélio, na temperatura de entrada do reator, entra no caroço e flui para baixo através da grelha de suporte do caroço, assim como por todas as previsões de suporte do caroço, e dirigentes de controle que são localizados na extremidade mais refrigerada do reator, além do que o caminho natural da gravidade é permitido, sem a existência de qualquer plano'

Tabela 1.5. - Condições de Projeto da Usina GCFR de Demonstração

Condições de Projeto	Especificações
Potência	300 MW(e)
Condições de vapor	495 °C/83 kgf/cm ² (80 atm)
Pressão de Condensação	76 mm Hg
Eficiência Útil da Usina	36%
Pressão de Hélio	88 kgf/cm ² (85 atm)
Temperaturas de Hélio	
Entrada do Reator	323 °C
Média Misturada na Saída	550 °C
Barras Cilíndricas de Combustível	
Combustível	Mistura de UO ₂ e Pu O ₂
Diâmetro da barra	7,2 mm
Encamisamento	20% em 316 316 SS (0,48 mm esp.)
Temperatura de ponto quente ("hot spot") na superfície do Encamisamento	690 °C
Núcleo	
Altura (ativa)	100 cm
Diâmetro (ativa)	200 cm
Relação média de fissão	0,6 MW(t)/kg
Relação linear máxima	410 W/cm
Razão de Conversão	1,4 (3 faixas de elementos cobertos)
Frequência de recarga	Anualmente 1/3 do núcleo
(3) Circuladores de Hélio	Simples estágio, axial, dirigido por vapor
Crescimento da pressão	3,7 atm
(3) Geradores de Vapor	De passagem única, helicoidal
(3) Superaquecedores	De passagem única, helicoidal
VPCP	
Tipo	Multicavidade Vertical
Tamanho(externo)	25,7 m de diâmetro 24,4 m de altura

que corte aonde as barras de controle entram no caroço. Depois de passar pelo reator, após a saída plena, ele flui para cima faceando o isolamento térmico, deixando finalmente a cavidade do reator através de um duto horizontal em direção a uma das tres cavidades de circuladores principais. Esse arranjo elimina a necessidade de um sistema separado para refrigeração do isolante .

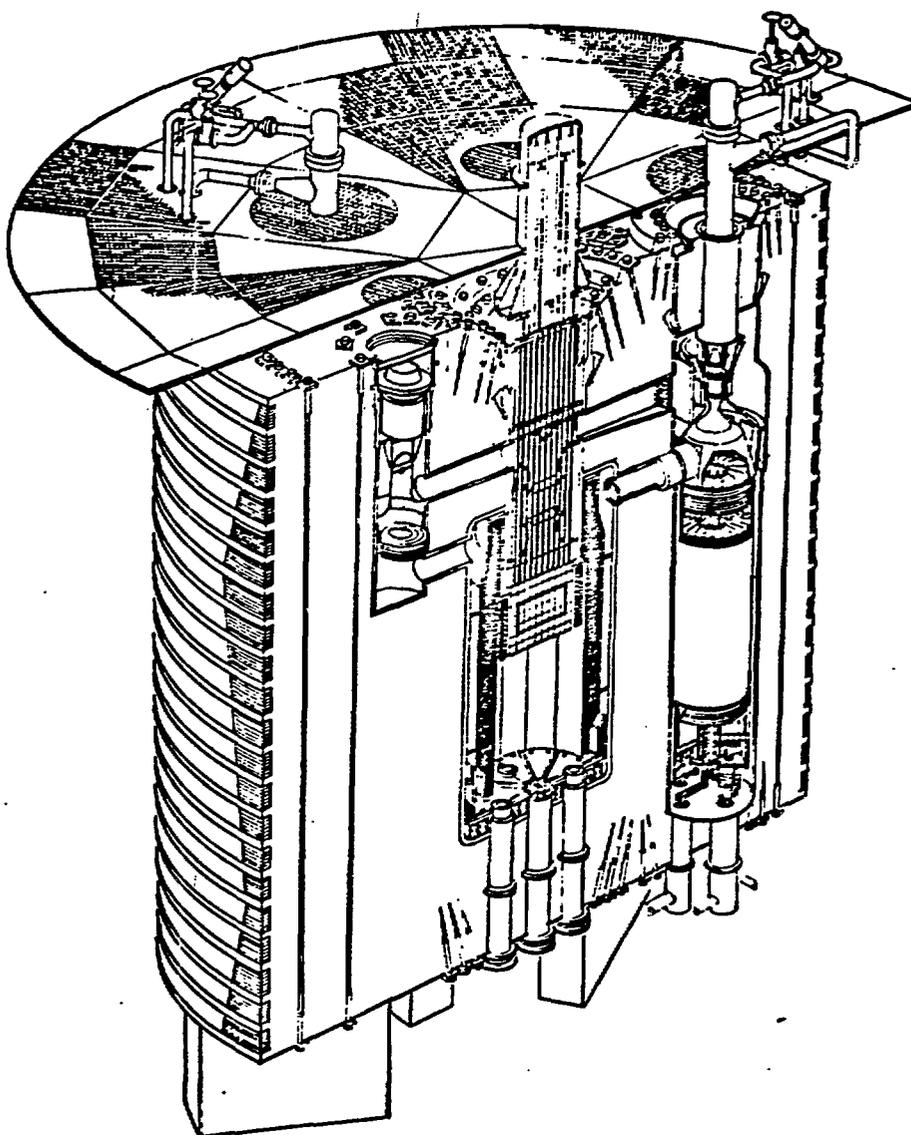


Figura 1.7. - Sistema de Suprimento de Vapor Nuclear da Usina de Demonstração do GCFR

O isolamento térmico do piso da cavidade do reator é projetado para resistir a impacto, e suficientemente plano para permitir o reestabelecimento de qualquer objeto caído. Uma vantagem é que se carrega o combustível por baixo e um objeto caído, não pode causar dano ao caroço pela sua queda.

Os elementos combustíveis contêm barras cilíndricas ("rods") com 7,2 mm de diâmetro, com superfície áspera em 3/4 do comprimento ativo do caroço, para melhorar as condições de transferência de calor apenas na região em que isso for necessário e vantajoso. Ainda, nas regiões do combustível e de cobertura axial, cada barra de controle contém 203 mm de isolamento neutrônico para assegurar uma ductibilidade residual mínima da grelha de suporte do caroço de 10% ao final de 30 anos .

Orifícios com tampas recolocáveis são instalados na extremidade de saída dos elementos combustíveis e nos de cobertura. Isso é trocado quando se desliga a usina para a recarga parcial anual de 1/3 do núcleo .

Localizados nas paredes do VPCP estão 3 cavidades dos circuladores principais e as 3 cavidades menores dos circuladores auxiliares. Já que as temperaturas de trabalho do hélio são mais baixas no GCFR que para o HTGR, os problemas de materiais ficam facilitados, mas o coeficiente de transferência de calor deve ser mais alto ou a área da superfície de troca, ser maior para compensar a menor diferença de temperatura entre o hélio e o vapor. Normalmente, tem-se feito as duas coisas. Ainda, uma otimização da relação altura-diâmetro dos Geradores de Vapor foi realizada, de forma que nem os circuladores principais e nem a cavidade do reator predominam no dimensionamento da altura do VPCP. A altura sobretudo, do conjunto superaquecedor e gerador de vapor é dentro daquela necessária para a recolocação do lado de dentro do edifício de contenção do reator. O esquema do gerador de vapor faz com que o término de todas as conexões de tubulação de quatro folhas de tubo cada seja na base do vaso. Tubos conectores podem ser feitos externamente .

Os principais circuladores de refrigerante são compressores de fluxo axial de simples estágio acoplados a uma turbina de vapor de impulso de simples estágio também, o que faz com que se tenha uma máquina simples, altamente compacta e que pode ser removida através de um buraco

central na tampa de fechamento de penetração da cavidade do circulador principal em questão. Há uma válvula para isolamento do fluxo de refrigerante localizada entre a saída do circulador principal e o duto que leva à entrada do reator. A função dessa válvula é conferir e prevenir o baixo fluxo de hélio no caso de um eventual desligamento do circulador.

Os circuladores de refrigerante auxiliares são usados para refrigerar o núcleo no caso de desligamentos de longa duração e como substitutos dos principais ou como refrigeradores de emergência. Os trocadores de calor da circulação auxiliar são refrigerados por circuladores de água pressurizada que transferem seu calor ao ar através de um trocador de calor a ar.

O vaso é armado com barras de aço cilíndricas e protendido por tendões longitudinais e por fios que são enrolados circunferencialmente. As aberturas maiores são fechadas por "plugs" de concreto projetados para estarem comprimidos em qualquer hipótese e que são mantidos no lugar por duas barras redundantes e estruturalmente independentes. O "liner" (película metálica de revestimento interno do concreto) é isolado do lado do hélio por uma barreira térmica e a refrigeração do "liner" é feita por tubos refrigerantes, dispostos do lado do concreto, próximo ao "liner" de aço. (Figuras 1.8 e 1.9)

D. O balanço da Usina

Um local hipotético foi assumido para os estudos. Dados do local necessários, tais como as condições do solo, requisitos sísmicos e meteorológicos se basearam nesse local; o projeto resultante de usina não é para um local altamente sensível e a usina poderia vir a se localizar em outros locais com modificações apropriadas.

O Edifício de Contenção é um cilindro de concreto armado convencional com 35 m de diâmetro interno, com um domo zenital esférico de chapa e uma chapa circular como laje de base. A pressão de projeto é de 23 psig (1,6 atm) e o volume líquido livre é $1,21 \times 10^6$ pés³ cúbicos (ou 34,2 mil metros cúbicos) resultando uma pressão de equilíbrio de 1,83 atm absoluta seguindo uma despressurização. O VPCP

de 25,7 m de diâmetro é suportado por baixo por uma laje de base sobre seis suportes altos de 7,0 m cada. A coroa anelar de 4,9 m de diâmetro entre o vaso e a parede do vaso de contenção permite o suporte de equipamento e canalização nesse espaço, e o espaço vago de 7 m por baixo do VPCP permite a recarga de combustível por baixo. Há um buraco localizado no centro da laje de base do reator de forma que os equipamentos manuseáveis possam ser usados para remover os protetores dos plugs do VPCP e inserir máquina de recarga de combustível. Um equipamento de escotilha, com aproximadamente 6,1 m de diâmetro, é localizado na parte mais baixa da parede do vaso de contenção, para transferência de combustível com máquinas e equipamentos para o edifício de serviço do reator, onde há a piscina para armazenamento.

A Figura 1.10 / 1 / mostra uma planta com as disposições gerais de toda a usina. Ficou previsto que o VPCP passaria por testes de modelos incluindo testes das tampas. A condutividade da barreira térmica a 85 atm de pressão interna do hélio e a temperatura de projeto seria medida e testes para avaliar os efeitos da despressurização seriam feitos.

1.4.2. O Vaso de Concreto /16/

1.4.2.1. Bases de projeto

Os critérios de projeto do VPCP são baseados numa combinação de porções aplicáveis da American Concret Institute Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI-318-71, o ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 2 e as informações básicas de projeto e a experiência desenvolvida através de várias pesquisas e programas de desenvolvimento do HTGR relatadas pela GA, a experiência de projetistas e construtores europeus de VPCP e informações obtidas da literatura técnica.

A- Operação

As condições de operação transientes e de estado estacionário para o sistema produtor de vapor da usina são descritas adiante.

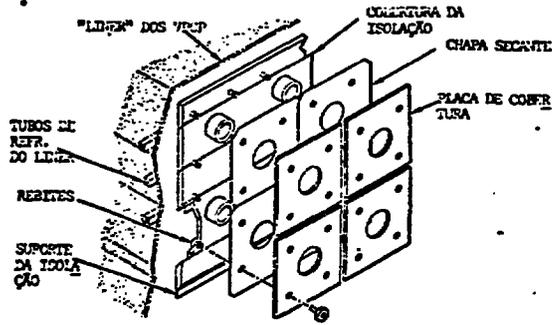


FIG. 1.8. - Barreira Térmica Classe A do grande VCP .



FIG. 1.9. - Instalação do Isolamento Cerâmico interno à parede do VCP do MCR de Fort. St. Vrain .

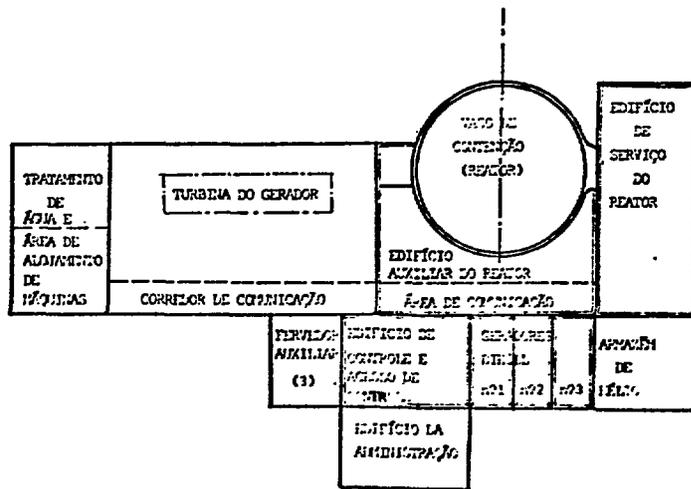


FIG. 1.10 - Planta com disposições gerais da Usina de Energia (U.E.) de 300 MW(e)

A partir delas as condições de operação para o VPCP foram definidas como :

Pressão normal de trabalho (NWP)	= 92 Kgf/cm ²
Pressão de projeto (DP)	= 1,1 x NWP = 101 kgf/cm ²
Pressão máxima de cavidade	= 1,03 x DP = 104 kgf/cm ²

Os 3% que a pressão máxima excede a pressão de projeto consistem de uma tolerância de funcionamento da válvula de segurança que é de $\pm 1\%$ e portanto 2% de pressão acumulada .

B - Condições de acidente

Os efeitos de uma série de distúrbios, acidentes ou incidentes são avaliados, incluindo :

1. carregamentos de Terremoto de Desligamento Seguro
2. ruptura de alguns tendões de protensão
3. ruptura parcial do "liner" ou penetração de refrigerante
4. perda parcial da efetividade de barreira térmica
5. ruína de uma tampa de penetrações
6. perda de algumas ancoragens do "liner"
7. perda de Hélio pelo "liner" para o concreto

C - Requisitos Estruturais

O VPCP para o GCFR será projetado de acordo com os seguintes requisitos estruturais :

1. O vaso deverá ter resposta essencialmente elástica, para variações de pressão de curta duração, até no máximo a pressão máxima de cavidade (104 kgf/cm²)
2. Ele deverá ter uma margem de segurança de duas vezes a pressão máxima da cavidade (208 kgf/cm²) para cobrir incertezas de projeto, construção e de materiais .
3. A aproximação da resistência última com sobrepessão deve ser '

progressiva e previsível: a resistência última deve ser alcançada primeiramente nas paredes e depois nas lajes do topo e da base do vaso .

4. O vaso e seus componentes responderão elasticamente para a combinação do terremoto básico de operação e cargas de operação .

5. As forças de protensão em qualquer seção plana através do vaso a qualquer momento durante sua vida devem ser ao menos igual às forças de pressão para a pressão máxima de cavidade, assegurando assim compressão, na média, por todo o VPCP a qualquer condição de operação .

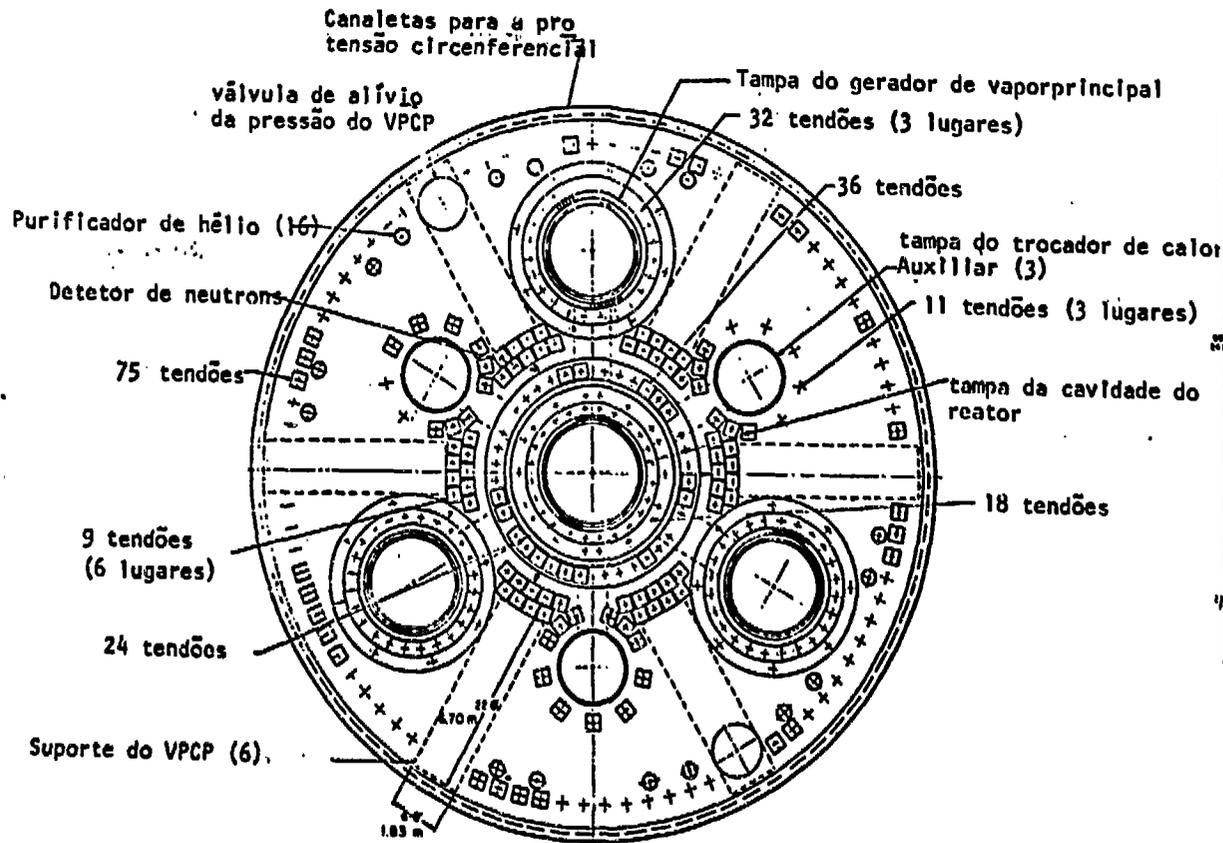
6. O vaso e seus componentes, responderão de maneira segura e previsível para o acidente básico de projeto bem como a outros identificáveis' distúrbios, acidentes e incidentes .

7. Cada penetração deverá ter uma tampa vedadora que se incorporará ao sistema de fechamento primário e secundário e um restritor de fluxo, onde necessário, para limitar uma área de perda .

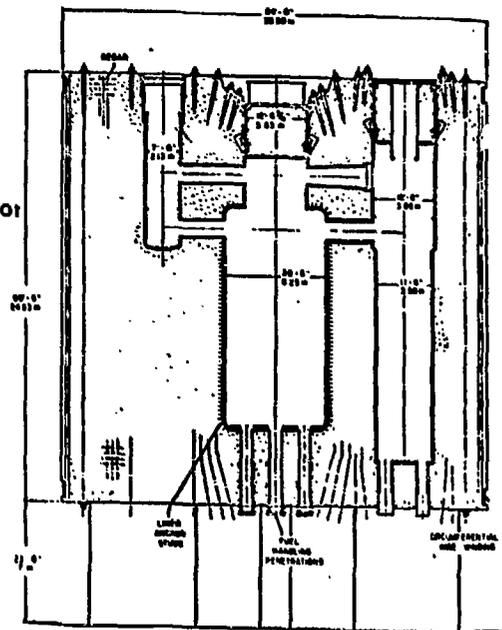
1.4.2.2. Dimensões e características físicas

O vaso de concreto do reator é um cilindro vertical multicavidade construído com concreto de alta resistência, que é reforçado com armadura frouxa de aço e é verticalmente protendido por tendões lineares de aço e, radialmente, por enrolamento de fios circunferenciais. O vaso tem um diâmetro externo de 25,62 m e uma altura de 24,55m (Figura 1.11) .

A cavidade central, na qual o núcleo do reator é colocado, tem 6,248 m de diâmetro e 12,725 m de altura. As tres cavidades para os circuladores principais e geradores de vapor têm 3,505 m de diâmetro por 1,830 m de altura. As cavidades para os circuladores auxiliares e trocadores de calor têm 2,134 m de diâmetro por 7,772 m de altura. As cavidades são interconectadas por dutos no VPCP que servem para os fluxos necessários de refrigerante entre componentes. A superfície vertical exterior do VPCP, acomoda canais nos quais a protensão circunferencial é instalada. Toda a laje da base e a maior parte da laje do topo, são lisas.



Planta do VPCP



CORTE DIAMETRAL DO VPCP

FIG. 1.11. - VPCP DO GCFR DE 300 MW(e)

A laje do topo incorpora grandes e móveis tampas para instalação e recolocação dos componentes : uma no centro para a cavidade do reator, três outras para as três cavidades dos geradores de vapor e mais três para as cavidades dos trocadores de calor auxiliares. Além disso, a laje do topo contém duas cavidades para válvulas de alívio de pressão e oito válvulas para o sistema de purificação de hélio .

A laje da base contém penetrações para o manuseio de combustível e para a bomba do gerador de vapor e conexões de vapor .

As paredes de concreto e lajes, são construídas em torno de um "liner" de aço carbono com 19 mm que serve como uma membrana vedante para conter o refrigerante do reator nas cavidades do VPCP. O "liner" é ancorado ao concreto por rebites soldados ao "liner" e embebidos no concreto .

A segurança de operação dos VPCP requer estrito controle de sua temperatura ambiental por todo o tempo. Para proteger o VPCP da principal fonte potencial de dano por calor (i.e., o refrigerante hélio em circulação pelo vaso) são colocadas nas superfícies internas do vaso e em suas penetrações barreiras térmicas. A quantidade limitada de calor que passa pela barreira térmica é removida pelo refrigerante do "liner" .

O refrigerante do "liner" passa por tubos quadrados colocados no concreto, ao lado do "liner". Esses tubos serão conectados externamente a suprimentos de água de forma tal que se tenha dois separados e independentes circuitos de refrigeração por todas as partes do vaso e penetrações do "liner" . (Figuras 1.8 e 1.9) .

Tendões verticais dentro de bainhas preenchidas com concreto dão as forças de protensão na direção axial, para contrabalançar as forças axiais provenientes da pressão na cavidade e a pressão imposta nas tampas . Há um número suficiente de tendões em conjunção com barras flexíveis verticais, para absorver uma carga de pressão última de duas vezes a pressão máxima de cavidade sem ruir. Três faixas circunferenciais de tendões são dispostas em torno da cavidade do reator e uma única, em torno da cavidade dos geradores de vapor e dos trocadores de calor auxiliares.

Cada tendão é composto por 170 fios com 6,35 mm de diâmetro compondo, no conjunto, uma área de 53,87 cm². Na extremidade passiva, cada tendão tem uma arruela e uma placa de apoio; na extremidade ativa, cada tendão terá uma ancoragem, uma porca, um sistema para protensão e uma placa de distribuição para suporte. Os fios dos tendões são de aço torcidos a frio que têm uma resistência última garantida à tração de 16.900 kgf/cm² à temperatura ambiente.

Em posições estratégicas, células de carga são introduzidas na extremidade da ancoragem para que se possa monitorar as forças nos tendões.

Na superfície externa do VPCP há canais circunferenciais espaçados, com chapa de aço onde são colocados os fios. Os fios são tensionados de forma a dar a necessária protensão radial ao vaso. Os fios para enrolamento circunferencial têm 12,7 mm de diâmetro. Uma máquina especial de enrolamento de fio é usada para colocá-lo tensionado em torno do vaso e a tensão aplicada ao fio é controlada pela máquina.

As características básicas do concreto são :

-mínima resistência à compressão

$$\text{na época da protensão } (f'_{c(i)}) = 457 \text{ kgf/cm}^2$$

-módulo de elasticidade (secante)

$$\text{a) na época da protensão } E_c = 316.350 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{b) após a protensão } E_c = 351.500 \text{ kgf/cm}^2$$

-coeficiente de Poisson

$$\text{(Elástico e para deformação lenta) } \nu = 0,167$$

-coeficiente linear de expansão térmica = $\alpha_c = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

-condutividade térmica $k = 0,534 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$

1.5. Comparação entre VPCP e Vasos de Aço /11, 21, 23/

Como vantagens da utilização do aço sobre a utilização do concreto podemos citar :

1. O concreto não se comporta satisfatoriamente a temperaturas acima de aproximadamente 60° a 80°C . Isso requer no caso dos VPCP, uso de uma camada de isolamento térmico entre o refrigerante e o concreto .

2. O aço, suporta bem, estados multiaxiais de tensão de compressão e de tração. O concreto resiste bem somente à compressão. Esse problema é contornado através do uso de armaduras passivas de aço, nas regiões tracionadas e principalmente, através de cabos de aço pré-tensionados, estrategicamente distribuídos pela estrutura, nas várias direções espaciais, de forma que em nenhum momento, em nenhum ponto, o concreto seja sujeito a tensões de tração. Isso dificulta muito o cálculo de tais estruturas, principalmente onde não há axissimetria, e as vezes entre outras coisas , requer a confecção de modelos reduzidos .

As vantagens dos vasos de pressão de concreto sobre os de aço são basicamente as seguintes :

1. Os vasos de aço, requerem o uso de uma parede de blindagem do meio, contra as radiações do núcleo. Essa parede normalmente é de concreto, que é um bom material de blindagem. Nesses casos, a parede não tem função estrutural. Fazendo o vaso de pressão de concreto, ele próprio pode servir também de blindagem, sem qualquer dano significativo à sua função estrutural, havendo assim uma considerável diminuição de custos .

2. Os vasos de aço, para que se tenha um melhor controle de qualidade, são confeccionados em fábricas especiais, então, são transportados para o local da usina nuclear. Como os vasos de concreto são moldados "in situ", evitam-se grandes transtornos de transporte de grandes peças, com interdição de rodovias, fabricação de carretas especiais e longos períodos de espera. O concreto é facilmente preparado no próprio canteiro da obra e com os devidos cuidados, pode-se emendá-lo em quase qualquer posição , o que possibilita que se construa o vaso, um pouco em cada dia, parando inclusive, durante as noites se assim desejarmos .

3. No Brasil, não existem muitos técnicos com larga experiência em soldas de responsabilidade, e em grandes peças, como é o caso dos vasos de aço. Há casos, inclusive de contratação de técnicos estrangeiros, para serviços de tão sofisticada e cuidadosa confecção, tornando os nossos custos, maiores ainda do que nos países mais desenvolvidos. O Brasil tem muitas firmas com larga experiência em grandes obras de concreto, como é o caso das construtoras de nossas barragens. Inclusive, firmas brasileiras, fazem tais obras, até no estrangeiro, ganhando concorrências internacionais. Isto não é um fator somente de economia no projeto como também é um fator social na medida em que altera a quantidade de empregos fornecidos dentro do próprio país.

4. O fato, já mencionado, de o concreto poder ser feito e lançado, na própria obra, aos poucos e até com intermitência entre dias e noites, faz com que se possa construir vasos de concreto de praticamente qualquer dimensões. Principalmente os reatores nucleares refrigerados a gás e os reatores rápidos, requerem projetos com dimensões muito maiores que as convencionais, para as mesmas potências, devido a problemas de criticidade e de transferência de calor. Além disso, a economia de escala, nos leva a reatores cada dia maiores .

5. O VPCP se compõe de milhares de cabos de protensão, o que aumenta a segurança do conjunto, pois o rompimento isolado de um desses cabos, devido a qualquer falha localizada, no material ou na construção, é facilmente compensado pelos demais cabos. A seguir pode-se facilmente substituir o elemento falho. A manutenção e troca periódica desses cabos, pode ser feita com facilidade. Nos vasos de aço, exaustivos testes não destrutivos (raio X, ultrason e outros) devem ser feitos nas peças e nas soldas, investigando cuidadosamente todo o material, pois, basta um ponto falho para ocasionar imediata perda de refrigerante do circuito primário que além dos problemas de contaminação, é gravíssimo do ponto de vista de segurança do reator .

6. Os vasos de pressão de concreto, tipo multicavidade, abrigam o núcleo, os trocadores de calor e os recirculadores auxiliares, cada um numa cavidade isolada, havendo uma barreira térmica e de pressão entre elas, aumentando-se assim a segurança do conjunto. Nos demais vasos, monocavidade de aço e mesmo de concreto, há uma única cavidade e um acidente em qualquer componente; imediatamente abala os demais, podendo ampliar

as proporções.

Os vasos de aço, devido à pequena espessura de suas paredes ; não poderiam ser feitos como multicavidade, de maneira economicamente vantajosa.

1.6. O Desenvolvimento das Pesquisas de VPCP no IPEN

De 1973 a 1975, desenvolveu-se no IPEN em conjunto com a Gulf General Atomic o Projeto e dimensionamento do Vaso de Pressão de Concreto Protendido (VPCP) para a Usina de Demonstração do "Gas Cooled Fast-Breeder Reator (GCFR)" de 300 MW(e) descrito no Item 1.4, em conformidade com os demais aspectos de projeto da usina, tais como pressão do refrigerante, temperaturas em cada parte do sistema, volume e disposição de equipamentos e interligações dentro do vaso .

Paralelamente ao projeto e dimensionamento da estrutura de concreto, desenvolveram-se no IPEN, programas de cálculo de tais estruturas pelo Método da Relaxação Dinâmica, cujo grande difusor, o inglês Ian Davidson, foi consultor do projeto de VPCP do IPEN. Mais tarde através de intercâmbios diversos, a equipe de pesquisas de VPCP conseguiu outros programas de análise estrutural estática, dinâmica, linear, não-linear, com consideração de efeitos de temperatura ou não, todos eles baseados no Método dos Elementos Finitos e que foram implantados no computador IBM/370 do IPEN. A Tabela 1.6 descreve as principais possibilidades de uso e características de cada um desses programas .

A norma americana que trata do dimensionamento e projeto de Vasos de Concreto para Reatores / 2 / foi publicada no final de 1975 /19/ embora tenha data de janeiro do mesmo ano. Em 1977, nova versão dessa norma foi publicada, incluindo todas as suas atualizações feitas durante esses dois anos / 3 / .

As normas americanas / 2 / 3 / impõem que "onde processos analíticos de se prever a tensão última e o comportamento no campo aproximado da ruína de vasos de concreto para reatores não estiverem estabelecidos , deverá ser construído e testado um modelo de protótipo com características

Tabela 1.6. - Programas para Cálculo Estrutural à disposição no Computador do IPEN . /58, 22, 35/

OPÇÃO	NOME DO SISTEMA OU PROGRAMA					
	PV1	PV2	FEAST	NONSAP	SAP IV	SAFE 2D
Estruturas de barras no plano	-	-	-	SIM	SIM	-
Estado plano de tensões (chapas)	SIM	-	SIM	SIM	SIM	SIM
Estado plano de deformações	SIM	-	SIM	SIM	SIM	SIM
Axissimetria	-	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Estruturas de barras (3 dimensões)	-	-	-	SIM	?	-
Estruturas espaciais	-	-	-	SIM	-	-
Não linearidade física	SIM	SIM	SIM	SIM	-	?
Não linearidade geométrica	-	SIM	-	SIM	-	-
Efeitos de temperatura	-	-	SIM	-	-	SIM
Acompanhamento de fissuras	SIM	SIM	-	-	-	-
Elementos triangulares	-	-	SIM	SIM	SIM	SIM
Elementos quadrangulares	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Elemento isoparamétrico	-	-	-	SIM	SIM	-
Carregamento e resposta dinâmicos	-	-	-	SIM	SIM	-
Método de Cálculo	MRD	MRD	MEF	MEF	MEF	MEF
Operacional	SIM	SIM	SIM	SIM	-	SIM

04/11/80

similares àquelas de projeto em questão" e de acordo com as especificações da própria ASME, que aconselha que "os modelos sejam geometricamente similares com respeito às principais dimensões do protótipo em uma relação de escala conforme as finalidades do teste", de acordo com a Tabela 1.7 .

Tabela 1.7. - Escalas de modelos impostas pelo ASME .

Modelo proposto	Escala
Resposta elástica	1:14 ou maior
Maneira de ruína última	1:14 ou maior
Cargas de longa duração	1:17 ou maior
<u>Resposta frente a temperatura</u>	
Longa duração	1:14 ou maior
Curta duração	2 pés (ou espessura maior)

Há no IPEN, um laboratório de pesquisas, com instalações e equipamentos, feito especialmente para se construir e ensaiar modelos estruturais sujeitos a pressão interna estática. Foi neste laboratório, que fizeram os modelos de VPCP SCM 4.1 e SCM 4.2, que foram ensaiados em 1978 .

O IPEN, com os objetivos de : aprovar o uso do laboratório recém-construído e de treinar pessoal técnico na construção e ensaio de modelos reduzidos de VPCP, decidiu numa primeira etapa de seu programa, fazer modelos em escala 1:20 similares ao protótipo do GCFR de 300 Mw(e) de demonstração, mas com uma única cavidade central , que teria um volume igual à soma dos volumes de todas as cavidades do modelo real do protótipo .

Os modelos SCM 4.1 e SCM 4.2, são idênticos em formas e dimensões. Diferiram um do outro, apenas em alguns métodos construtivos e basicamente nos ensaios a que foram submetidos .

No SCM 4.1, foi feito o ensaio de pressurização conforme os 5 ciclos mostrados na Figura 1.12a. No 6º ciclo, a pressão de 145 atm, houve perda de água de pressurização devido a um vazamento pelo "liner". Conseguiu-se, entretanto, atingir uma pressão interna de 170 atm que não pode ser mantida devido à perda de água, pois a bomba usada na pressurização só consegue aplicar pressões hidrostáticas (sem fluxo de água) .

* 1 atm = 1,033 kgf/cm²

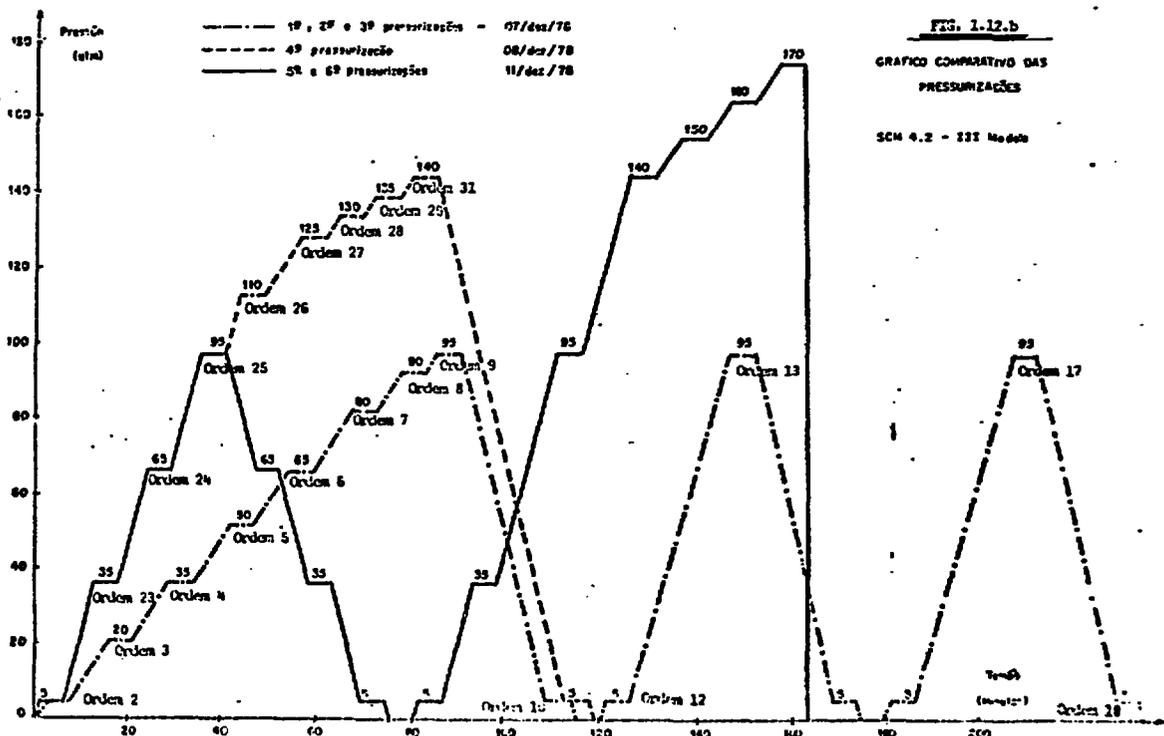
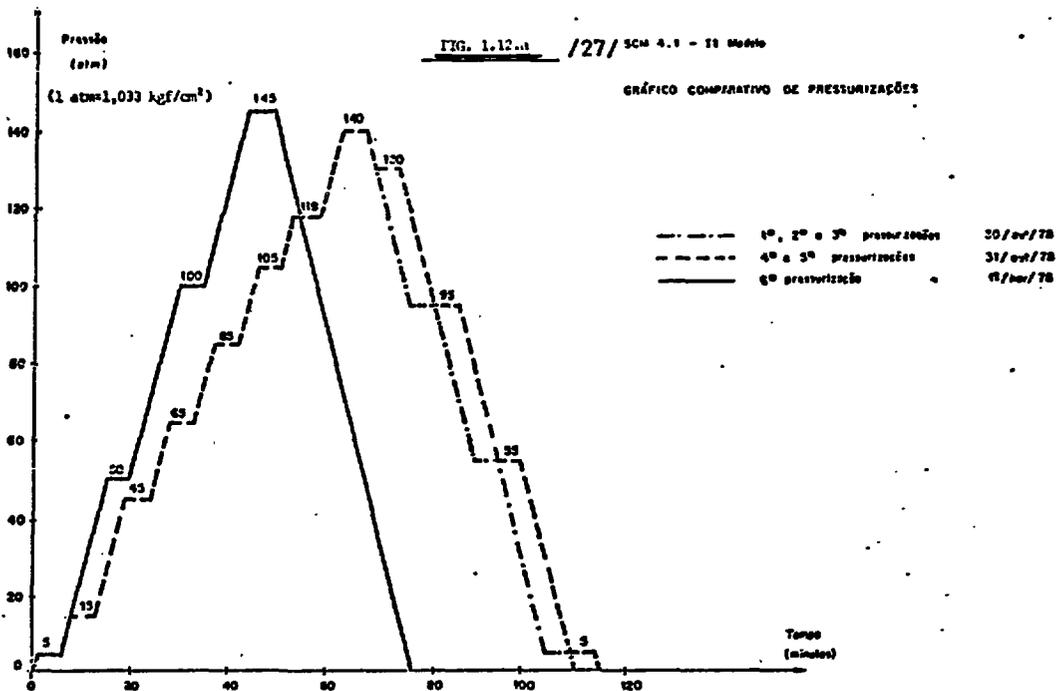


FIG. 1.12. CICLOS DE PRESSURIZAÇÃO DOS MODELOS DE VPCP DO IPEN .

O SCM 4.2., foi pressurizado conforme mostram os ciclos da Figura 1.12b. perdendo água do "liner" a 160 atm, no ciclo 6 e depois, na tentativa de colapso, não se conseguiu ultrapassar a pressão interna de 210 atm*. Em nenhum dos dois modelos se conseguiu chegar ao colapso estrutural global, e nenhum fio ou tendão se rompeu durante os ensaios .

1.7. Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do modelo de VPCP do IPEN (SCM 4.2), através das medidas feitas com "strain gage", transdutores de deslocamento e células de carga .

Deseja-se comprovar o comportamento elástico da estrutura para pressões menores ou iguais à Pressão Máxima de Cavidade ($10^4 \text{ kgf/cm}^2 = 100 \text{ atm}$), estabelecer o fim da fase linear e comparar a resposta experimental com a teórica calculada .

1.8. Desenvolvimento da Dissertação

Neste primeiro capítulo, foi colocado em termos gerais, como são os reatores nucleares convencionais e os regeneradores e foram mostradas as características gerais do projeto do GCFR de 300 MW(e) de Demonstração dando ênfase aos assuntos ligados ao vaso de pressão que é o objeto de estudo deste trabalho. Foram comparados os vasos de aço e de concreto e exposto o programa de pesquisas do IPEN.

No segundo capítulo serão dadas as características do projeto, construção e ensaios dos modelos feitos no IPEN.

O comportamento estrutural observado nos ensaios do último desses modelos, o SCM 4.2, será estudado no capítulo 4 .

No capítulo 3 são feitos dois estudos, um teórico e outro experimental, sobre as interferências causadas pelas variações de temperatura nas leituras dos TD .

No último capítulo, são ressaltadas as conclusões obtidas durante todo o trabalho .

2. O MODELO DE VPCP E TESTES DO IPEN /27/

2.1. Introdução

O objetivo principal da equipe de pesquisas de VPCP do IPEN, é construir e experimentar modelos em escala compatível com as normas ASME (1:14 ou maior) / 3/ impondo uma semelhança, tão próxima quanto possível, do protótipo do projeto de GCFR de 300 Mw(e) de demonstração da GA, descrito na Introdução .

A parte inicial desse programa compreendeu a construção e ensaios de dois modelos de concreto protendido, ou seja, os SCM4.1 e SCM4.2, já mencionados. Particularmente, o SCM4.2 é motivo de estudo neste trabalho.

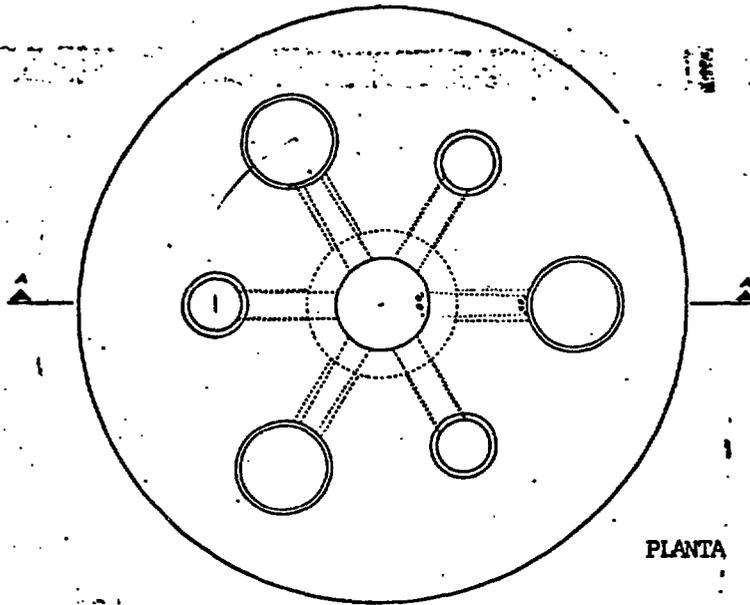
Para a fixação das dimensões básicas dos modelos SCM4.1 e SCM4.2 foi usado o seguinte critério : unificação das cavidades e interligações do protótipo numa única cavidade cilíndrica central, com o volume aproximadamente igual ao do conjunto anterior, além da redução de dimensões e de todos os parâmetros conforme a teoria dos modelos tendo como base a escala 1:20 .

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram as semelhanças e diferenças entre o modelo (1:20) do protótipo e o modelo monocavidade simplificado adotado para os SCM4.1 e SCM4.2 .

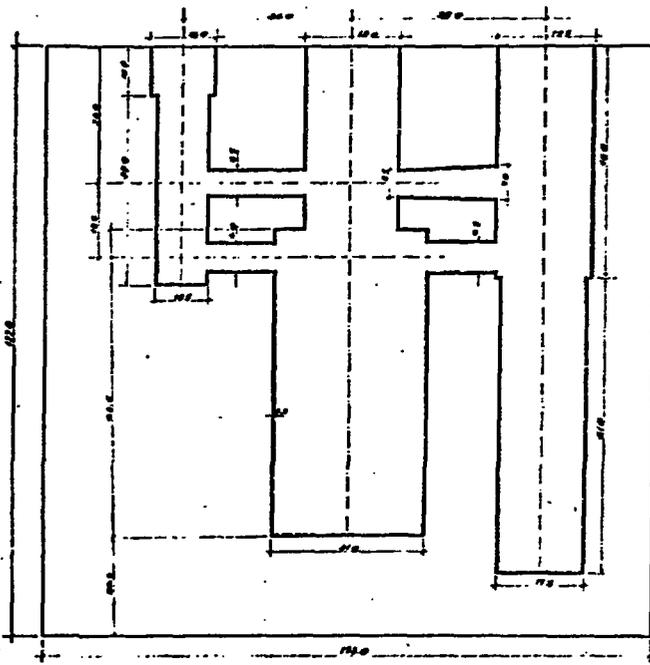
2.2. Modelo Físico

2.2.1. Descrição dos modelos

Os modelos SCM4.1 e SCM.42 de vaso de pressão de concreto protendido construídos e ensaiados no IPEN /27/ têm formato cilíndrico, com uma cavidade interna cilíndrica, concêntrica, revestida por uma membrana de cobre ("liner"). A função dessa membrana de cobre é servir como forma da cavidade interna durante a concretagem e transmitir uniformemente a



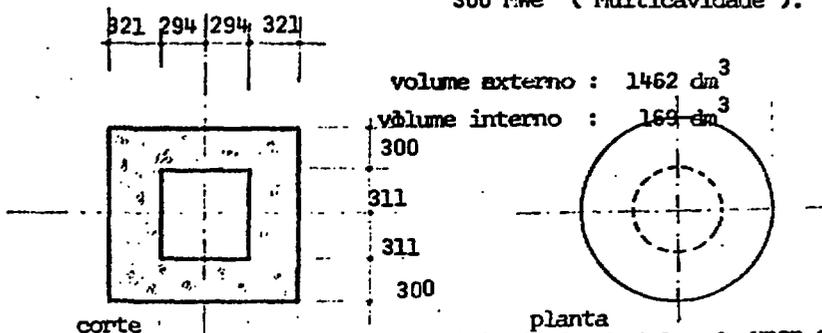
PLANTA



CORTE-AA

volume externo :
 1450 dm^3
 volume interno :
 (cavidades + inter-
 ligações) $165,5 \text{ dm}^3$

FIG. 2.1. Modelo em Escala 1/20 do VPCP para GCFR de 300 MWe (Multicavidade).



corte

planta

FIG. 2.2. Esquema Simplificado dos Modelos de VPCP SCM 4.1 e SCM 4.2.

pressão do fluido interno à parede de concreto durante os ensaios de pressurização. Ao mesmo tempo, o "liner" serve para evitar a infiltração e perda do fluido através de fissuras formadas durante os ensaios. Internamente ao "liner", existem barras de reforço, interligadas de forma a suportar a pressão, de fora para dentro do concreto fresco durante a moldagem do VPCP.

Externamente, os modelos apresentam na superfície lateral 17 estrias com 15 mm de profundidade (sentido radial) que formam entre elas 16 canaletas onde são alojados os fios da protensão circunferencial.

Há 250 condutos cilíndricos com 10 mm de diâmetro, alojados verticalmente nas paredes laterais do vaso, desde o topo até a base, onde são instalados os tendões da protensão vertical. Eles estão distribuídos em 6 fileiras circunferenciais concêntricas, cujo centro é o eixo vertical de simetria do vaso. Os tendões verticais são ancorados inferiormente por uma cabeça de aproximadamente 16 mm, feita a frio, por prensagem, que se apoia em arruelas de aço que servem para distribuir as tensões. Os tendões têm 7 mm de diâmetro e 1,60 m de comprimento; não têm aderência ao concreto e sua ancoragem ativa é feita superiormente por cones dentados.

2.2.2 Materiais da Construção

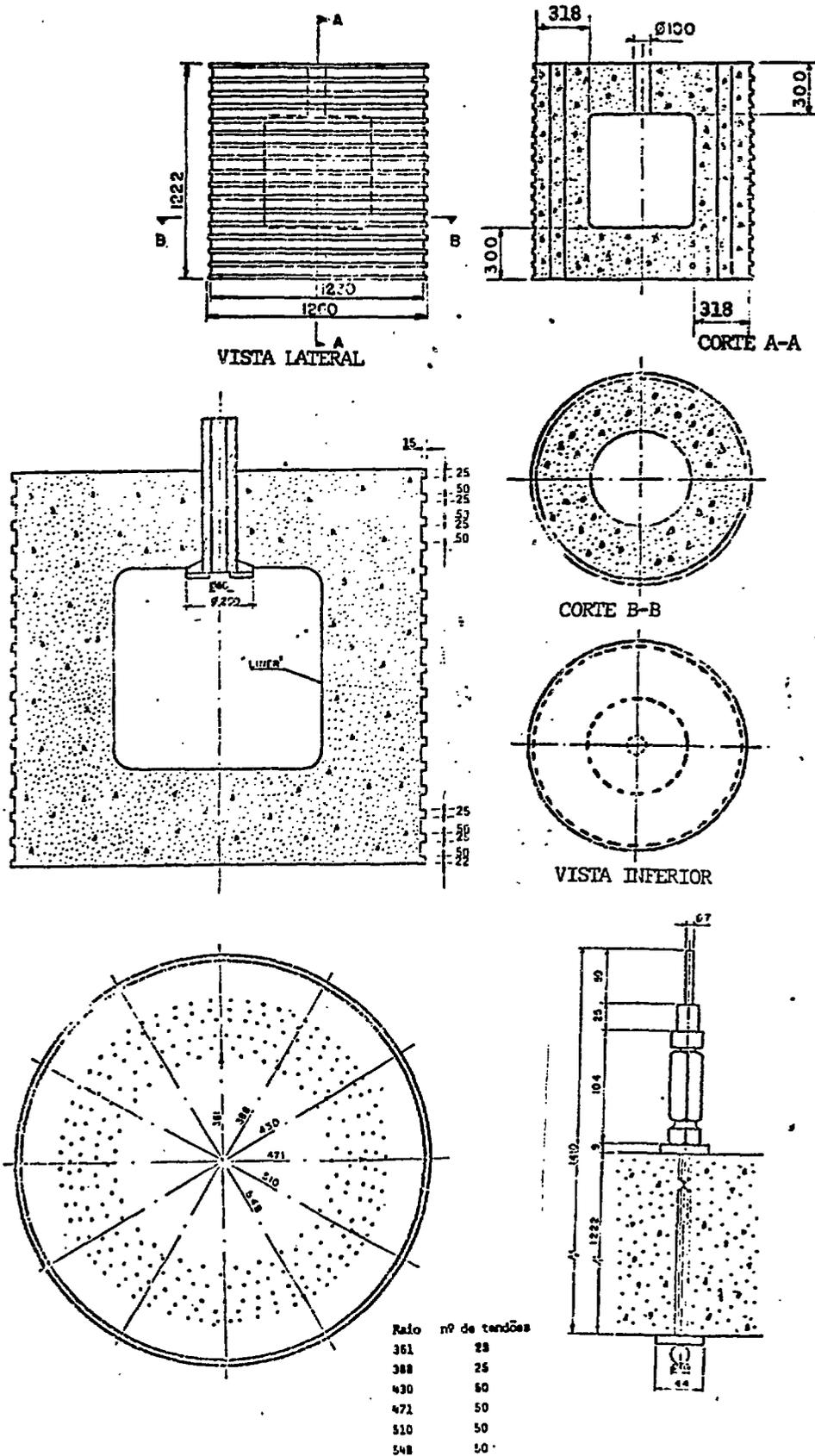
O concreto utilizado teve um traço 1: 0,87 : 0,49 : 1,51 : 0,38 (cimento/areia/pedra 0/pedra 1/água) em peso, com 1% de aditivo plastificante (tipo Melment). Os ensaios à compressão axial simples segundo as normas da ABNT, resultaram em :

$$\begin{aligned} \text{resistência a 56 dias } f_{ck} &= 455 \text{ kgf/cm}^2 \\ \text{módulo de elasticidade } E &= 350\,000 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

Os tendões da protensão vertical são de aço de baixa relaxação e os ensaios feitos de acordo com o PEB 780 apresentaram os seguintes valores médios :

$$\begin{aligned} \text{Limite de escoamento} &= 150 \text{ kgf/mm}^2 \\ \text{Resistência} &= 170 \text{ kgf/mm}^2 \\ \text{Módulo de Elasticidade Longitudinal} &= 19000 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned}$$

FIG. 2.3. - ESQUEMAS DETALHADOS DOS MODELOS SCM4.1 e SCM4.2 .



Para a protensão circunferencial dos modelos foram utilizados fios de aço estabilizados com diâmetro de 1,02 mm, cujos ensaios revelaram :

Límite de resistência : 198 kgf/mm²
Módulo de Elasticidade longitudinal : 20 000 kgf/mm²

O "liner" foi feito com chapa de cobre de 1/8 de polegada de espessura, segundo as especificações ASIM SB11 Cooper nº 110. Foram feitos e aprovados os seguintes ensaios : Gamagrafia das Soldas, Ensaios Mecânicos das Chapas e Teste de Pressurização para verificação da estanqueidade. O soldador foi qualificado em processo TIG e foi feito recozimento total para eliminação de tensões localizadas .

2.2.3. Protensão dos Modelos

A protensão dos modelos foi feita por partes, intercalando faixas de protensão circunferencial e fileiras de tendões verticais, sempre simetricamente, e de forma a evitar que, em qualquer instante, as forças de protensão parcial causassem tensões de tração ou tensão de compressão superior àquela prevista como limite elástico do concreto .

No SCM4.2 a protensão foi iniciada quando o concreto tinha 35 dias de idade e terminou aos 70 dias. Os testes do modelo foram feitos quando a idade do concreto era 84, 85 e 88 dias .

A protensão vertical consistiu do seguinte processo :

- a) colocação do tendão com arruelas, parafuso extensor e ancoragem ativa ;
- b) fixação da ancoragem ativa contra o tendão;
- c) ajuste do parafuso extensor (o mais esticado possível, sem provocar esforço de distensão do cabo) ;
- d) medição da distância entre a superfície superior do modelo e o topo do tendão ;
- e) esticamento do tendão através do parafuso extensor, com

chave de boca, até se conseguir a distensão desejada, medida através da diferença de distâncias, entre a superfície do vaso e o topo do cabo, inicial e final .

Foram previstas as seguintes perdas :

a) acomodação instantânea da ancoragem passiva (cabeça inferior contra arruela) avaliada através de testes práticos em : 1,9 mm .

b) perdas com o tempo, devidas a escorregamento da ancoragem ativa, fluência do aço, deformação lenta e retração do concreto, estimadas para 90 dias em 20% .

Assim, cada cabo foi distendido :

Força desejada 3667 kgf

Perda com tempo (20%) 733 kgf

Força inicial total 4400 kgf

área de 1 tendão : $\frac{1}{4} \cdot 7^2 = 38,48 \text{ mm}^2$

∴ Tensão inicial = $4400 / 38,48 = 114 \text{ kgf/mm}^2$

Pelas curvas Tensão x deformação

$114 \text{ kgf/mm}^2 \rightarrow 6,03 \text{ mm/m}$

Comprimento ativo do cabo = 1,36 m

Alongamento necessário = $1,36 \times 6,03 = 8,2 \text{ mm}$

Perda instantânea = 1,9 mm

Distensão total aplicada 10,1mm

A protensão radial foi conseguida enrolando-se circunferencialmente em volta do modelo, entre as estrias laterais, o fio de 1,02 mm² tensionado com 100 kgf. Isso foi conseguido com uma máquina de enrolamento mostrada na Figura 2.4, projetada especialmente para os modelos do IPEN, que gira o modelo ao mesmo tempo que mantém o fio tensionado através de um peso suspenso. O fio é ancorado anterior e posteriormente entre duas chapas de aço prensadas entre si por parafusos, chapas essas que se encontram coladas de topo dentro de cavidades próprias nas estrias do vaso. A Figura 2.5 mostra a ancoragem dos fios da protensão horizontal .

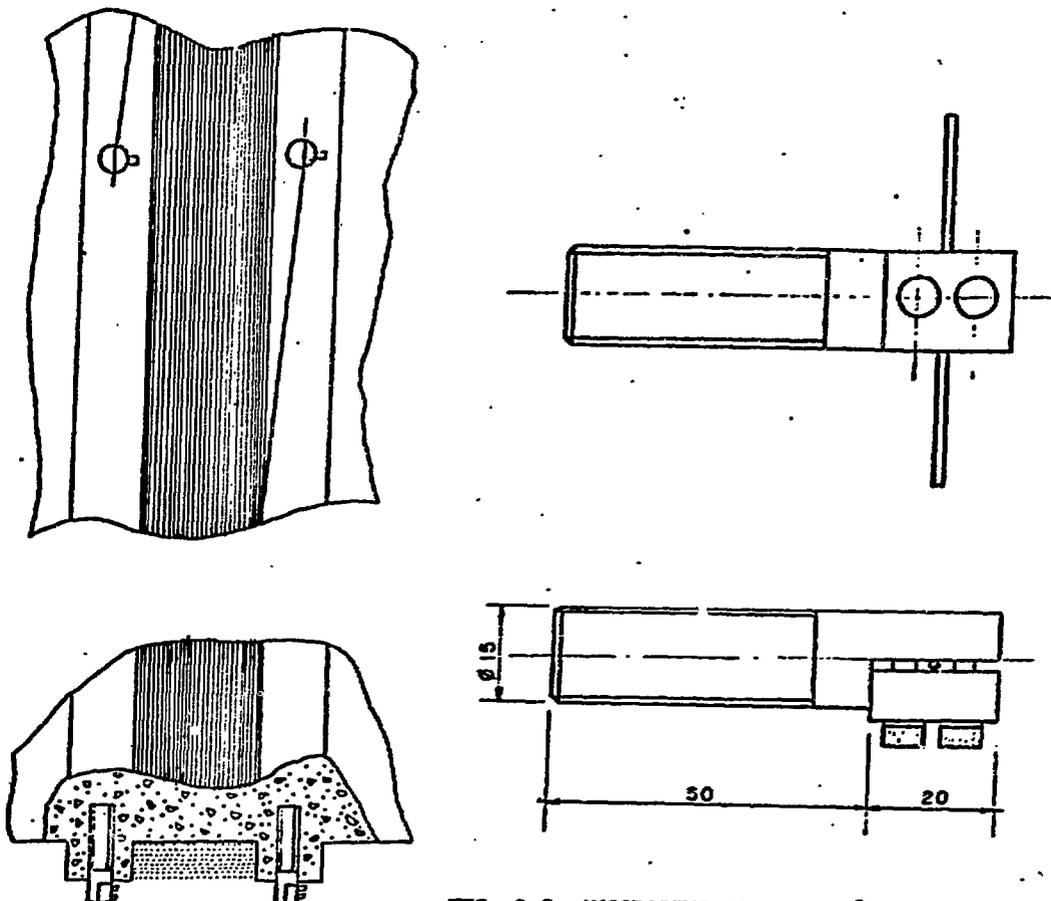


FIG. 2.5. ANCORAGENS DA PROTENSÃO HORIZONTAL

Tabela 2.1. Sequência de protensão

FASE	PROTENSÃO CIRCUNFERENCIAL	PROTENSÃO VERTICAL
19	4 faixas superiores e 4 inferiores, com 634 voltas	-
29	-	tendões das circunferências de raios 36,1 38,8 e 43,0 cm .
39	Restante com 445 voltas	-
49	-	tendões restantes

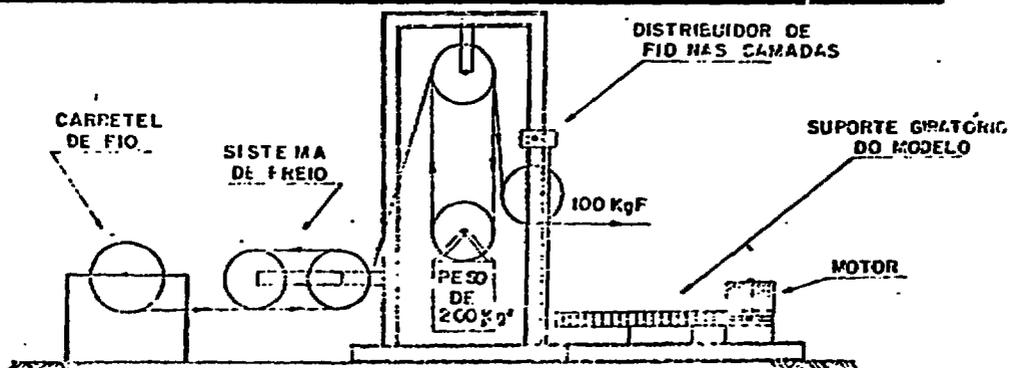


FIG. 2.4. - MÁQUINA DE PROTENSÃO PARA OS MODELOS DE VCP EM ESCALA 1:20

A Tabela 2.1 mostra o número de voltas dado em cada camada e a sequência usada na protensão .

2.3. Instrumentação

2.3.1. Sensores

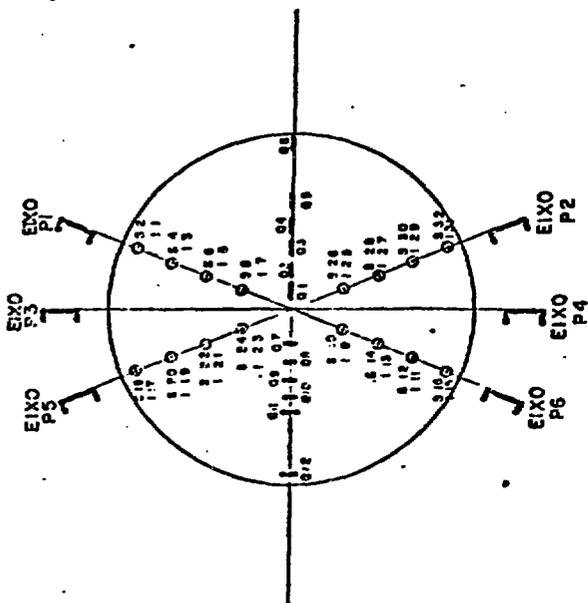
Durante a pressurização dos modelos, diversas informações são necessárias para possibilitar uma análise do comportamento do vaso. É necessário conhecer as condições de pressurização interna, que no caso é o único tipo de solicitação e por outro lado, as tensões de deformações e deslocamentos dos principais pontos da estrutura que, juntos, formam a resposta estrutural. As deformações estão relacionadas geometricamente aos deslocamentos e podem ser obtidas a partir deles ; as tensões têm relação física direta com as deformações e portanto, podem ser obtidas indiretamente, também a partir dos deslocamentos.

Nos modelos SCM4, foram usados diversos sensores para medir pressão interna, deslocamentos das faces externas das paredes, de deformações também das faces externas das paredes e força de protensão nos tendões verticais. Para isso foram instalados os transdutores de pressão, de deslocamento, as células de carga e os "strain gauges".

A Figura 2.6 apresenta o esquema da localização dos sensores no vaso .

Um Transdutor de Pressão (TP) da Bell and Howell, tipo 4-356 - 0001 foi instalado na entrada do "liner" para monitorar a pressão interna. Além disso, a pressão interna foi controlada pela bomba de pressurização que tem seu próprio transdutor de pressão .

Um total de 101 Transdutores de Deslocamento (TD) da Tektronix, modelo 062-1284-00, espalhados por toda a volta da estrutura em dois planos, acompanharam os deslocamentos da face externa das paredes e lajes, durante as pressurizações. Esses T.D., foram fixados num pórtico metálico em torno do vaso, pórtico esse que será mostrado no



EIXO	EIXO	EIXO	EIXO	EIXO	EIXO
P1	P3	P5	P6	P4	P2
35	E22	69	34	68	
36	E23	71	35	69	
37	E24	72	36	70	
38	E25	73	37	71	
39	E26	74	38	72	
40	E27	75	39	73	
41	E28	76	40	74	
42	E29	77	41	75	
43	E30	78	42	76	
44	E31	79	43	77	
45	E32	80	44	78	
46	E33	81	45	79	
47	E34	82	46	80	
48	E35	83	47	81	
49	E36	84	48	82	
50	E37	85	49	83	
51	E38	86	50	84	
52	E39	87	51	85	
53	E40	88	52	86	
54	E41	89	53	87	
55	E42	90	54	88	
56	E43	91	55	89	
57	E44	92	56	90	
58	E45	93	57	91	
59	E46	94	58	92	
60	E47	95	59	93	
61	E48	96	60	94	
62	E49	97	61	95	
63	E50	98	62	96	
64	E51	99	63	97	
65	E52	100	64	98	
66	E53	101	65	99	
67	E54	102	66	100	
68	E55	103	67	101	
69	E56	104	68	102	
70	E57	105	69	103	
71	E58	106	70	104	
72	E59	107	71	105	
73	E60	108	72	106	
74	E61	109	73	107	
75	E62	110	74	108	
76	E63	111	75	109	
77	E64	112	76	110	
78	E65	113	77	111	
79	E66	114	78	112	
80	E67	115	79	113	
81	E68	116	80	114	
82	E69	117	81	115	
83	E70	118	82	116	
84	E71	119	83	117	
85	E72	120	84	118	
86	E73	121	85	119	
87	E74	122	86	120	
88	E75	123	87	121	
89	E76	124	88	122	
90	E77	125	89	123	
91	E78	126	90	124	
92	E79	127	91	125	
93	E80	128	92	126	
94	E81	129	93	127	
95	E82	130	94	128	
96	E83	131	95	129	
97	E84	132	96	130	
98	E85	133	97	131	
99	E86	134	98	132	
100	E87	135	99	133	
101	E88	136	100	134	
102	E89	137	101	135	
103	E90	138	102	136	
104	E91	139	103	137	
105	E92	140	104	138	
106	E93	141	105	139	
107	E94	142	106	140	
108	E95	143	107	141	
109	E96	144	108	142	
110	E97	145	109	143	
111	E98	146	110	144	
112	E99	147	111	145	
113	E100	148	112	146	
114	E101	149	113	147	
115	E102	150	114	148	
116	E103	151	115	149	
117	E104	152	116	150	
118	E105	153	117	151	
119	E106	154	118	152	
120	E107	155	119	153	
121	E108	156	120	154	
122	E109	157	121	155	
123	E110	158	122	156	
124	E111	159	123	157	
125	E112	160	124	158	
126	E113	161	125	159	
127	E114	162	126	160	
128	E115	163	127	161	
129	E116	164	128	162	
130	E117	165	129	163	
131	E118	166	130	164	
132	E119	167	131	165	
133	E120	168	132	166	
134	E121	169	133	167	
135	E122	170	134	168	
136	E123	171	135	169	
137	E124	172	136	170	
138	E125	173	137	171	
139	E126	174	138	172	
140	E127	175	139	173	
141	E128	176	140	174	
142	E129	177	141	175	
143	E130	178	142	176	
144	E131	179	143	177	
145	E132	180	144	178	
146	E133	181	145	179	
147	E134	182	146	180	
148	E135	183	147	181	
149	E136	184	148	182	
150	E137	185	149	183	
151	E138	186	150	184	
152	E139	187	151	185	
153	E140	188	152	186	
154	E141	189	153	187	
155	E142	190	154	188	
156	E143	191	155	189	
157	E144	192	156	190	
158	E145	193	157	191	
159	E146	194	158	192	
160	E147	195	159	193	
161	E148	196	160	194	
162	E149	197	161	195	
163	E150	198	162	196	
164	E151	199	163	197	
165	E152	200	164	198	
166	E153	201	165	199	
167	E154	202	166	200	
168	E155	203	167	201	
169	E156	204	168	202	
170	E157	205	169	203	
171	E158	206	170	204	
172	E159	207	171	205	
173	E160	208	172	206	
174	E161	209	173	207	
175	E162	210	174	208	
176	E163	211	175	209	
177	E164	212	176	210	
178	E165	213	177	211	
179	E166	214	178	212	
180	E167	215	179	213	
181	E168	216	180	214	
182	E169	217	181	215	
183	E170	218	182	216	
184	E171	219	183	217	
185	E172	220	184	218	
186	E173	221	185	219	
187	E174	222	186	220	
188	E175	223	187	221	
189	E176	224	188	222	
190	E177	225	189	223	
191	E178	226	190	224	
192	E179	227	191	225	
193	E180	228	192	226	
194	E181	229	193	227	
195	E182	230	194	228	
196	E183	231	195	229	
197	E184	232	196	230	
198	E185	233	197	231	
199	E186	234	198	232	
200	E187	235	199	233	
201	E188	236	200	234	
202	E189	237	201	235	
203	E190	238	202	236	
204	E191	239	203	237	
205	E192	240	204	238	
206	E193	241	205	239	
207	E194	242	206	240	
208	E195	243	207	241	
209	E196	244	208	242	
210	E197	245	209	243	
211	E198	246	210	244	
212	E199	247	211	245	
213	E200	248	212	246	
214	E201	249	213	247	
215	E202	250	214	248	
216	E203	251	215	249	
217	E204	252	216	250	
218	E205	253	217	251	
219	E206	254	218	252	
220	E207	255	219	253	
221	E208	256	220	254	
222	E209	257	221	255	
223	E210	258	222	256	
224	E211	259	223	257	
225	E212	260	224	258	
226	E213	261	225	259	
227	E214	262	226	260	
228	E215	263	227	261	
229	E216	264	228	262	
230	E217	265	229	263	
231	E218	266	230	264	
232	E219	267	231	265	
233	E220	268	232	266	
234	E221	269	233	267	
235	E222	270	234	268	
236	E223	271	235	269	
237	E224	272	236	270	
238	E225	273	237	271	
239	E226	274	238	272	
240	E227	275	239	273	
241	E228	276	240	274	
242	E229	277	241	275	
243	E230	278	242	276	
244	E231	279	243	277	
245	E232	280	244	278	
246	E233	281	245	279	
247	E234	282	246	280	
248	E235	283	247	281	
249	E236	284	248	282	
250	E237	285	249	283	
251	E238	286	250	284	
252	E239	287	251	285	
253	E240	288	252	286	
254	E241	289	253	287	
255	E242	290	254	288	
256	E243	291	255	289	
257	E244	292	256	290	
258	E245	293	257	291	
259	E246	294	258	292	
260	E247	295	259	293	
261	E248	296	260	294	
262	E249	297	261	295	
263	E250	298	262	296	
264	E251	299	263	297	
265	E252	300	264	298	
266	E253	301	265	299	
267	E254	302	266	300	
268	E255	303	267	301	
269	E256	304	268	302	

Capítulo 3 .

Os Transdutores de Deslocamento, foram calibrados um a um, antes dos ensaios, num dispositivo feito especialmente para isso, fazendo aferições a cada 200 microns, numa faixa de -1600 microns a + 1600 microns . O micrometro usado na calibração dos TD tinha precisão de 20 microns .

Dez células de carga (LC) foram colocadas entre o vaso e as arruelas de apoio dos tendões da protensão vertical, para acompanhamento da força de protensão nesses cabos, conforme variava a pressão interna. As Células de Carga foram produzidas no IPEN e se compõe de cilindros de aço inoxidável com oito "strain gauges" de 2 mm cada, colocados nas laterais, que em conjunto avaliam o esforço de compressão axial a que o cilindro está submetido, conforme as deformações do cilindro, medidas pelos "strain-gauges" .

Para medir as deformações foram usados 30 "strain-gauges" (SG) auto-compensáveis da Tokyo-Sokki de tipo PL-20, de 20 mm cada um .

2.3.2. Sistema de Aquisição de Dados (SAD)

Todos os sensores usados emitem respostas em termos de diferença de potencial ou voltagem. Essa voltagem é interpretada por um Voltmetro Digital de alta precisão que através de uma Impressora de Fita de Papel, fornece a resposta de cada sensor. Todos os sensores estão ligados a um Seletor Automático de Canais que emite os sinais um a um, sequencialmente, ao voltmetro. Paralelamente, um Relógio Digital acompanha todo o sistema e pode a intervalos de tempo ajustáveis disparar o Seletor de Canais para que faça uma varredura, lendo todos os canais aos quais estão ligados os sensores. Em cada linha, a Impressora coloca dia, hora, minuto e segundos em que a leitura é feita, assim como o canal e a voltagem do sensor correspondente ao canal lido .

Nos testes do SCM4.2 foram utilizados 141 canais que estiveram ligados aos seguintes sensores : canal 0 ligado ao TP; canais de 1 a 101, ligados aos TD; canais de 102 a 110 ligados às LC e canais 111 a 140 ligados aos SG .

2.3.3. Sistema de pressurização

Para a pressurização dos modelos de vaso de pressão utilizou-se uma bomba de fabricação italiana Bombardieri. A bomba é de diafragma, tendo de um lado óleo DTE-24 que é pressionado e transfere a pressão para a água por meio de um pistão. Esta água é que penetra no "liner", pressionando assim o concreto do vaso. A pressão máxima da bomba é de 500 atm (516,5 kgf/cm²) sendo que ela só consegue aplicar pressões hidrostáticas.

A bomba trabalha sempre à pressão de fundo de escala (500 ou 100 atm) e mediante um comando, através de uma válvula de saída, libera uma parte ou o total dessa pressão de fundo de escala. Consegue-se, portanto, rápidas mudanças da pressão liberada. Um sistema eletrônico de controle, faz com que se possa incrementar a pressão liberada, pouco a pouco, conforme uma velocidade de pressurização programada, que pode ser de 0,01 atm/min até 10 atm/seg.

O sistema eletrônico de controle da bomba, tem capacidade ainda, de memorizar 16 pressões diferentes que se deseje aplicar sequencialmente, com 16 respectivas velocidades de pressurização assim como uma pausa que a bomba fará entre o momento em que atingiu a última pressão selecionada e o início da nova variação de pressão, pausa essa, necessária para que o S.A.D. faça o registro dos valores observados pelos sensores, para aquela pressão.

2.3.4. Graficadores

Foram usados 5 registradores do tipo X-Y, modelo 7123 A e 2 registradores com rolo de papel móvel com o tempo, com 4 velocidades, modelo 7010, ambos da Hewlett Packard.

Esses traçadores de gráfico devido à ausência de Amplificadores de Ganho Variável, não puderam ter suas escalas ajustadas durante os testes e serviram somente para avaliação simultânea do comportamento do vaso frente às solicitações.

3. ESTUDO DAS INTERFERÊNCIAS DA TEMPERATURA NAS MEDIDAS DOS TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTOS .

3.1. Introdução

As variações diárias de temperatura ambiente em São Paulo podem ser pequenas ou grandes, dependendo do dia. Independentemente da época do ano, temos muitas vezes em uma mesma semana, temperaturas por volta de 13°C às 6 hs da manhã e 28°C às 13 hs. Assim, podemos ter variações de temperatura ambiente diárias da ordem de 15°C , no verão ou no inverno.

Dentro do laboratório de testes de modelos de VPCP do IPEN, como a insolação é pequena e a ventilação limitada, pode-se prever que as variações diárias de temperatura sejam menores que em ambientes abertos e que uma variação de temperatura externa, demore algum tempo para se consumir dentro do laboratório.

Provavelmente pelo fato de a temperatura no laboratório variar menos que no exterior, e por se supor que sua influência nas medições feitas durante os ensaios fosse desprezível, é que não foi feito qualquer condicionamento ou controle da variação da temperatura durante os dias dos ensaios dos modelos de VPCP, do IPEN.

Posteriormente aos ensaios, analisando as leituras dos sensores, chegou-se à conclusão de que havia alguma interferência global nas medidas, isto é, todos os aparelhos apresentaram comportamento semelhante mas diferente daquele esperado. Por esta razão, visando obter fatores de correção ou, então, encontrar justificativas para algumas dessas discrepâncias, foi realizado um pequeno estudo dos efeitos da temperatura nas medidas feitas nos ensaios dos modelos de VPCP, que será apresentado a seguir.

3.2. Análise teórica

É impossível quantificar as interferências uma vez que infelizmente, não se dispõe das temperaturas durante os testes. Pode-se porém,

com suposições grosseiras, obter uma análise qualitativa .

Os transdutores de deslocamento (TD) são instrumentos de medida de deslocamento, conforme a Figura 3.1. Quando sua haste se retrai , ele marca medidas negativas crescentes e a medida que a soltamos, impulsio nada por uma mola, ela avança e o aparelho marca valores positivos crescentes. Como já foi dito, a resposta dos TD, assim como a dos outros instrumentos de medida, é em termos de variação de voltagem, que é então interpretada pelo voltímetro digital .

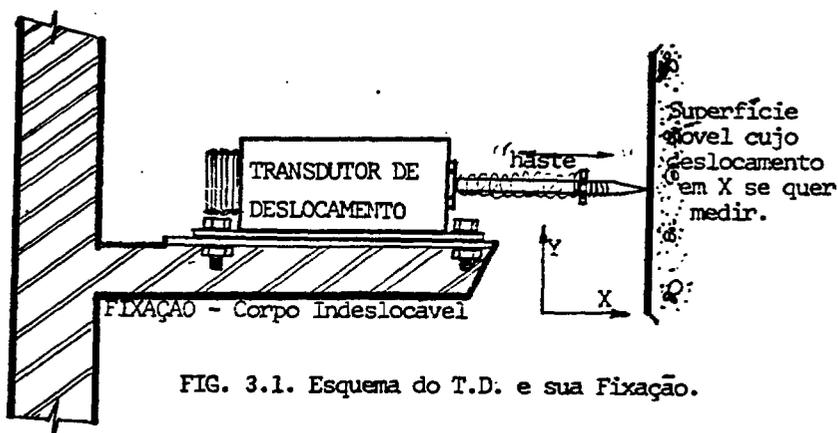


FIG. 3.1. Esquema do T.D. e sua Fixação.

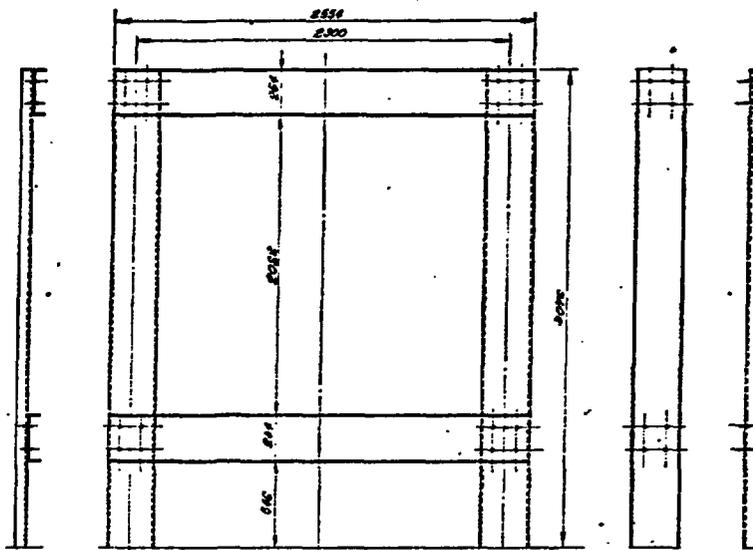
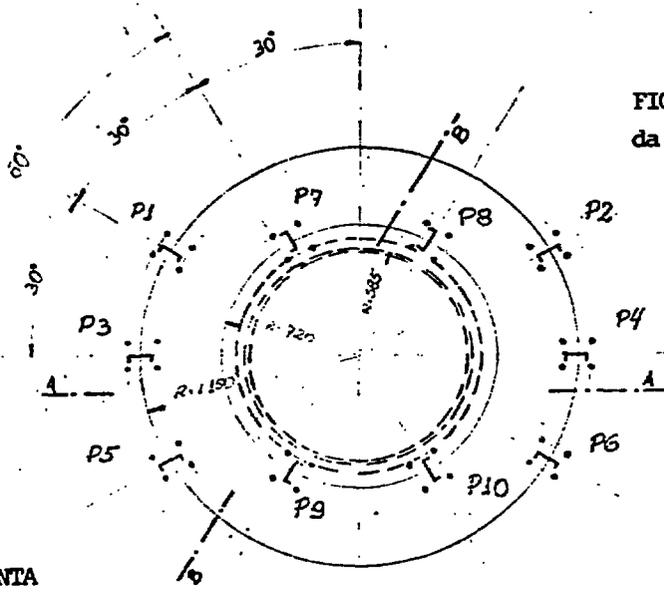
3.2.1. Dilatação do Pórtico da Instrumentação

Para fixação dos TD, construiu-se, em volta do modelo de VPCP, uma estrutura metálica apórticada, conforme o esquema da Figura 3.2. Esta estrutura, tem fundação isolada, para evitar possíveis trepidações e é composta de perfis "U" de aço, de forma que a rigidez global é muito grande e não sofre deslocamentos quando sujeita a pequenas solicitações . Porém, sem dúvida, com as variações de temperatura ela se dilata e se retrai, causando deslocamento do ponto de fixação dos TD.

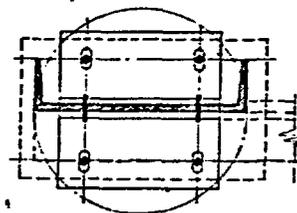
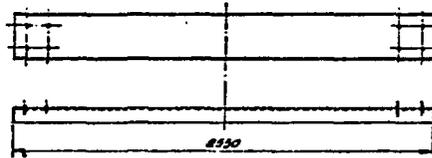
Embora a estrutura seja espacial, supondo-se que a variação de temperatura é uniforme em todos os pontos, pode-se assumir que o eixo central vertical de simetria da estrutura não se desloca com as variações de temperatura. Assim, pode-se analisar apenas uma das 6 pernas do pórtico,

FIGURA 3.2. - Pórtico da Instrumentação

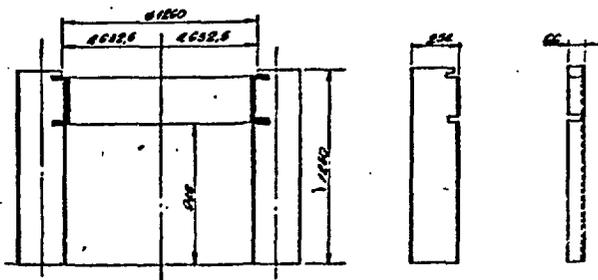
PLANTA



CORTE A-A



Detalhe dos pilares metálicos e sua fixação



CORTE B-B - Estrutura suporte do modelo .

que, será então, uma estrutura plana .

Foi utilizado o programa FEAST /35/ a disposição no IPEN ; para calcular, através do Método dos Elementos Finitos, os deslocamentos' na estrutura suporte da instrumentação devidos a variações de temperatura. Os parâmetros e condições ambientais encontram-se na Tabela 3.1.

A discretização da estrutura foi feita com elementos quadrados, conforme a malha de nós e elementos da Figura 3.3 .

Os resultados em milímetros (mm), conforme o sistema de unidades adotado, encontram-se na Tabela 3.2. Pode-se notar que o maior deslocamento observado é de 207 microns (μ) .a direção R e 363 μ na direção' Z .

3.2.2. Dilatação do Modelo

Devido à grande massa e inércia térmica, o modelo de concreto sofre menores variações de temperatura que o pórtico de aço. Mesmo ' porque, a relação entre a superfície de contato com o ar ambiente e a massa do vaso é muito menor que a mesma relação para o pórtico de aço. Assim pode-se supor que, para uma variação de 10 °C da temperatura dos perfis ' de aço, o concreto do modelo variará de 3°C a, no máximo, 7 °C sua temperatura .

Desprezando a cavidade interna do concreto e imaginando que a variação de temperatura seja uniforme em toda a massa, pode-se calcular' as dilatações vertical e lateral do vaso através da relação :

$$\Delta l_i = l_i * \alpha * \Delta t \quad (3.1)$$

Δl_i = dilatação térmica na direção "i"

α = coeficiente de dilatação térmica

$\alpha_c = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (para o concreto)

$\alpha_s = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (para o aço)

PROTECO SUPORTE DA INSTRUM. - VARTEMP. - 1/2 ESTRUT. - VALLIN - FEV/70

NÚMERO DE VMS.....	57	
NÚMERO DE ELEMENTOS.....	56	Tabela 3.1. - Parametros e Condições ambientais usados no cálculo pelo FEAST.
NÚMERO DE MATERIAIS DIFERENTES.....	2	
NÚMERO DE CARTÕES DE PASSADO.....	0	
ACELERAÇÃO AXIAL.....	0.0	
VELOCIDADE ANGULAR.....	0.0	
TEMPERATURA DE REFERÊNCIA.....	0.20000 02	TEMPERATURA EMPOLTA EM TODOS OS PONTOS
NÚMERO DE APROXIMAÇÕES.....	1	MODAIS = 30
ESTRUTURA EM ESTADO PLANO DE TENSÕES		
NÚMERO DO MATERIAL.....	1	ALFA1(T) TENS DE ESCALA
NÚMERO DE CARTÕES DE TEMPERATURA.....	2	0.115000-04 0.103000 05
DENSIDADE MASSA.....	0.30000 01	0.115000-04 0.103000 05
RAZÃO ENTRE OS MÓDULOS.....	0.10000 01	
TEMPERATURAS	E (RZ)	NU (RZ)
20.00 0.210000 05	0.200000 00	0.210000 05
40.00 0.210000 05	0.260000 00	0.210000 05
		0.230000 00
		0.230000 00
		0.115000-04

N.º	NÚMERO	JZ
1	0.0	0.0
2	-0.26375220-01	0.25991050-02
3	-0.49929240-01	0.11314830-01
4	-0.79362200-01	0.23632550-01
5	-0.10752000 00	0.43304350-01
6	-0.13215720 00	0.52103950-01
7	-0.15203450 00	0.75579850-01
8	-0.17756130 00	0.10514720 00
9	-0.19423640 00	0.13335700 00
10	-0.20351450 00	0.16036600 00
11	-0.20971500 00	0.17701500 00
12	-0.21454570 00	0.21355350 00
13	-0.21939330 00	0.23935120 00
14	-0.22425660 00	0.26416400 00
15	-0.17316150 00	0.28930700 00
16	-0.16215300 00	0.31175000 00
17	-0.15445400 00	0.33464500 00
18	-0.14700570 00	0.35555250 00
19	-0.14024200 00	0.37335500 00
20	0.0	0.0
21	-0.16325720-01	0.13751500-01
22	-0.34145740-01	0.32465810-01
23	-0.60343540-01	0.43355630-01
24	-0.94136260-01	0.64555120-01
25	-0.11408990 00	0.77956530-01
26	-0.13431470 00	0.94457360-01
27	-0.15335910 00	0.11240540 00
28	-0.17676100 00	0.14154370 00
29	-0.19425350 00	0.16459250 00
30	-0.21251450 00	0.19214450 00
31	-0.23021120 00	0.22159750 00
32	-0.24845770 00	0.25465350 00
33	-0.26727300 00	0.28793840 00
34	-0.28656670 00	0.32115830 00
35	-0.30635440 00	0.35433600 00
36	-0.32663700 00	0.38795570 00
37	-0.34741760 00	0.42110620 00
38	-0.36870540 00	0.45380540 00
39	0.0	0.0
40	-0.24024320-02	0.28425630-01
41	-0.17051700-01	0.55321510-01
42	-0.44247900-01	0.73723490-01
43	-0.81303400-01	0.87615050-01
44	-0.11397130 00	0.17127700 00
45	-0.12355470 00	0.11415730 00
46	-0.13333810 00	0.13157420 00
47	-0.14332150 00	0.14991510 00
48	-0.15350490 00	0.16915100 00
49	-0.16388830 00	0.18938690 00
50	-0.17447170 00	0.21062280 00
51	-0.18525510 00	0.23285870 00
52	-0.19623850 00	0.25609460 00
53	-0.20742190 00	0.28033050 00
54	-0.21880530 00	0.30556640 00
55	-0.23038870 00	0.33180230 00
56	-0.24217210 00	0.35903820 00
57	-0.25415550 00	0.38727410 00
58	-0.26633890 00	0.41651000 00
59	-0.27872230 00	0.44674590 00
60	-0.29130570 00	0.47808180 00
61	-0.30408910 00	0.51051770 00
62	-0.31707250 00	0.54405360 00
63	0.0	0.0
64	0.0	0.0
65	0.0	0.0
66	0.0	0.0
67	0.0	0.0
68	0.0	0.0
69	0.0	0.0
70	0.0	0.0
71	0.0	0.0
72	0.0	0.0
73	0.0	0.0
74	0.0	0.0
75	0.0	0.0
76	0.0	0.0
77	0.0	0.0
78	0.0	0.0
79	0.0	0.0
80	0.0	0.0
81	0.0	0.0
82	0.0	0.0
83	0.0	0.0
84	0.0	0.0
85	0.0	0.0
86	0.0	0.0
87	0.0	0.0

Tabela 3.2. - Deslocamentos resultantes da variação de temperatura.

(mm)

53	0.83997050-01	0.34120770 00
54	-0.49127310-01	0.14311470 00
55	-0.61751430-01	0.15534540 00
56	-0.74359650-01	0.17349720 00
57	-0.74377230-02	0.20276250 00
58	-0.71124150-01	0.21777700 00
59	-0.57511520-01	0.23427610 00
60	-0.32745940-01	0.17055130 00
61	-0.41159110-01	0.17226620 00
62	-0.43549530-01	0.17226620 00
63	-0.44917570-01	0.17226620 00
64	-0.47461400-01	0.17226620 00
65	-0.49059670-01	0.22335500 00
66	-0.15339950-01	0.15717420 00
67	-0.25728700-01	0.19245920 00
68	-0.35778370-01	0.17226620 00
69	-0.24543730-01	0.20762330 00
70	-0.27310000-01	0.21171700 00
71	-0.22503250-01	0.22503250 00
72	0.0	0.15576630 00
73	0.0	0.17226620 00
74	0.0	0.15576630 00
75	0.0	0.22503250 00
76	0.0	0.17226620 00
77	0.0	0.15576630 00
78	0.0	0.22503250 00
79	0.0	0.17226620 00
80	0.0	0.22503250 00
81	0.0	0.17226620 00
82	0.0	0.15576630 00
83	0.0	0.22503250 00
84	0.0	0.17226620 00
85	0.0	0.15576630 00
86	0.0	0.22503250 00
87	0.0	0.17226620 00

l_i = comprimento a dilatar, na direção "i"

Δt = variação de temperatura

Tabela 3.3. Dilatações do concreto.

Direção	l_i (mm)	$\Delta t = 5^\circ\text{C}$	$\Delta t = 3^\circ\text{C}$	$\Delta t = 7^\circ\text{C}$	Obs.
		Δl (mm)	Δl (mm)	Δl (mm)	
Vertical	1222	0,0642	0,0385	0,0899	(total)
Lateral	1260/2	0,0331	0,0199	0,0463	(de cada lado)

Deve-se lembrar ainda, que o modelo de concreto esteve apoiado numa estrutura metálica independente, a 1,20 m do solo, e que essa estrutura dilata-se, pelo efeito da temperatura, da mesma forma que o pórtico da instrumentação.

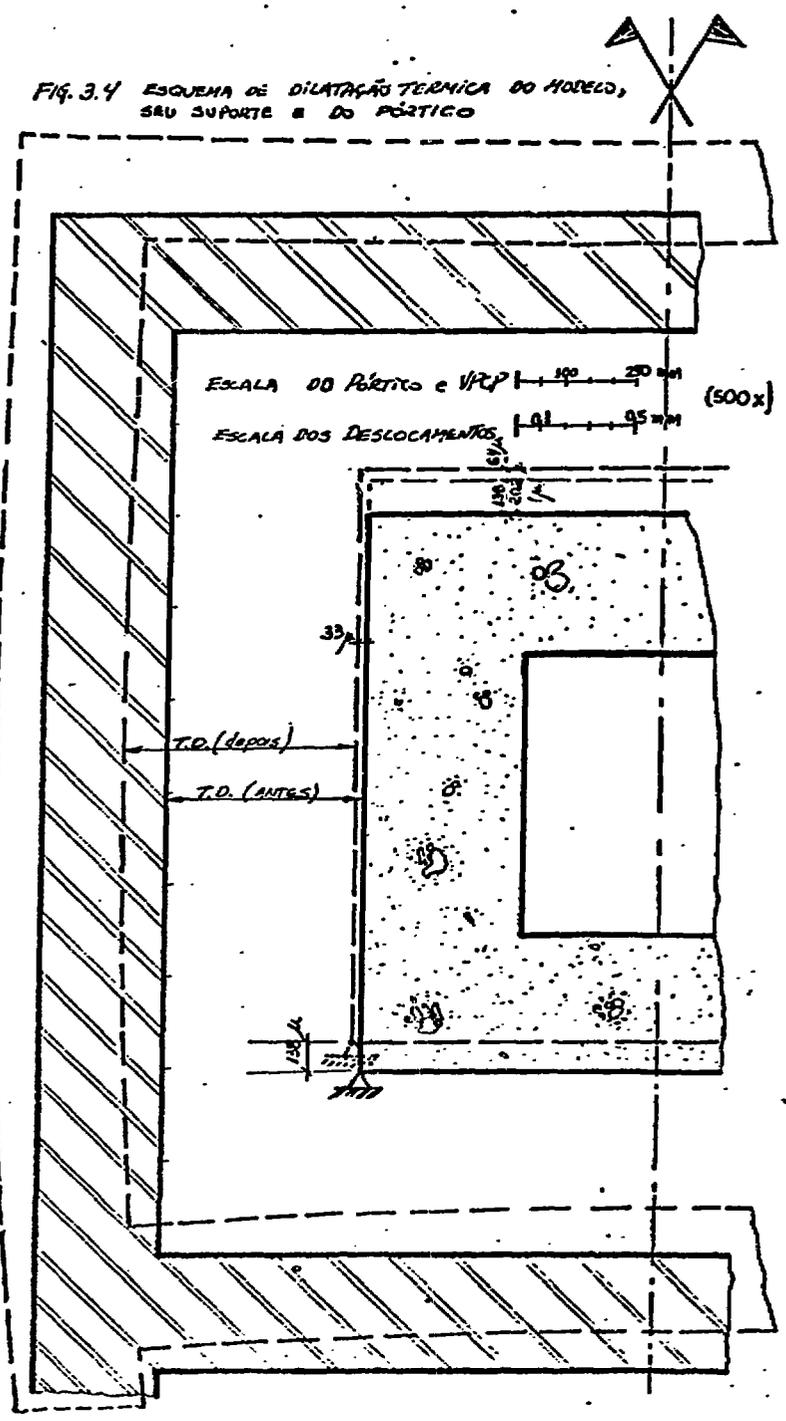
Assim, para $l_i = 1200$ mm e $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ de (3.1) resulta $\Delta l_{\text{base}} = 0,138$ mm.

Como, devido à força gravitacional, a base do modelo não se desloca em relação ao topo da estrutura suporte do modelo, o deslocamento sofrido pela laje de base do vaso (Δl_{INF}) será igual ao valor do deslocamento do topo da estrutura suporte (Δl_{base}) e o deslocamento da laje do topo do modelo, será a soma do deslocamento da estrutura suporte do modelo, com a dilatação térmica vertical (Δl_{VERT}) total. Assim, foram calculados os valores da Tabela 3.4, onde os sinais positivos, se referem a uma diminuição da distância entre pórtico e vaso causada por acréscimo da temperatura, e os negativos refletem um aumento da distância entre o pórtico e vaso.

Tabela 3.4. - Variação de Distância entre o pórtico e o vaso causada por um acréscimo de temperatura do vaso e de seu suporte de aço (mm).

	$\Delta t_s = 10^\circ\text{C}$		
	$\Delta t_c = 3^\circ\text{C}$	$\Delta t_c = 5^\circ\text{C}$	$\Delta t_c = 7^\circ\text{C}$
Δl_{INF}	-0,138	-0,138	-0,138
Δl_{SUP}	0,1765	0,2022	0,2279
Δl_{LAT}	0,0199	0,0331	0,0463

FIG. 3.4 ESQUEMA DE DILATAÇÃO TÉRMICA DO MODELO, SEU SUPORTE E DO PÓRTICO



3.2.3. Variações nos TD

Sobrepondo, agora, os efeitos causados pelas variações de temperatura, no pórtico da instrumentação e no modelo, teremos o efeito da interferência da temperatura nas medidas feitas pelos TD.

A Figura 3.4. mostra graficamente os resultados dos dois itens anteriores, juntos.

O valor das variações de leitura dos transdutores de deslocamento (TD) devido a variações de temperatura apenas, é dado pela diferença dos deslocamentos mostrados na Figura 3.4. A Figura 3.5. mostra a interferência que seria teoricamente observada pelos TD para uma variação de 10°C na temperatura do aço e variações de $3,5$ ou 7°C na temperatura do concreto.

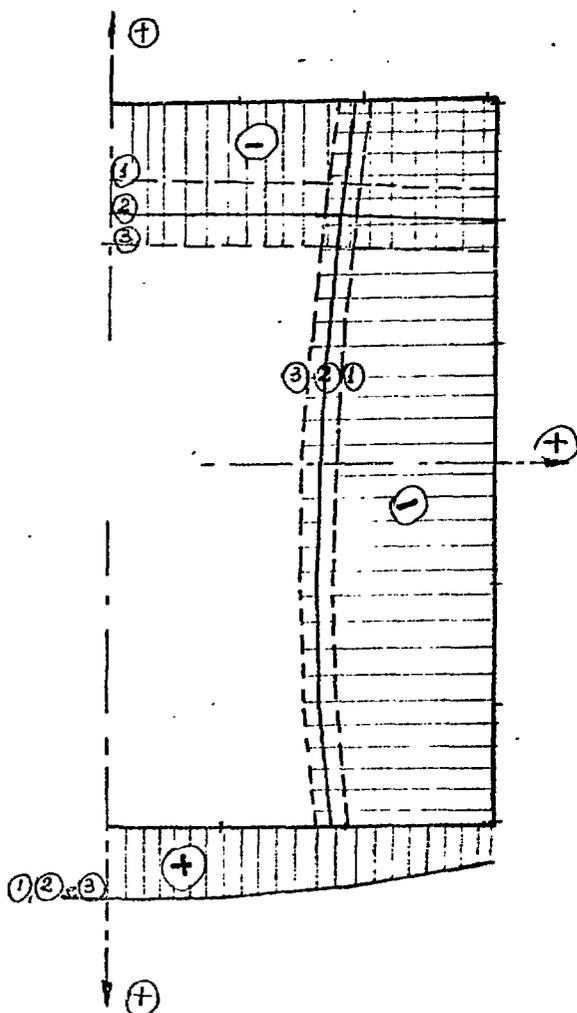
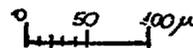


FIGURA 3.5. - Interferência teórica da variação de temperatura nos TD.

- 1 ... $\Delta t_c = 7^{\circ}\text{C}$ e $\Delta t_s = 10^{\circ}\text{C}$
 2 ... $\Delta t_c = 5^{\circ}\text{C}$ $\Delta t_s = 10^{\circ}\text{C}$
 3 ... $\Delta t_c = 3,5^{\circ}\text{C}$ $\Delta t_s = 10^{\circ}\text{C}$

Escala dos deslocamentos



3.2.4. Movimentos de Corpo Rígido

Pequenas restrições de movimento, causadas por atritos e travamentos não considerados no cálculo, podem impedir que as dilatações térmicas ocorram da maneira idealizada, onde no eixo vertical de simetria os deslocamentos foram supostos nulos. A correção necessária, nesses casos, pode ser obtida imaginando-se que durante as dilatações térmicas, o pórtico e o modelo sofreram movimentos de Corpo Rígido.

Os movimentos de translação vertical, não ocorrem, pois a força gravitacional mantém o modelo no lugar e para o pórtico, há ainda o engaste inferior.

As rotações do modelo não ocorrem pela sua enorme rigidez e pela força gravitacional. As rotações do pórtico não deveriam ocorrer por causa das restrições de deslocamentos causadas pelo engaste inferior.

Restam, portanto, os deslocamentos de translação horizontais que tentaremos corrigir.

A Figura 3.6. mostra o vaso, visto de topo e um possível deslocamento de translação horizontal (δ) numa direção qualquer (θ). Com relações trigonométricas elementares pode-se chegar às equações 3.2 e 3.3, que nos fornecem os valores dos deslocamentos radiais, sentidos na direção de referência (x) que representa a direção de medida dos TD.

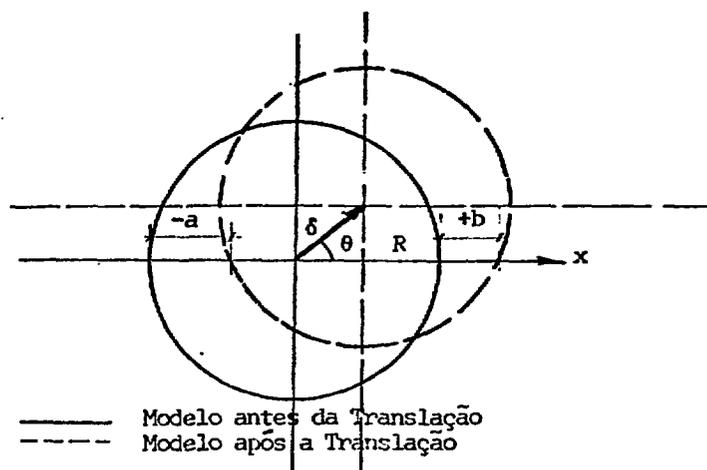


Figura 3.6. - Planta simplificada do Modelo antes e após um movimento de Translação Horizontal.

$$a = \delta \cos \theta + R - \sqrt{R^2 - (\delta \sin \theta)^2} \quad (3.2)$$

$$b = \delta \cos \theta - R + \sqrt{R^2 - (\delta \sin \theta)^2} \quad (3.3)$$

No caso em estudo, R é da ordem de 60 cm (600.000 μ) e δ é da ordem dos deslocamentos da Tabela 3.4 ($\delta=200\mu$).

Assim :

$$\sqrt{R^2 - (\delta \sin \theta)^2} \approx R \text{ donde :}$$

$$a = b = \delta \cos \theta \quad (3.4)$$

Pela equação 3.4, pode-se ver que mesmo para valores desconhecidos de δ e θ , pelo fato de que $a = b$, sabe-se que o deslocamento de corpo rígido sentido em um ponto qualquer é igual, mas em sentido contrário, ao deslocamento do ponto simetricamente oposto.

Assim, fazendo a média dos deslocamentos medidos ou calculados em pontos simetricamente opostos, estaremos eliminando os movimentos de corpo rígido.

A Figura 3.7 mostra as médias dos valores simetricamente opostos mostrados na Figura 3.5.

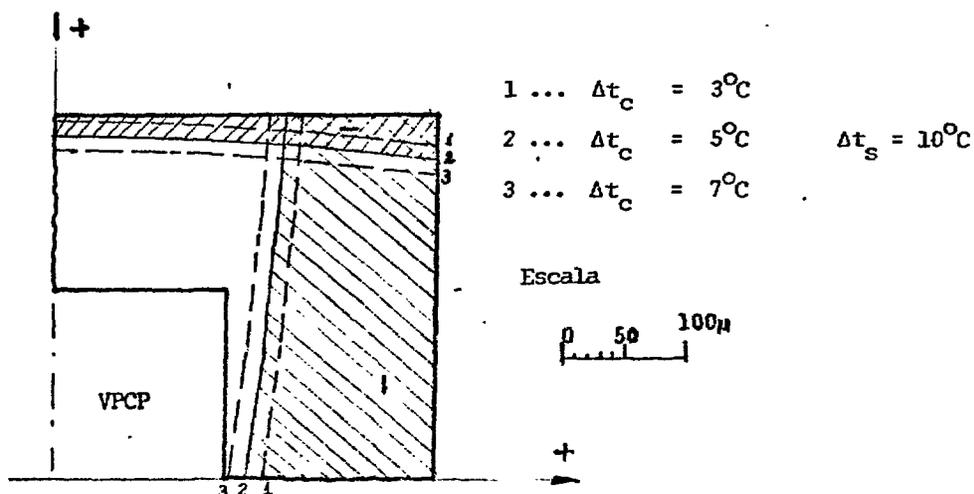


FIGURA 3.7. - Interferência teórica da variação de temperatura (médias) nos TD.

Como os deslocamentos são diretamente proporcionais às variações de temperatura, qualquer outro valor de temperatura causará efeitos proporcionalmente idênticos aos apresentados, desde que se mantenha a relação entre as variações de temperatura do aço e do concreto (10°C para 3, ou 5, ou 7°C). Esses deslocamentos com grandezas diferentes podem ser obtidos multiplicando-se o valor encontrado para 10°C multiplicado pela nova variação de temperatura dividida por 10°C .

Todo o raciocínio foi desenvolvido para a hipótese de um acréscimo da temperatura, porém, no caso de uma diminuição, os efeitos seriam os mesmos mas em sentido contrário.

3.3. Análise Experimental

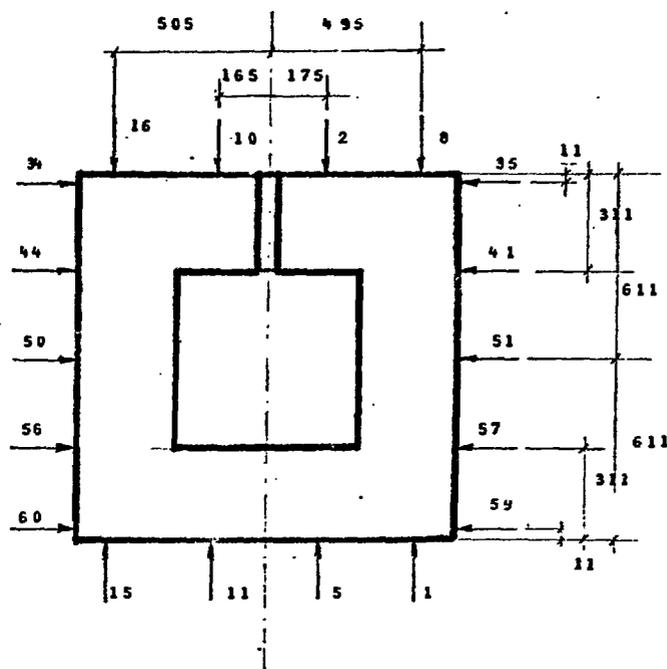
Tendo-se teoricamente previsto que as interferências nos TD poderiam ser da ordem de 100μ (Figura 3.5) em alguns pontos, dependendo da variação da temperatura, resolveu-se verificar experimentalmente como e quanto essas interferências atuavam nos TD. Para isso, foram montados 18 TD dispostos num plano, em volta do SC/4.2 após os ensaios de pressurização. Foram feitas leituras dia e noite, a cada meia hora, durante uma semana, sem qualquer pressão interna ao modelo de vaso.

Foram colhidas 3870 leituras, acompanhadas do horário (dia, hora, minuto e segundo) em que foram feitas e do canal a que se referiram. Essas informações, impressas em fita de papel, foram perfuradas em cartões e introduzidas no computador. Foi utilizado o programa SAS / 4 /, à disposição no CPD do IPEI, para manuseio de arquivo, listagem e confecção de gráficos discretos.

Na Figura 3.8 é apresentado o esquema das posições onde se colocaram TD e os respectivos canais a que foram ligados.

Num primeiro passo, foram feitos os gráficos das leituras de cada canal versus o tempo, durante todos os 5 dias que durou o ensaio.

Se não houvesse interferências, esse gráficos deveriam ser uma constante pois não havia qualquer solicitação ao modelo. Entretanto, não foi o que aconteceu. Da maior ou menor intensidade, observou-se nos



N ... Transdutor de deslocamento
 instalado na posição indicada
 ligado ao canal N .

Figura 3.8. - Mapa dos TD, Canais e Posições em torno do Vaso .

diversos canais um comportamento similar ao mostrado na Figura 3.9. Comparando-se este comportamento com as variações da temperatura ambiente dentro do laboratório (Figura 3.10), que aumentam com o nascer do sol e começam a diminuir à tarde, observa-se uma evidente correlação .

Alguns canais continham um ou outro valor absurdo, proveniente de falhas casuais do Sistema de Aquisição de Dados, o que "mascarou" os gráficos já que, para poder colocar todos os pontos num mesmo gráfico, o SAS amplia a escala e assim, as pequenas variações ficam imperceptíveis. Nestes casos, esses valores visivelmente absurdos foram abandonados e elaborou-se o novo gráfico, amplificado, notaram-se novos dados disparatados em relação aos demais, que foram abandonados, e novos gráficos foram confeccionados, até que não se tivesse mais pontos disparatados.

No terceiro dia dos ensaios, conseguiu-se um termômetro digital, que foi acoplado ao SAD, no canal 86. Muitos canais acusaram nesse mesmo dia e horário, uma brusca variação das medidas. Esse tipo de interferência, se tivesse ocorrido durante um ensaio de pressurização, também seria facilmente identificada e é evidente que não tem qualquer correlação

ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA NAS MEDIDAS COM O V.P.C.P. ---SILS VALLIN---
 13 DE THURSDAY, JUNE 12, 1980

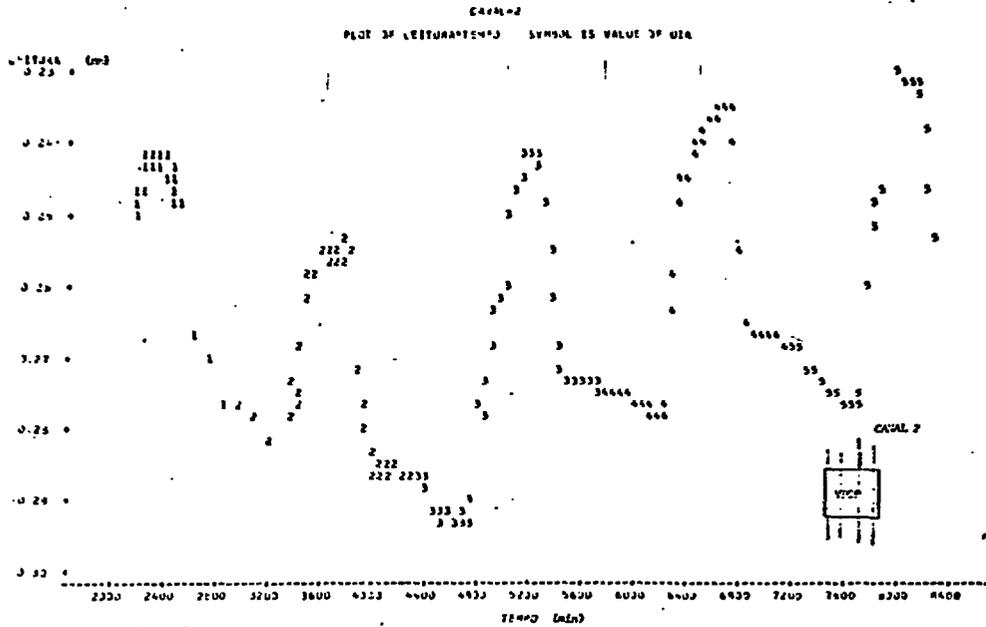


FIG. 3.9. - COMPORTAMENTO DO CANAL 2 COM O TEMPO.

ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA NAS MEDIDAS COM O V.P.C.P. ---SILS VALLIN---
 14 DE THURSDAY, JUNE 12, 1980

SARAFIM DE VARIACAO DE TEMPERATURA
 ANTERIORMENTE AO 11 35 DO DIA E NAO HAVIA MEDICAO DE TEMPERAT
 PLOT DE LEITURA-TEMPO SYMPL IS VALUE OF H244

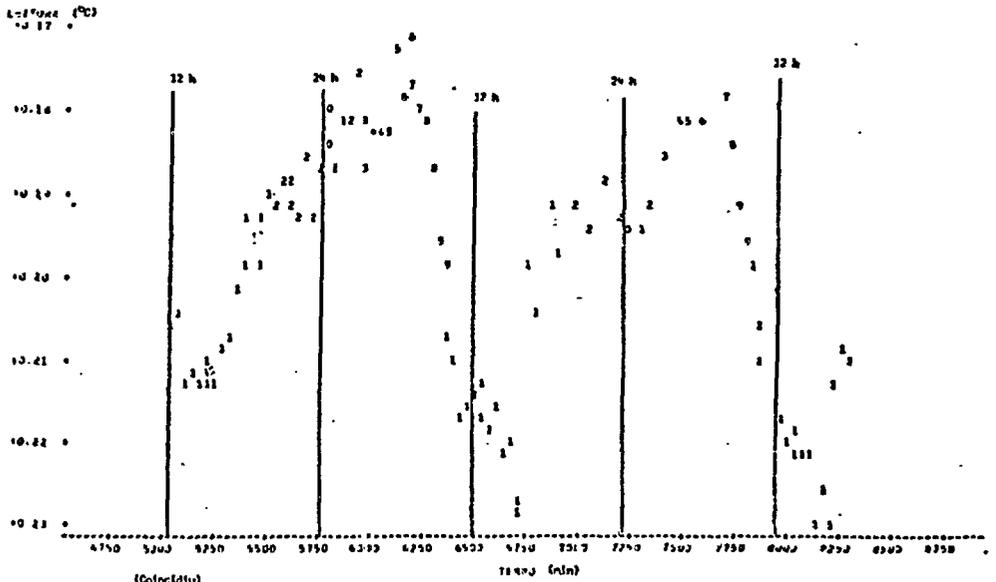


FIG. 3.10. - VARIAÇÕES DE TEMPERATURA COM O TEMPO

com a temperatura, que varia lentamente e não de forma brusca. Por isso, as leituras foram corrigidas através de uma alteração em todos os valores de leitura a partir daquele instante, na mesma grandeza da variação de leitura instantânea sentida .

O fato de não se ter termômetro nos dois primeiros dias deste estudo experimental, em nada influi, uma vez que, o estudo é qualitativo e não se pretende com ele determinar qualquer correção ou fazer correlação com os ensaios .

Alguns canais, por algum intervalo de tempo, tiveram comportamento anormal e marcaram variações de leitura de até 10 vezes maior que as normalmente observadas. As observações nesses intervalos de tempo, foram desprezadas .

Após todas as correções e abandonos de dados que poderiam ser feitos, procurou-se quantificar o valor do campo de variação das leituras durante toda a semana e também, um valor aproximado da variação observada durante um dia, entre 7 h e 18 h, para cada canal. Além disso, foi dada uma nota conforme a Tabela 3.5, para o comportamento do TD, quanto à confiabilidade de seu funcionamento. Assim, o TD instalado no canal 2, mostrado na Figura 3.9, teve nota 0 (ótimo), o canal 8 da Figura 3.11 teve nota RB (regular a bom) .

Os canais correspondentes a TD laterais, tiveram dois comportamentos distintos, como se pode observar na Figura 3.12. Esses canais tiveram duas notas e a avaliação da máxima variação de leitura diária, foi feita no período com melhor nota e nos casos em que um dos trechos teve nota I (inaproveitável), a avaliação da máxima variação de leitura total, foi feita levando-se em conta somente o trecho aproveitável .

Sempre que um acréscimo absoluto do valor da leitura fosse causado por um aumento da temperatura, adotou-se o sinal negativo para as variações, em concordância com as leituras durante os ensaios, que diminuem com o incremento da pressão interna .

Na Figura 3.13 observa-se, para cada canal, as notas dadas ao TD e as máximas variações de leitura: total e diária, além do gráfico desses valores .

ANÁLISE DO ESPECTRO DA TEMPERATURA NAS MEDIDAS COM 10 M3 V.P.C.P.
 ---CELSD VALLEN---
 QUARTA ETAPA DO TRATAM. DOS JAGUOS, COM ABANDONO DE DADOS QUEM SE SEPARAÇÃO DE FREQUÊNCIAS COM MAGNITUDES DIFERENTES.
 CANAL 08

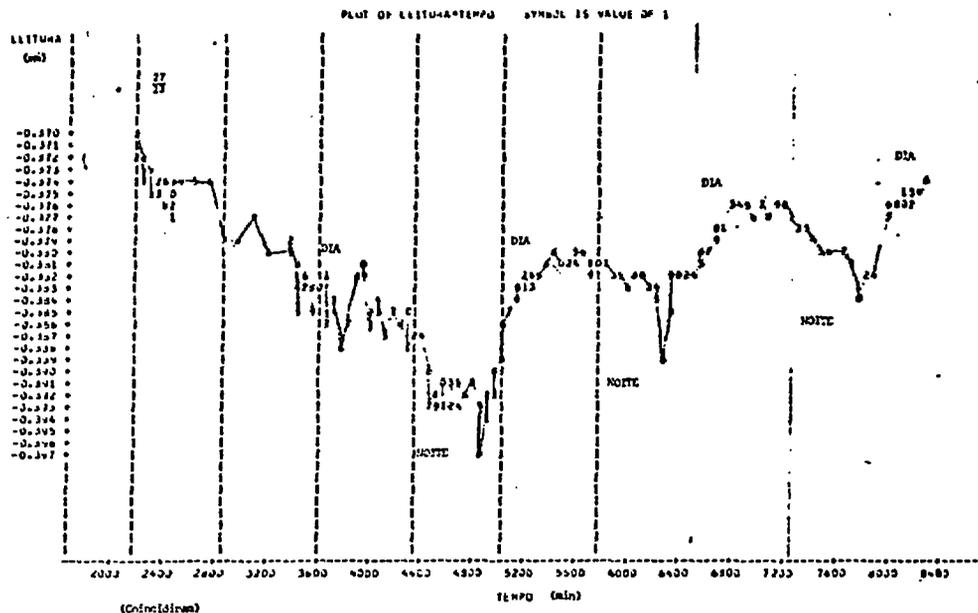


FIG. 3.11. - ESPECTRO DO CANAL 08 COM O TEMPO.

ANÁLISE DO ESPECTRO DA TEMPERATURA NAS MEDIDAS COM 10 M3 V.P.C.P.
 ---CELSD VALLEN---
 QUARTA ETAPA DO TRATAM. DOS JAGUOS, COM ABANDONO DE DADOS QUEM SE SEPARAÇÃO DE FREQUÊNCIAS COM MAGNITUDES DIFERENTES.
 CANAL 05

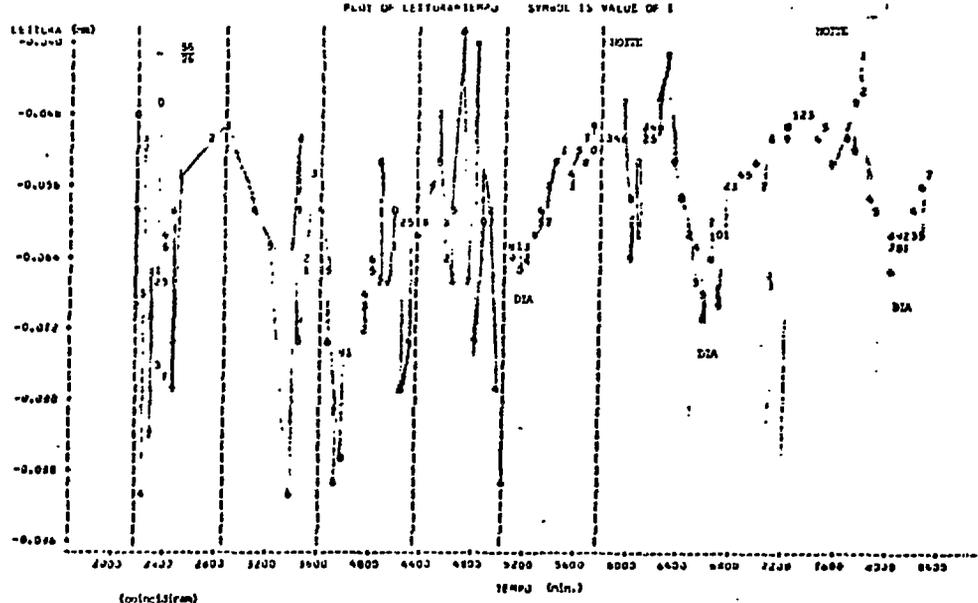
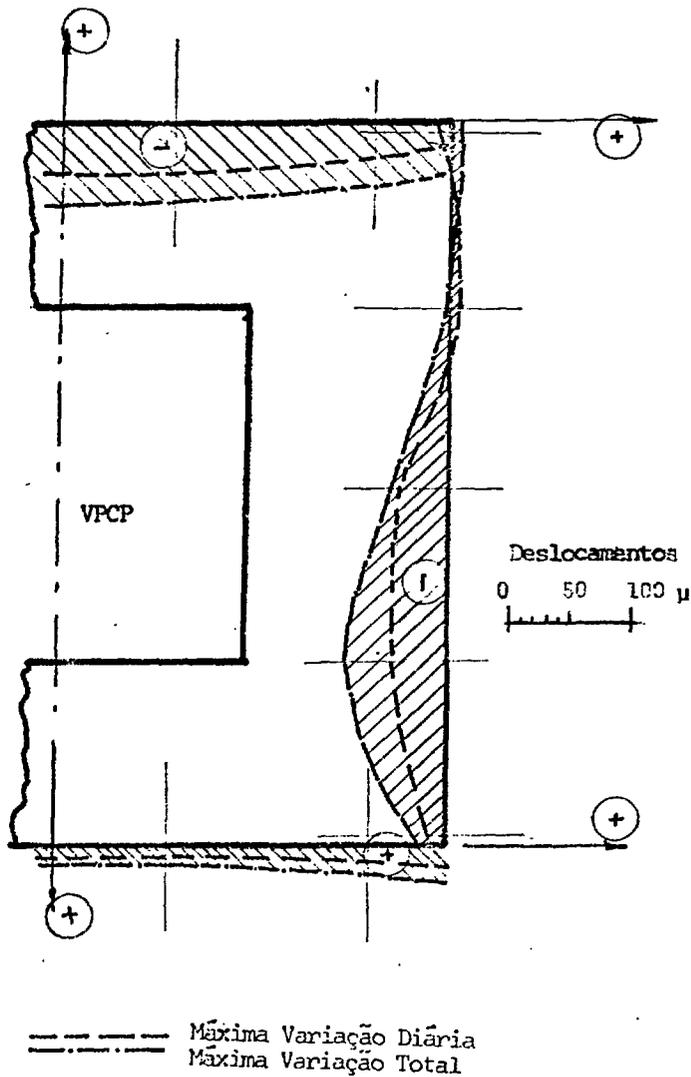


FIG. 3.12. - ESPECTRO DO CANAL 05 COM O TEMPO.

Tabela 3.5. - Notas dadas aos Comportamentos de TD .

O = ótimo
 B = bom
 R = regular
 RR = ruim
 I = inaproveitável

FIGURA 3.14. - Média dos Deslocamentos Calculados



A comparação entre as Figuras 3.5 e 3.14 nos mostra a semelhança entre os resultados teóricos e experimental obtidos para o estudo das interferências nos TD .

O gráfico da Figura 3.15, é uma cópia daquele da Figura 3.5, onde os valores foram reduzidos a 40%, exprimindo os resultados de interferência que haveria para uma variação de temperatura de 4°C , que é a variação havida no estudo experimental. Assim, podem ser melhor comparados os resultados mostrados nas Figuras 3.14 e 3.15 .

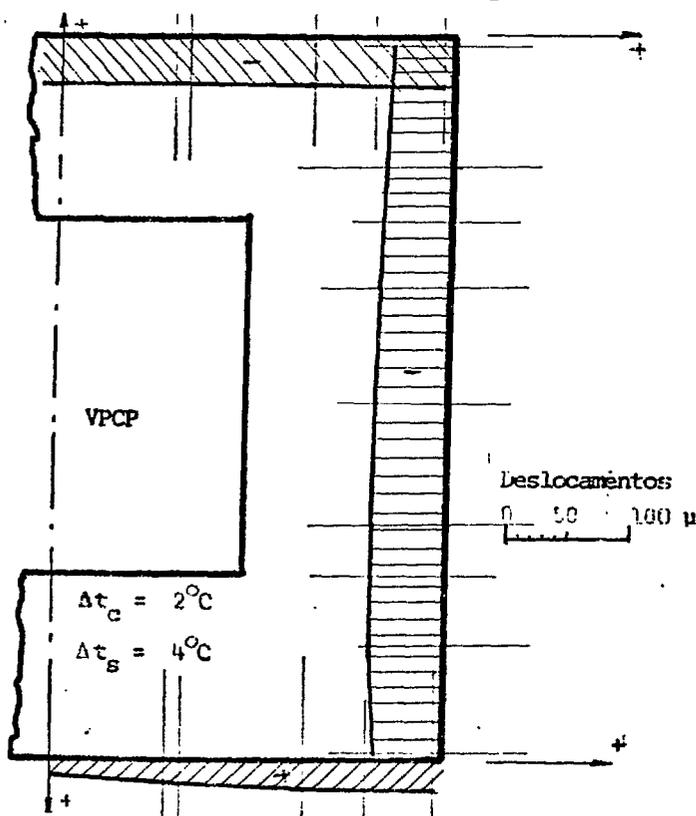


FIGURA 3.15 - Interferência teórica da variação de temperatura nos T.D .

As diferenças entre as Figuras 3.14 e 3.15 podem ser atribuídas às muitas simplificações de cálculo descritas no início do item 3.2. Contudo a semelhança das curvas é boa, principalmente porque em todas as regiões pode-se saber o sentido das interferências, uma vez que ele é o mesmo em ambos os estudos feitos .

Este estudo serve para que, olhando mais tarde os resultados dos deslocamentos frente à pressão interna, possam ser explicadas as

variações ocorridas entre o deslocamento esperado e o medido. Para os ciclos de pressurização feitos pela manhã, quando a temperatura cresce, deveremos observar discrepâncias no mesmo sentido das interferências expressas nas Figuras 3.14 ou 3.15. Para os ciclos feitos à tarde, essas discrepâncias devem ter sentido contrário devido à provável queda de temperatura. Porém, nenhuma correção poderá ser feita, pois não há informações das temperaturas durante os ensaios.

Este estudo demonstra a influência da temperatura nas medidas feitas com TD, e pode-se por isso prever que, para ensaios futuros deve-se tomar uma das duas providências adiante citadas :

1. Condicionar a temperatura do laboratório de testes, eliminando completamente suas variações e conseqüentes influências, devendo-se nesse caso, fazer novo estudo experimental, semelhante ao do item 3.3, para conferir a eficácia da medida e, ou observar interferências outras que estiveram camufladas atrás da temperatura por serem de menor grandeza.

2. Fazer novos estudos mais complexos e extensos, do tipo mostrado no item 3.3, com medição das temperaturas do concreto e do aço, além da ambiente, até que se chegue a uma correlação certa entre as temperaturas e as interferências, não só nos TD mas também nos demais sensores. Nos posteriores ensaios de pressurização dever-se-ia medir também as temperaturas ambiente, do concreto e do aço, a fim de, através da correlação encontrada, corrigir as medidas feitas.

4. COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS ESTRUTURAIS CALCULADA E MEDIDA EXPERIMENTALMENTE.

4.1. Resposta estrutural calculada

4.1.1. Introdução /32, 34/

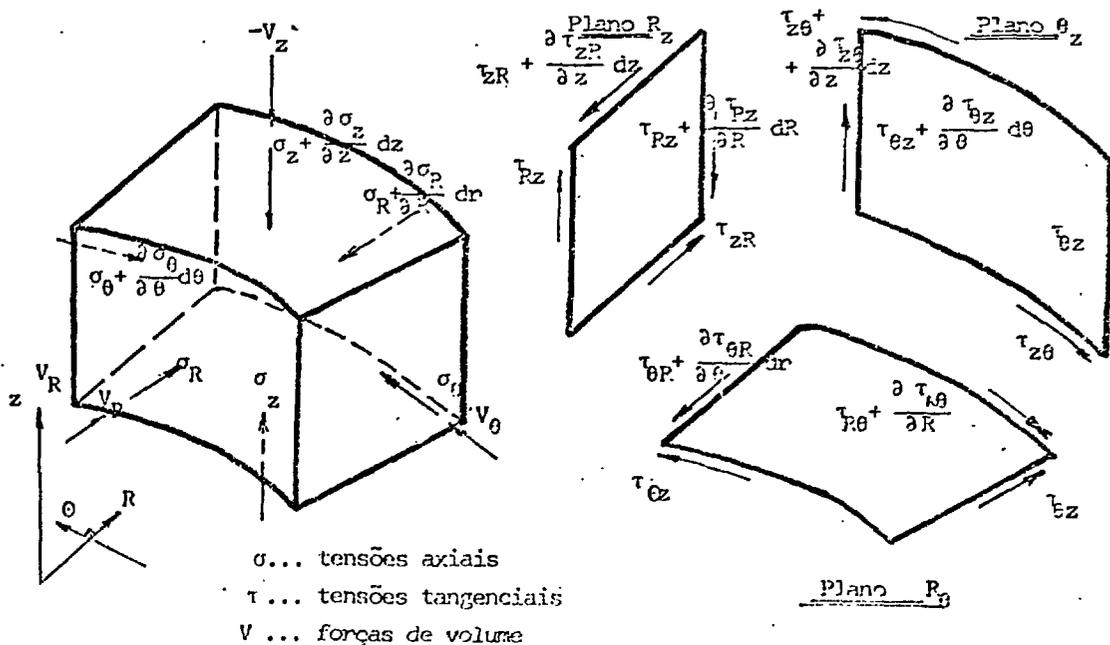
Nosso cálculo trata da avaliação das tensões, deformações e deslocamentos, resultantes da aplicação das cargas da protensão vertical e da horizontal sobre o cilindro oco de concreto, que é nosso modelo de vaso de pressão, além das cargas posteriores e várias, de pressão interna.

Como pode ser visto na Figura 2.3, o vaso de pressão é uma estrutura axissimétrica e com cargas axissimétricas, e pode ser equacionada pela Teoria da Elasticidade /34/ por dez equações que serão expostas.

Primeira condição :

Equilíbrio estático de forças em coordenadas cilíndricas) para o volume infinitesimal qualquer da Figura 4.1., do sólido em estudo :

FIG. 4.1. - Forças e Tensões em um Elemento Infinitesimal de volume num Sistema de Coordenadas Cilíndricas .



Equilíbrio de Forças Radiais

$$\frac{\partial \sigma_R}{\partial R} + \frac{\partial \tau_{zR}}{\partial z} + \frac{1}{R} \frac{\partial \tau_{\theta R}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_R - \sigma_\theta}{R} - V_R = 0 \quad (4.1)$$

Equilíbrio de forças tangenciais

$$\frac{\partial \tau_{R\theta}}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{R\theta}}{R} - V_\theta = 0 \quad (4.2)$$

Equilíbrio de Forças Verticais

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{Rz}}{R} + \frac{\partial \tau_{zR}}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} - V_z = 0 \quad (4.3)$$

Segunda condição :

Lei de Hooke, equações de tensão x deformação (ou equações constitutivas em coordenadas cilíndricas) .

$$\sigma_R = (\lambda + 2G) \epsilon_R + \lambda (\epsilon_\theta + \epsilon_z) \quad (4.4)$$

$$\sigma_\theta = (\lambda + 2G) \epsilon_\theta + \lambda (\epsilon_R + \epsilon_z) \quad (4.5)$$

$$\sigma_z = (\lambda + 2G) \epsilon_z + \lambda (\epsilon_R + \epsilon_\theta) \quad (4.6)$$

onde :

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{e} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.7)$$

e

ν = coeficiente de Poisson

E = módulo de elasticidade

ϵ = deformações

γ = distorções

$$\tau_{R\theta} = G \gamma_{R\theta} \quad (4.8)$$

$$\tau_{z\theta} = G \gamma_{z\theta} \quad (4.9)$$

$$\tau_{Rz} = G \gamma_{Rz} \quad (4.10)$$

Terceira condição :

Imposição de compatibilidade entre deformações e deslocamentos

$$\epsilon_R = \frac{\partial u}{\partial R} \quad (4.11)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} \quad (4.12)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4.13)$$

$$\gamma_{Rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial R} \quad (4.14)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \theta} \quad (4.15)$$

$$\gamma_{\theta R} = \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial R} - \frac{v}{R} \quad (4.16)$$

onde :

u, v e w são deslocamentos nas direções R, θ e z respectivamente .

Pela condição de axissimetria da estrutura e do carregamento, sabemos que :

$$v = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0$$

$$\text{e } \therefore \gamma_{\theta z} = \gamma_{\theta R} = 0 \quad + \quad \tau_{z\theta} = \tau_{R\theta} = 0$$

$$\text{e finalmente, } \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0 \quad (4.17)$$

Assim, as equações da Teoria da Elasticidade ficam reduzidas a 10. São elas :

$$\frac{\partial \sigma_R}{\partial R} + \frac{\partial \tau_{zR}}{\partial z} + \frac{\sigma_R - \sigma_{\theta}}{R} - V_R = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{Rz}}{R} + \frac{\partial \tau_{Rz}}{\partial R} - V_z = 0 \quad (4.19)$$

As equações (4.4), (4.5), (4.6), (4.10), (4.11), (4.13) e (4.14) permanecem, e a equação (4.12) fica reduzida a :

$$\epsilon_{\theta} = \frac{u}{R} \quad (4.20)$$

Qualquer estrutura pode ser encarada como um conjunto de elementos infinitesimais idênticos ao descrito na Figura (4.1), onde cada elemento tem tensões, deformações e deslocamentos numa de suas faces idênticos àquelas da face correspondente do elemento vizinho. Assim se cria um modelo de cálculo para tais estruturas. Com exceção de alguns poucos casos particulares, esses modelos resultam complexos de forma tal, que somente podem ser resolvidos por processos numéricos iterativos. O método mais usado e difundido em todo o mundo para cálculo de estruturas, é o Método dos Elementos Finitos /38/ que é usado, também, para os casos de não linearidade física (alteração da segunda condição), estruturas e carregamentos dinâmicos (alteração da primeira condição) e casos de não linearidade geométrica (alteração da terceira condição). Há também o Método da Relaxação

Dinâmica /10/, mais usado pelos ingleses, sobre o qual foi desenvolvido pelo IPEN um programa para computador, que foi mencionado no item 1.6 .

Existem muitos programas para cálculos de estruturas através do Método dos Elementos Finitos, desenvolvidos por várias equipes de instituições de pesquisa e universidades. Cada programa, com suas variações, se adapta melhor aos problemas específicos das equipes que os desenvolveram. Como foi citado no item 1.6, quatro desses programas estão à disposição de usuários do computador do IPEN .

Este trabalho analisa o modelo de VPCP, sob carregamento estático e axissimétrico, dentro do regime linear elástico de tensões e deformações, que é um caso muito primário dentre todos os que os programas de computador abrangem.

Considerando que o nosso objetivo principal é a análise de Resultados Experimentais, os cálculos teóricos, obtidos com os programas de computador, serão apresentados de maneira resumida .

Foram estudados os deslocamentos e tensões do vaso de pressão, utilizando três programas diferentes, dois dos quais usam o Método dos Elementos Finitos e o outro usa Relaxação Dinâmica, para constatar a ordem de grandeza das diferenças de cálculo por um e outro programa. Depois, para efeito de comparação das respostas calculadas com as respostas experimentais, foi utilizado somente um dos programas .

4.1.2. Cálculo com o FEAST /35/

4.1.2.1. A Geometria da Estrutura

Duas malhas de nós e elementos foram usadas para os cálculos. A primeira, tomando uma seção real do modelo de VP que será tratada como malha completa e a segunda representa somente metade da primeira, simplificação que pode ser feita se admitirmos que o canal da entrada do "liner", não tem importância estrutural. A segunda malha, será tratada como malha simplificada.

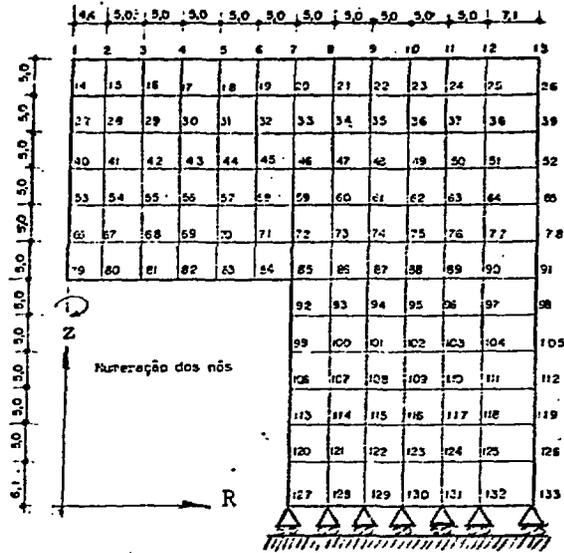


Diagram showing the element numbering (1 to 108) for the mesh. The elements are arranged in a grid pattern, with the last part of the grid being L-shaped.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
						73	74	75	76	77	78
						79	80	81	82	83	84
						85	86	87	88	89	90
						91	92	93	94	95	96
						97	98	99	100	101	102
						103	104	105	106	107	108

a. Malha Simplificada

FIG. 4.2. Malhas de Nós e Elementos Usados no Cálculo com o FEAST e NONSAP .

Na Figura 4.2 apresentamos um esquema das malhas .

No caso do cálculo com a malha completa foi usada uma coluna de elementos de aço (elementos 1, 13, 25, 37, 49 e 61) tentando reproduzir melhor a realidade do modelo. Um único vínculo restringindo os movimentos' verticais do nó 259 foi colocado, representando a restrição de deslocamento desempenhada pelo anel de apoio do modelo .

Para a malha simplificada, foram impostos deslocamentos nulos nos nós 127 a 133 (na direção vertical somente), impondo assim, a condição de simetria, que substitui a metade inferior abandonada .

No cálculo da resposta estrutural do modelo, frente somente' às cargas de protensão, e depois, para uma pressão interna de 100 kgf/cm^2 além da protensão, observou-se que usando a malha completa, obtém-se resultados muito semelhantes aqueles conseguidos com a malha simplificada. As diferenças encontradas, concentram-se na região da entrada do "liner". Para tensões nos elementos, as diferenças foram sempre menores que 5% da tensão de ruptura do concreto. Para se poder comparar os deslocamentos verticais, entre as respostas para duas malhas, devemos considerar o movimento de corpo rígido vertical que o modelo sofre devido à restrição de deslocamento causada pelo anel inferior de apoio do modelo, que não é levado em conta do cálculo pela malha simplificada. Assim, tomando-se os deslocamentos verticais, calculados com a malha simplificada, e somando a eles o deslocamento vertical do nó da extremidade (nó 13), obtemos os deslocamentos verticais superiores . Subtraindo-se o mesmo valor dos deslocamentos originais obtemos os deslocamentos verticais inferiores. Na comparação dos valores de deslocamento calculados com as duas malhas foram observadas diferenças sempre inferiores a 5% e mesmo assim, só houve diferenças localizadas na região da entrada do "liner" .

Considerando que as diferenças de resposta dos cálculos usando uma e outra malha, são muito pequenas, foi decidido prosseguir usando somente a resposta da malha simplificada .

4.1.2.2. Características físicas do concreto

~~Como pode ser observado nas equações de equilíbrio (4.1)~~

(4.2) e (4.3), qualquer variação do módulo de elasticidade (E) ~~ou do coeficiente de Poisson (ν)~~ não deve alterar as tensões, que são função ~~única~~ ~~única~~ do carregamento e da geometria da estrutura .

Observando agora as equações constitutivas (4.4) a (4.7) e imaginando uma variação apenas do módulo de elasticidade, lembrando que as tensões não variam, concluímos que as deformações variam na proporção inversa do módulo de elasticidade .

Já uma variação do coeficiente de Poisson (ν) interfere nas deformações mas a correlação não pode ser tão facilmente resumida, e das equações 4.4 a 4.7 pode-se ver essa correlação .

Se forem agora analisadas as equações de compatibilidade , poderá ser concluído que os deslocamentos também variam proporcionalmente com o inverso de E e que também sofrem influência de ν .

Foram feitos cálculos através do FEAST para os valores $E = 350\ 000\ \text{kgf/cm}^2$ e $\nu = 0,15$, com variações de carregamento, simulando as protensões e pressões internas. O valor $E = 350\ 000\ \text{kgf/cm}^2$ para Módulo de Elasticidade, equivale à média dos valores obtidos pelo Laboratório A. Falcão Bauer no ensaio de três corpos de prova com 59 dias de idade , e foi o único ensaio de elasticidade feito. Para coeficiente de Poisson na falta de um resultado experimental, foi adotado $\mu = 0,15$ que é um valor usual para o concreto. Em concretos normais esse valor não varia muito, dificilmente alcançando valores acima de 0,30 .

Calculou-se ainda, para os mesmos carregamentos do parágrafo anterior, a resposta estrutural para um modelo com concreto cujo E fosse 450 mil kgf/cm^2 . A resposta, como era de se esperar, variou na proporção inversa dos módulos de elasticidade, para deformações e deslocamentos, com perfeita exatidão e as tensões permaneceram inalteradas, confirmando o bom funcionamento do programa de cálculo .

Foram calculadas as respostas para o modelo sujeito às mesmas duas condições de carregamento anteriores, protensão + 5 atm e protensão + 100 atm, somente alterando-se o valor do coeficiente de Poisson de $\nu = 0,15$ para $\nu = 0,30$. As Figuras 4.3, 4.4 mostram os deslocamentos superficiais calculados para os quatro casos atrás . As Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram as respostas de tensões, para os elementos

FIGURA 4.3. - Deslocamentos Absolutos Radiais Calculados - Superfície Lateral

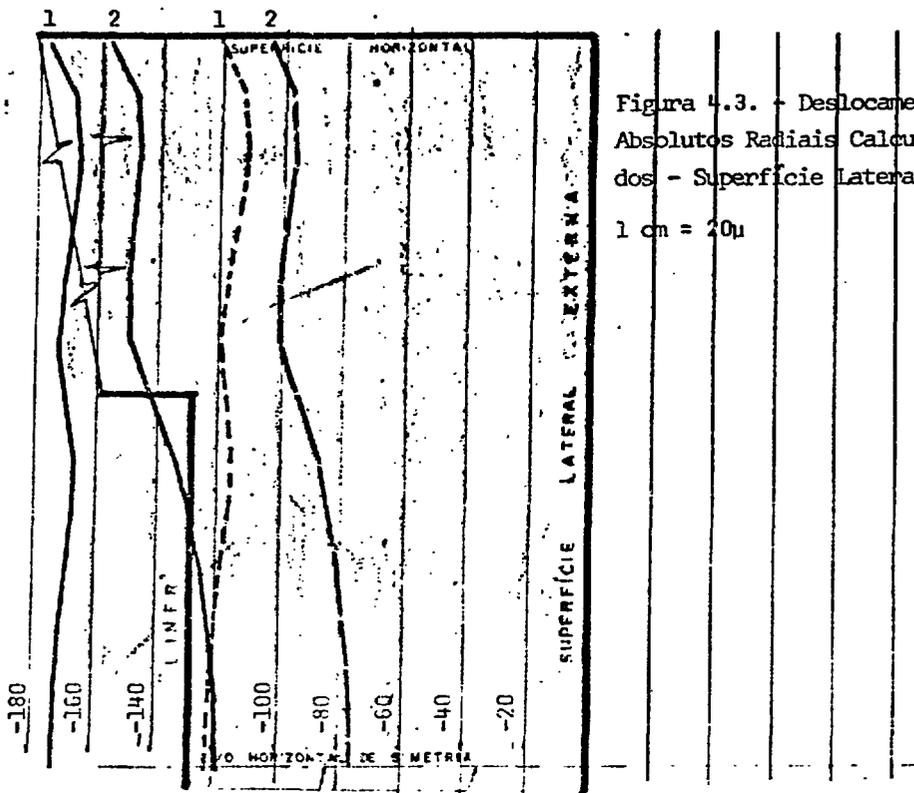


Figura 4.3. - Deslocamentos Absolutos Radiais Calculados - Superfície Lateral

1 cm = 20μ

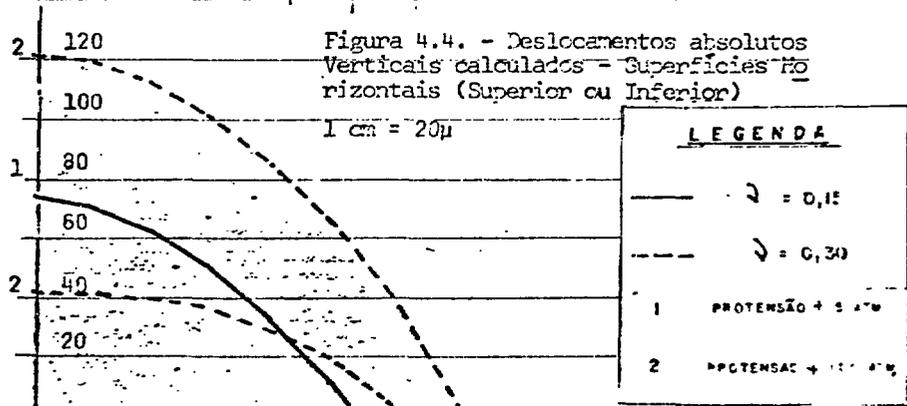


Figura 4.4. - Deslocamentos absolutos Verticais calculados - Superfícies Horizontais (Superior ou Inferior)

1 cm = 20μ

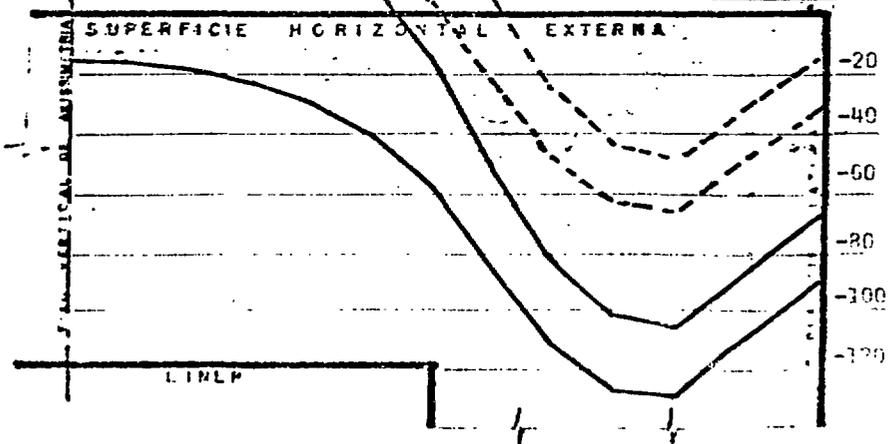


FIGURA 4.5. - Tensões Radiais em Elementos Laterais (σ_r), 1 cm = 20 kgf/cm²

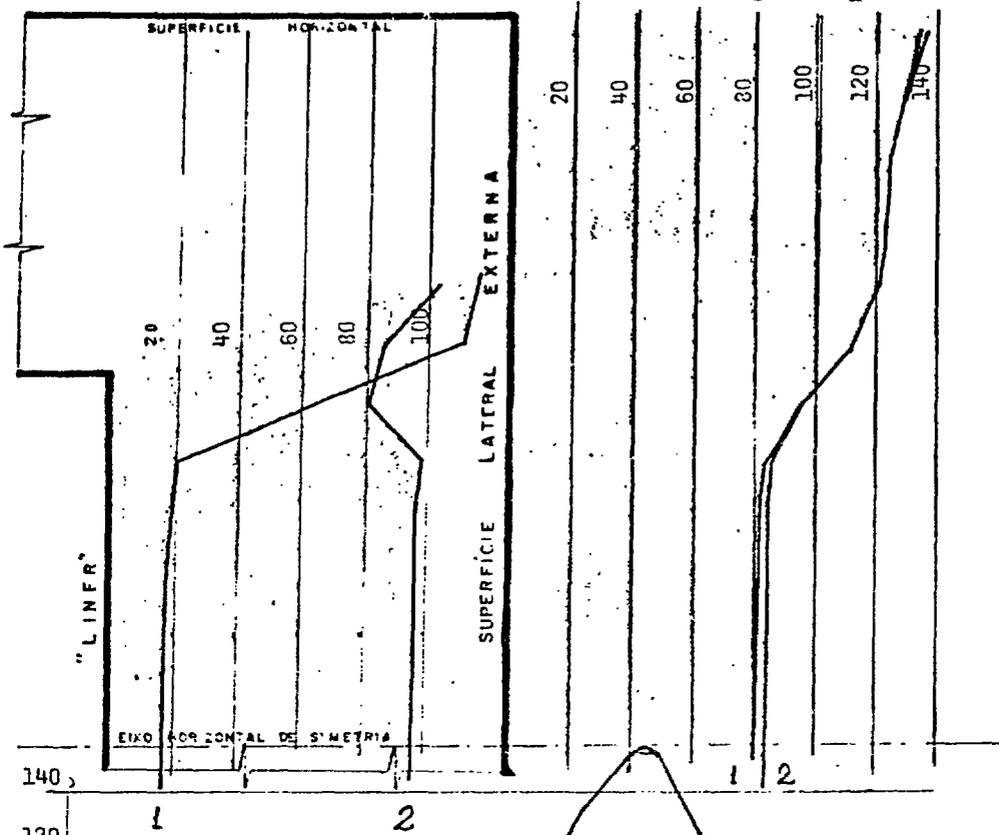
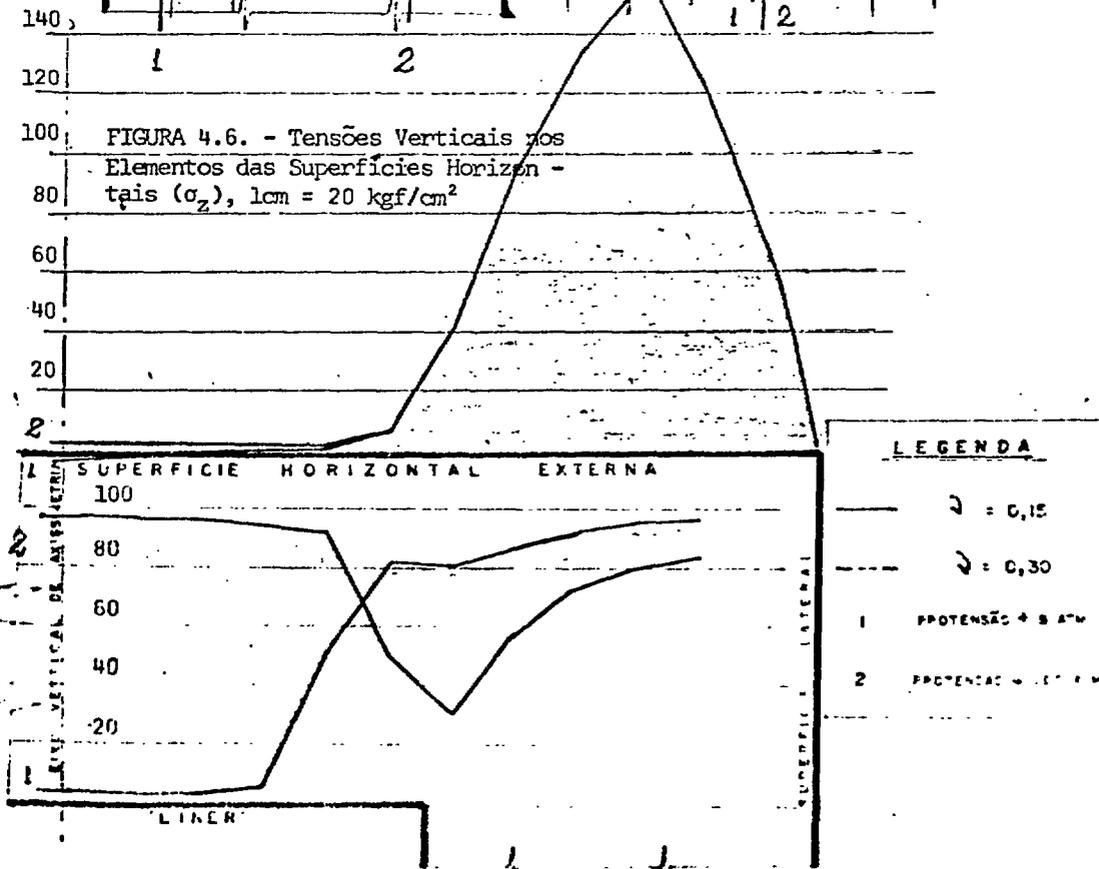


FIGURA 4.6. - Tensões Verticais nos Elementos das Superfícies Horizontais (σ_z), 1cm = 20 kgf/cm²



LEGENDA

- $\nu = 0,15$
- - - $\nu = 0,30$
- 1 PROTENSÃO + 8 ATM
- 2 PROTENSÃO + 12 ATM

FIGURA 4.7. - Tensões Verticais em Elementos Laterais (σ_z) 1 cm = 20 kgf/cm²

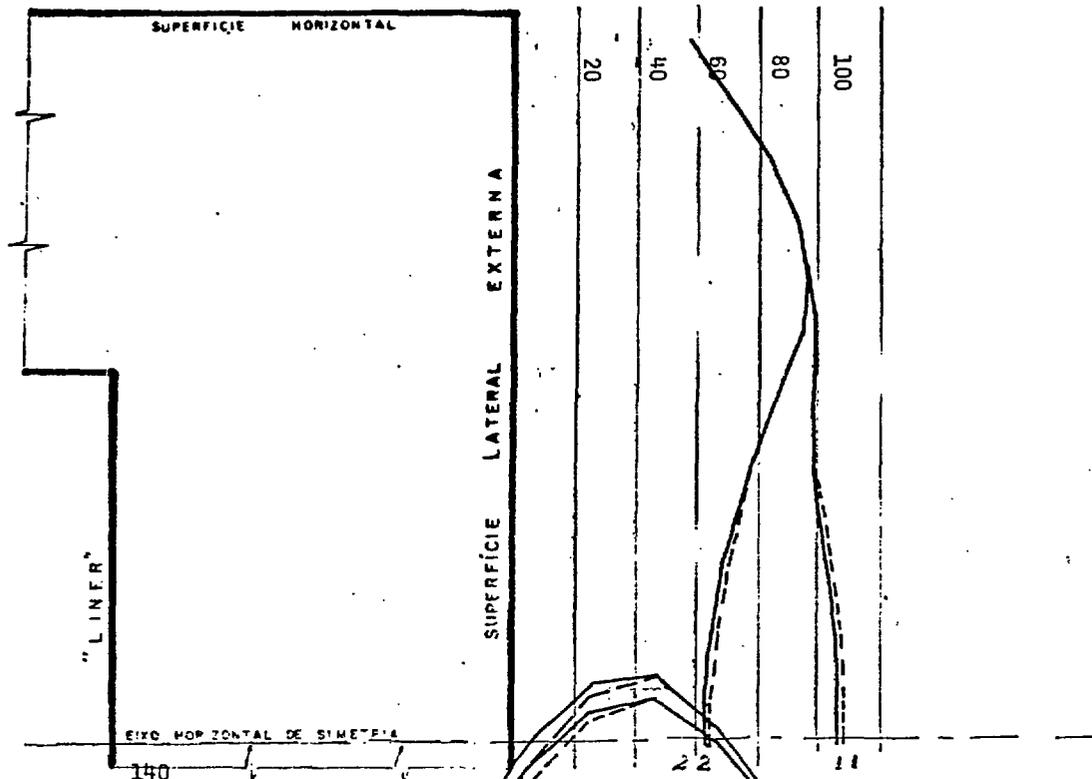
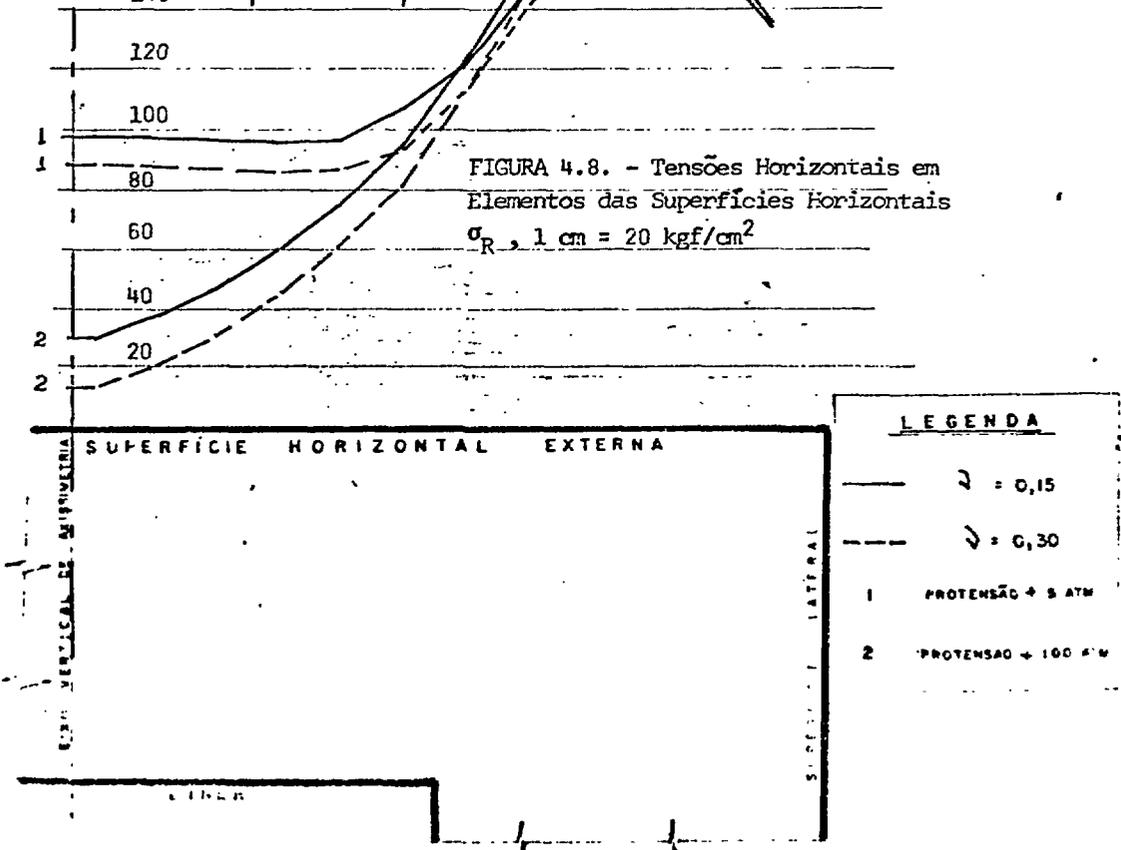


FIGURA 4.8. - Tensões Horizontais em Elementos das Superfícies Horizontais σ_R , 1 cm = 20 kgf/cm²



LEGENDA

- $\lambda = 0,15$
- - - $\lambda = 0,30$
- 1 PROTENSÃO + 5 ATM
- 2 PROTENSÃO + 100 ATM

FIGURA 4.9. - Tensões Tangenciais nos Elementos Laterais (σ_{θ}), 1 cm = 20 kgf/cm² 72

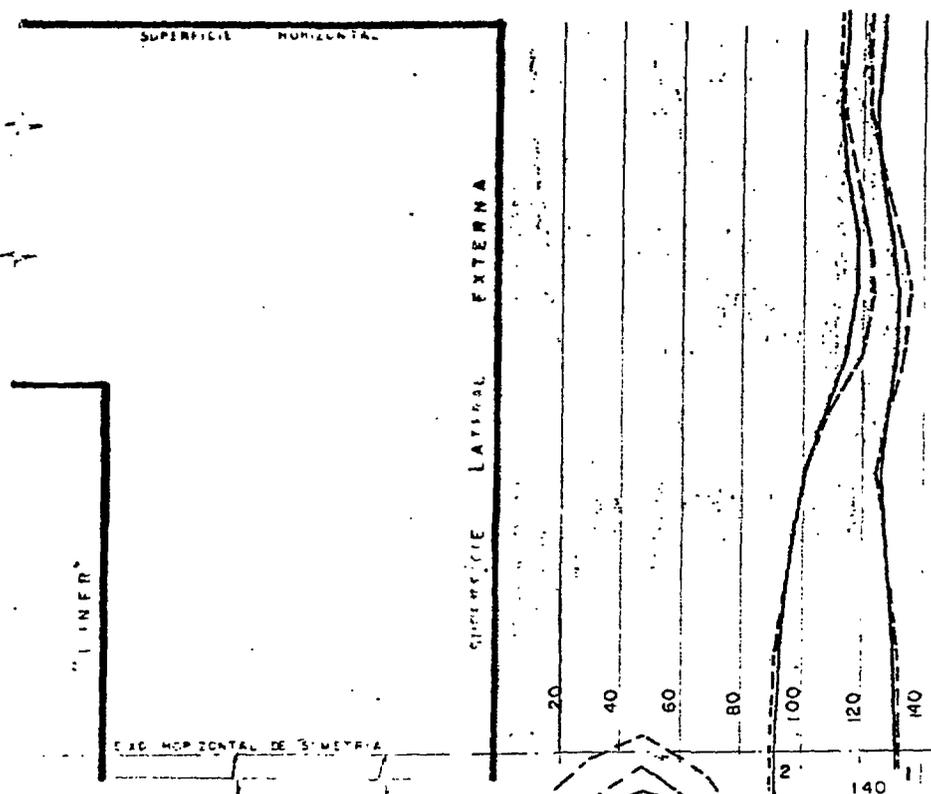
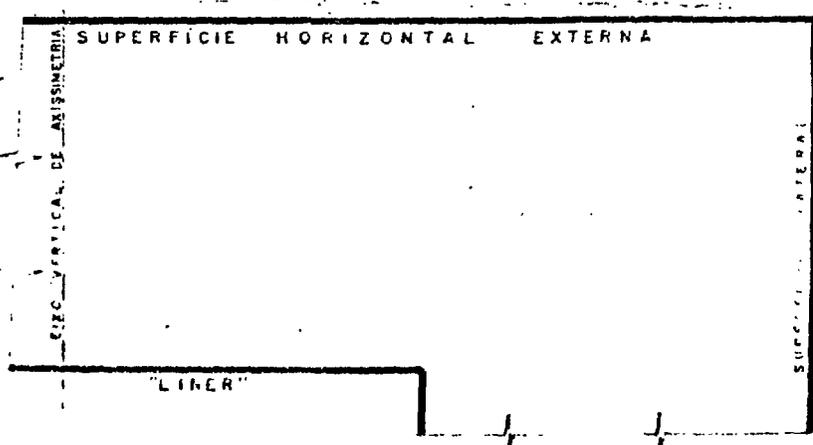
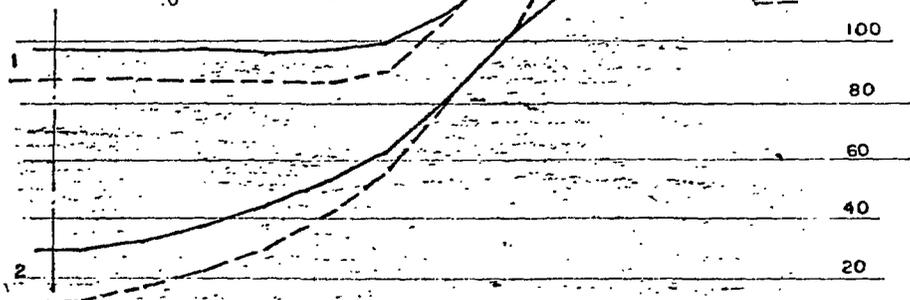


FIGURA 4.10. - Tensões Tangenciais nos Elementos das Superfícies Horizontais - (σ_{θ}), 1 cm = kgf/cm²



LEGENDA

- 2 = 0,15
- - - 2 = 0,30
- 1 PROTEÇÃO + 5 ATM
- 2 PROTEÇÃO + 100 ATM

das faces externas e internas do modelo, também para os quatro casos calculados. ~~As tensões encontradas para os mesmos carregamentos, com coeficientes de Poisson diferentes, não deveriam variar, conforme foi mostrado antes e onde há diferenças, são devidas a falhas do processo numérico de cálculo.~~

Pelas Figuras 4.5 a 4.10, pode-se ver bem o princípio da protensão de estruturas. O concreto é um material que praticamente não resiste a esforços de tração, enquanto que suporta grandes esforços de compressão. Com a protensão, o concreto fica previamente comprimido nas regiões onde o carregamento futuro causaria trações e quando o carregamento é aplicado ele alivia as tensões de compressão ao invés de criar tensões de tração .

4.1.2.3. Diferença de Deslocamentos

Nos ensaios com o modelo, foram medidos deslocamentos e deformações, somente. Os medidores foram instalados somente após terminadas as protensões e portanto suas medições, retratam as variações de deslocamentos e deformações, após a protensão, devidas, unicamente, à pressão interna .

Como as deformações são bem correlacionadas geometricamente com os deslocamentos e, sabendo que a maioria dos sensores usados nos ensaios do modelo, mediram deslocamentos, daqui por diante, será analisada e comparada, somente a resposta de deslocamento, para cada caso. As figuras 4.11 e 4.12 mostram a diferença entre os deslocamentos calculados para o carregamento composto pelas forças de protensão com mais 5 kgf/cm² de pressão interna e os deslocamentos mediante as forças de protensão com mais 100 kgf/cm² de pressão, ambos calculados para $\nu = 0,15$ e $\nu = 0,30$ nas superfícies lateral e horizontais .

4.1.2.4. Princípio da Superposição de Efeitos

Para os casos de carregamento com protensão e 5 kgf/cm² e

FIGURA 4.11. - Deslocamentos radiais Calculados, em Relação ao Carregamento de Protensão + Pressão Interna de 5 kgf/cm² - Superfície Lateral 1 cm = 10μ

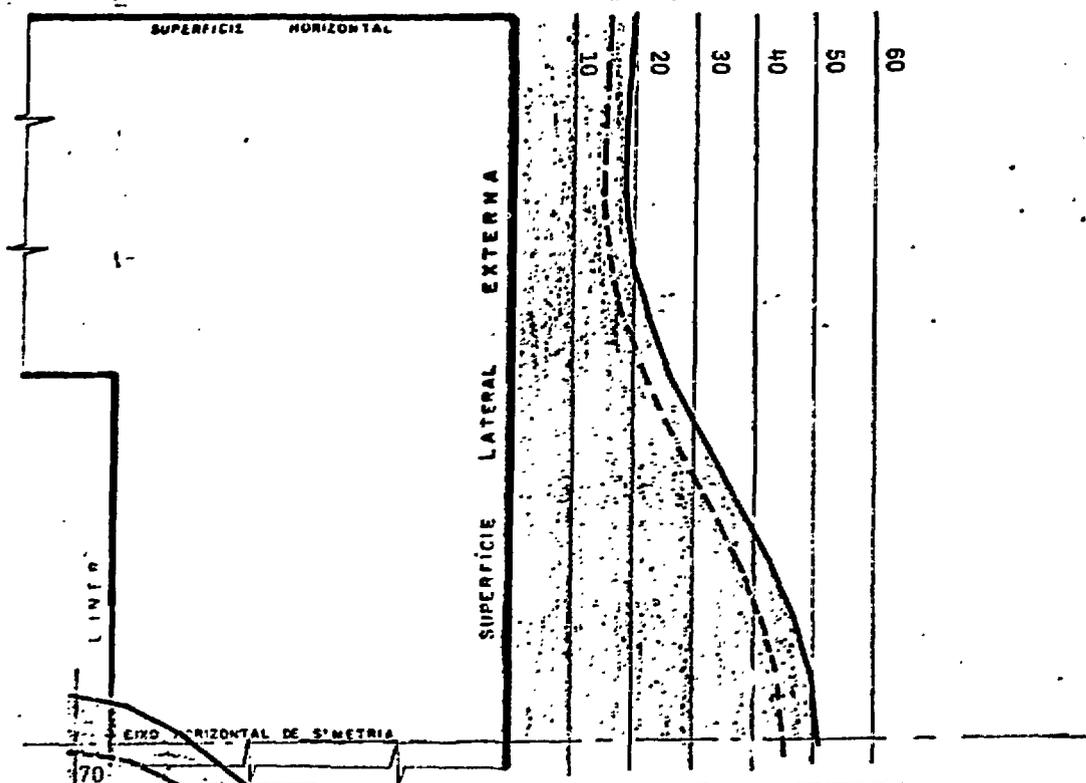
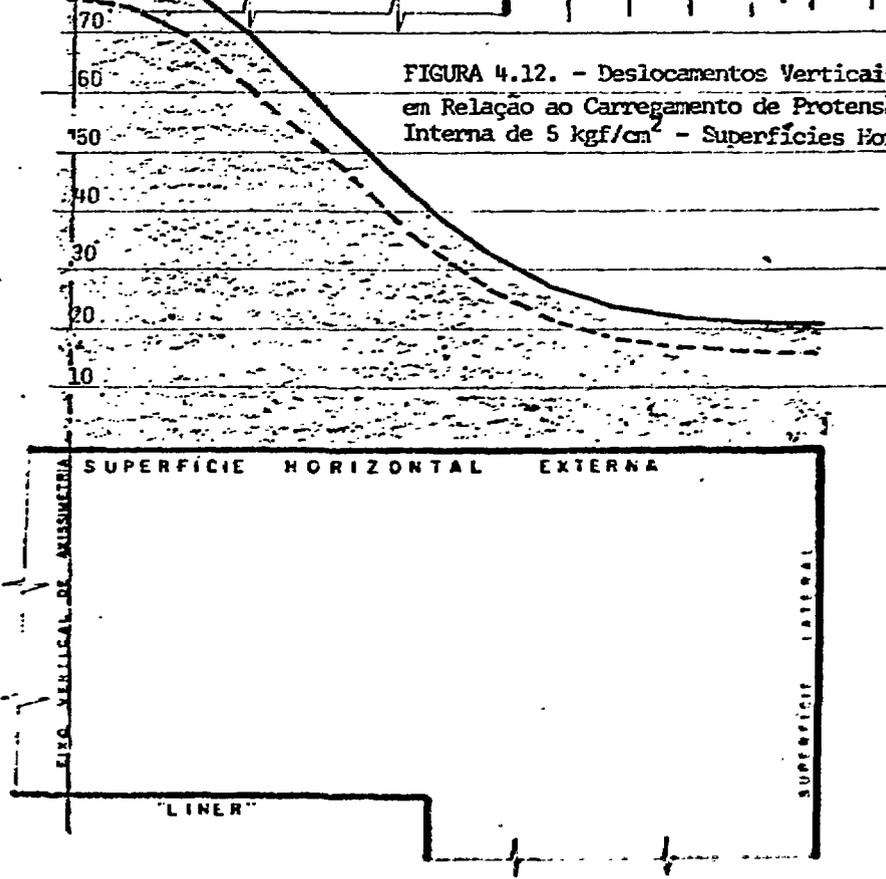


FIGURA 4.12. - Deslocamentos Verticais Calculados, em Relação ao Carregamento de Protensão + Pressão Interna de 5 kgf/cm² - Superfícies Horizontais



com 100 kgf/cm^2 as tensões principais máxima e mínima foram verificadas em todos os elementos da estrutura, não se verificando nenhum valor acima dos limites de elasticidade. Os máximos valores de compressão e de tração observados em cada caso são mostrados na Tabela 4.1 .

Tabela 4.1. Máximas Tensões Principais encontradas para carregamento com posto por Forças de Protensão e Pressão Interna .

Pressão Interna (kgf/cm^2)	Compressão (-)	Elemento		
			Tração (+)	
5	-170,15	66	+2,84	25
100	-180,10	61	-0,27	5

Pelo princípio da superposição de efeitos, válido dentro do campo linear e elástico de tensões, pode-se garantir que a resposta para qualquer pressão interna até pelo menos 100 kgf/cm^2 é o valor interpolado entre as respostas calculadas para 5 kgf/cm^2 e 100 kgf/cm^2 de pressão. Pode-se evidentemente extrapolar esses dois valores para casos de pressão interna inferior a 5 kgf/cm^2 ou superior a 100 kgf/cm^2 desde que se tenha o cuidado de verificar que, em nenhum ponto da estrutura, as tensões principais atinjam valores fora do campo linear elástico .

Dentro do campo linear elástico portanto, um gráfico de pressão interna contra deslocamentos ou de pressão interna contra tensões será linear. Isso pode ser explicado melhor, supondo-se que, a partir de uma pressão interna $p = 5 \text{ kgf/cm}^2$, seja aumentada a pressão de um Δp , o que causará uma variação Δd nos deslocamentos e $\Delta \sigma$ nas tensões. Se a partir dessa nova pressão alcançada, for dado um novo incremento de pressão, também Δp dentro do campo linear e elástico de tensões, a variação de deslocamento será novamente Δd e $\Delta \sigma$ nas tensões. Assim, para um ponto genérico da estrutura pode ser feito o gráfico de deslocamento x pressão, conforme o gráfico da Figura 4.13 .

A Figura 4.14 mostra um gráfico geral de deformação x pressão interna, assinalando as fases de comportamento elástico, ao lado dos níveis de pressões usadas no projeto do WPCP de Fort St Vrain (USA) e imposto pelas normas ASME (USA) e BS (Inglaterra) .

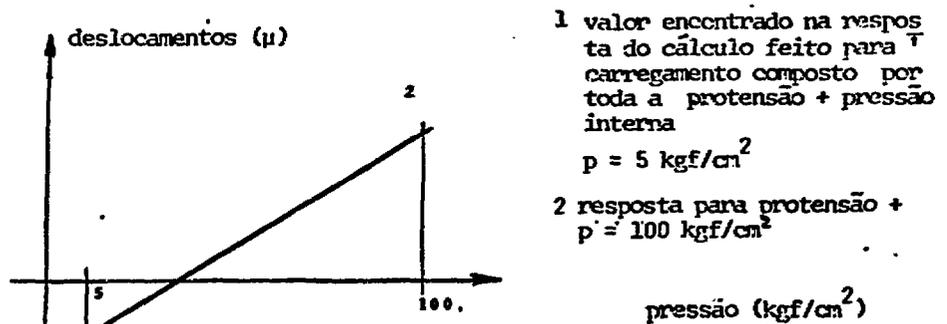
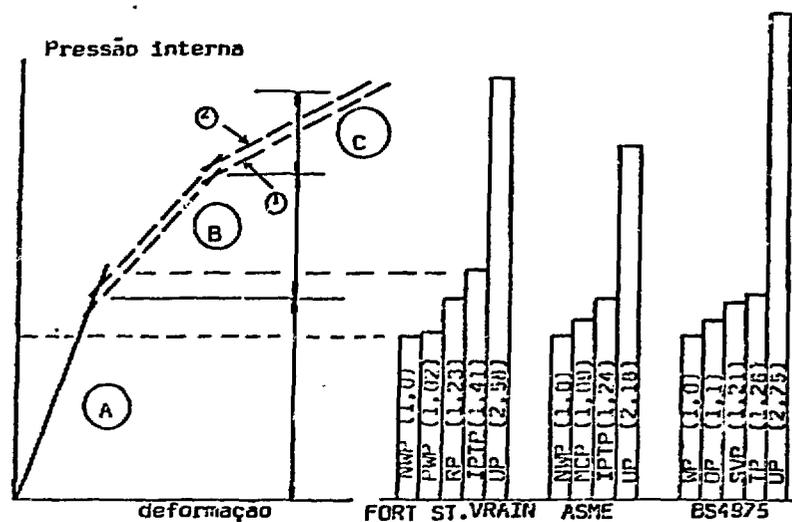


FIGURA 4.14. - Comparação de Níveis de Pressão para VPCPs .



- ① Fim da vida útil de projeto após todas as perdas de protensão (30 anos)
- ② Resposta após aquecimento inicial do concreto e perdas de protensão a 2 anos
- (A) 1º Regime - Comportamento elástico linear
- (B) 2º Regime - Comportamento não-linear
- (C) 3º Regime - Ruína estrutural

- NWP - Pressão de trabalho normal ("Normal Working Pressure")
- PWP - Pressão de pico normal ("Peak Working Pressure")
- RP - Pressão de referência ("Reference Pressure")
- IPIP - Pressão de teste inicial ("Initial Proof Test Pressure")
- UP - Pressão de ruína ("Ultimate Pressure")
- MCP - Pressão de cavidade máxima ("Maximum Cavity Pressure")
- WP - Pressão de trabalho ("Working Pressure")
- DP - Pressão de projeto ("Design Pressure")
- SVP - Pressão da válvula de segurança ("Safety Valve Pressure")
- TP - Pressão de Teste ("Test Pressure")

4.1.3. Cálculo com o NONSAP /05/

Foi calculada a resposta estrutural do modelo de VPCP pelo programa NONSAP para efeito de comparação. Foi usada uma malha de nós e elementos idêntica aquela usada para o cálculo com o FEAST, mostrada na figura 4.2.a (malha simplificada) .

Dois carregamentos diferentes foram propostos : o primeiro composto pelas forças de protensão e mais 5 kgf/cm^2 de pressão interna e o segundo composto da mesma maneira com pressão interna de 95 kgf/cm^2 .

Foram usadas as opções para axissimetria, análise estática e linearidade física .

As condições geométricas de contorno são as mesmas descritas no item 4.1.2.1.

O material foi considerado isotrópico com módulo de elasticidade $E = 350\,000 \text{ kgf/cm}^2$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,15$.

Os gráficos da Figura 4.15, mostram os deslocamentos encontrados para os nós das superfícies horizontal e lateral .

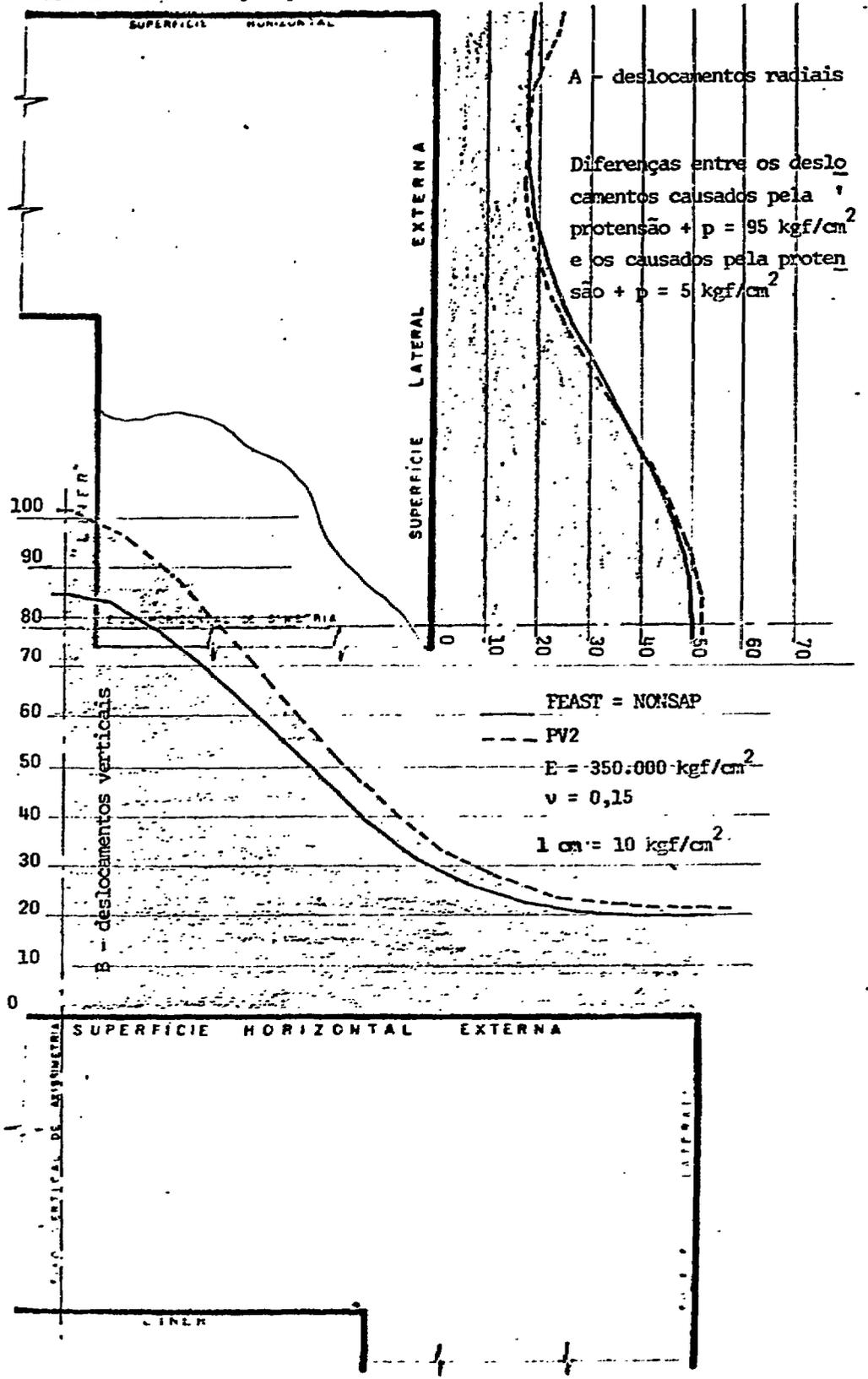
4.1.4. Cálculo pelo PV2 . /22/

Foi feito o cálculo da mesma estrutura pelo PV2, que é um programa desenvolvido no IPEN, que se baseia no Método da Relaxação Dinâmica. Foram usados 144 blocos imaginários, numa geometria muito semelhante à da malha simplificada da Figura 4.2.a .

Foram usadas as mesmas condições de carregamento e as mesmas constantes físicas do material, assim como as condições geométricas de contorno.

Na Figura 4.15 são comparadas as variações de deslocamentos sentidas pelo modelo, calculadas pelos três diferentes processos descritos

FIGURA 4.15. - Comparação de deslocamentos calculados pelo PV2, FEAST E NONSAP



até aqui, procurando-se manter tanto quanto possível as mesmas condições de cálculo .

Como pode ser observado da Figura 4.15, não há diferenças perceptíveis entre os resultados obtidos pelo FEAST e pelo NONSAP . Para os deslocamentos laterais, o PV2 se aproxima bem dos outros dois mas para os verticais, os resultados do PV2 são sensivelmente maiores .

Daqui por diante, serão usados somente os resultados obtidos com o FEAST, pela sua facilidade de utilização .

4.2. Resultados Experimentais /26, 27, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 24/

4.2.1. Análise e Refinamento Preliminares

4.2.1.1. Definições

No total 141 medidores foram usados durante os ensaios do SCM4.2, como foi mostrado no item 2.3.1. .

Foram feitas 48 medidas, com cada aparelho, uma para cada parada de pressão, conforme pode ser visto na Figura 1.12 que esquematiza os ciclos de pressurização .

Assim, foram obtidas 6768 informações que serão agora selecionadas, corrigidas, desprezadas quando necessário e correlacionadas, na tentativa de descrever o comportamento estrutural do modelo .

Todos estes dados, obtidos um a um, foram agrupados a cada parada de pressão, por ordem de canal, pelo Sistema de Aquisição de Dados que os imprimiu em linhas, onde constavam horário, o canal e a leitura feita pelo aparelho. Para se organizar e classificar os dados, assim como fazer gráficos ou correções, as informações foram codificadas em cartões de computador e usou-se o "Statistical Analysis System" /4/ para analisar os resultados. Para isso, foi preciso identificar bem, cada informação. As

variáveis usadas para identificar as informações, são descritas adiante :

A variável CANAL, refere-se justamente, ao correspondente canal do SAD, pelo qual a leitura teve acesso. Foram usados os canais de 0 a 140 .

A variável LEITURA, é justamente a leitura absoluta, feita pelo sensor .

Ainda foram associados a cada informação, as seguintes variáveis : ORDEM, CICLO, PRESSÃO E SENTIDO. A cada Orden, corresponde um único patamar de parada de pressão, no gráfico da Figura 1.12. O Ciclo (1 a 6) se refere ao ciclo de pressurização que compreende um aumento da pressão até um valor máximo e a subsequente despressurização com suas paradas para leituras. A variável Pressão é a pressão interna imposta pela bomba ao modelo, medida em atmosferas (atm). Por fim, o Sentido : I se refere a ida, lembrando que a pressão está aumentando e V (volta) indica que a pressão vem diminuindo .

Paralelamente, foi dada entrada, no computador, dos dados referentes às Tabelas de Calibração (diferença de potencial vs deslocamento) de cada Transdutor de Deslocamento (TD). À Tabela de Calibração de cada TD foi associado o número do canal usado pelo aparelho calibrado.

O conjunto todo de dados, foi reorganizado (sorteado) por ordem de Canal , e para os canais onde havia TD, pode-se, misturando as Tabelas de Calibrações com as Leituras por Canal, corrigir as leituras para cada TD .

A cada Canal associou-se, posteriormente, a variável Aparelho. Para Canal = 0, Aparelho = TP (transdutor de pressão); para Canal = 1 até Canal = 101, Aparelho = TD ; para Canal = 102 até Canal = 110, Aparelho = LC (célula de carga) e para Canal = 101 até Canal = 140, Aparelho = SG ("strain gage") .

Aos TD foram ainda associadas as variáveis POSICÃO e LOCALIZ (localização). As leituras foram feitas em dois planos e pela axissimetria da estrutura e pela simetria vertical, as leituras feitas em cada 1/4 de plano e seu simétrico foi assumido um valor de localiz .

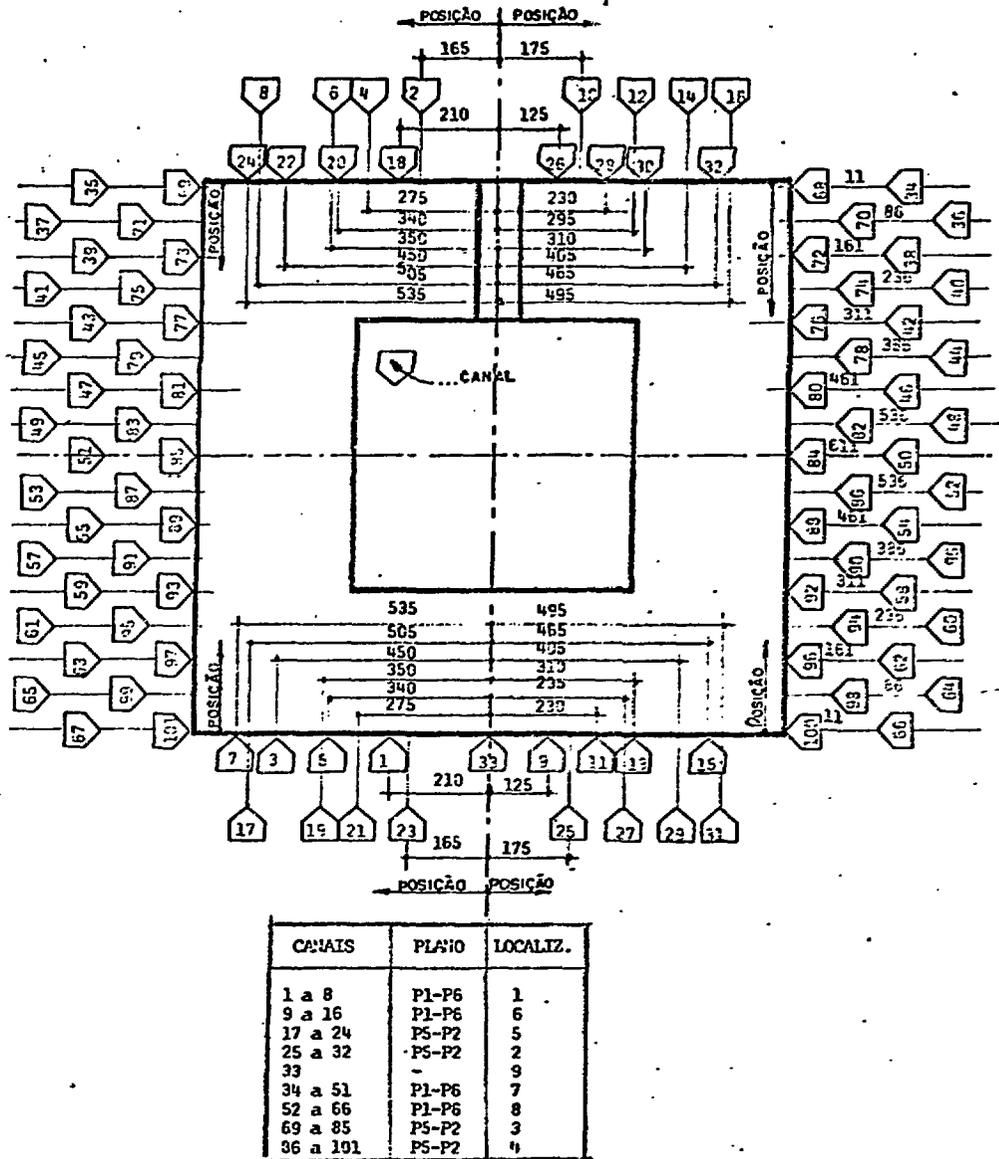


FIGURA 4.16. - Posições e Localizações dos TD, conforme o Canal (Veja também Figura 2.6)

Dentro de cada localização, a distância da face superior do modelo ao aparelho, é a variável Posição, para os aparelhos e canais da lateral. Para os canais e aparelhos que estiveram medindo nas superfícies horizontais a Posição é a distância do aparelho até o eixo vertical central de axissimetria. Pela Figura 4.16, sabe-se qual a posição e localização de cada canal de TD .

4.2.1.2. Valor Corrigido

Nenhum dos sensores usados fez leituras absolutas. Em todos eles, a medida correspondente a uma determinada ordem pode ser obtida pela subtração da leitura feita naquela ORDEM menos a leitura que o sensor acusava no início dos testes. Assim se diz que as leituras foram zeradas, quando se subtrai de cada uma delas o correspondente valor lido no início dos testes .

As leituras corrigidas dos TD, foram multiplicadas por -1000 e zeradas, resultado que recebeu o nome de VCORRIG (valor corrigido). Assim, os VCORRIG para TD são os deslocamentos medidos em μ (micron = 10^{-6} metro), e tem valores positivos para expansões do modelo .

Para os demais tipos de sensores (aparelhos) foi assumido que os VCORRIG, são as leituras zeradas e multiplicadas por 1000, simplesmente para que esses valores sejam absolutos e tenham uma ordem de grandeza mais fácil de se trabalhar .

4.2.1.3. Correções entre ciclos

Foram feitos gráficos de VCORRIG versus Pressão, para cada medidor.

Foi notado com muita frequência, comportamentos semelhantes ao do gráfico da Figura 4.17, referente aos TD dos canais 78 e 79. Os pontos marcados pelos números 1, 2 ou 3 ou pelas letras A, B ou C se apresentaram muito próximos de uma reta; eles se referem aos ciclos de pressurização 1, 2 ou 3, respectivamente .

Os três ciclos foram feitos no primeiro dia de ensaios. As letras referem-se ao canal 79 e os números ao 78 .

Em outras duas retas, aparentemente paralelas às primeiras, podem-se encaixar os pontos do ciclo 4, identificados pelo número 4 e pela letra D, conforme o canal. Esses dois conjuntos de pontos têm uma pequena curvatura visível na extremidade de maior pressão. O ciclo 4 de pressurização, foi feito numa sexta-feira, segundo dia de ensaios.

No terceiro e último dia de ensaios, uma segunda-feira, foram feitos os ciclos 5 e 6 (nºs 5 e 6 para canal 78 e letras E e F para canal 79) que não são mais lineares .

Analisando as curvas VCORRIG Vs PRESSÃO para os demais canais, observou-se uma grande semelhança com as curvas da Figura 4.17 . Verificou-se, também, que sempre há uma grande variação de VCORRIG entre a última medida feita na sexta-feira (ciclo 4) e a primeira medida feita na segunda-feira (ciclo 5) . Estas variações observadas entre o fim dos ensaios em um dia e o início no próximo dia, não podem ser atribuídas à pressão interna, pois ela foi mantida nula entre os ensaios. Poderia se supor que esse efeito fosse devido à retração do concreto do modelo, ou à deformação lenta. Entretanto, durante uma noite, ou até mesmo dois dias, os efeitos da retração ou da deformação lenta, assim como os da fluência do aço de protensão, não poderiam impor deslocamentos ou deformações significativos .

A hipótese mais viável, é a de que as variações da temperatura do meio ambiente, do concreto, do pórtico da instrumentação e mesmo dos sensores e seus circuitos auxiliares, foram responsáveis pelas interferências entre um dia e outro. (Ver Capítulo 3) .

De qualquer forma, todos os sensores deveriam marcar os mesmos valores no fim de um ensaio e no início do próximo. Assim sendo, foi feita a primeira correção em todos os conjuntos de dados, canal por canal .

Foram tomados os dados de cada Canal e calculadas as diferenças entre os VCORRIG da última Ordem do ciclo 3 (ordem 19) e da primeira Ordem do ciclo 4 (ordem 21). Essa diferença foi somada a todos

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM
 DISTRIBUICAO PUNTAIS-325 LOCALIZACAO
 PLOT OF VARIATION-PROBANDS STRAIN IN VALUE OF VAR

17000 EIGHTH MAY 27 1968 40

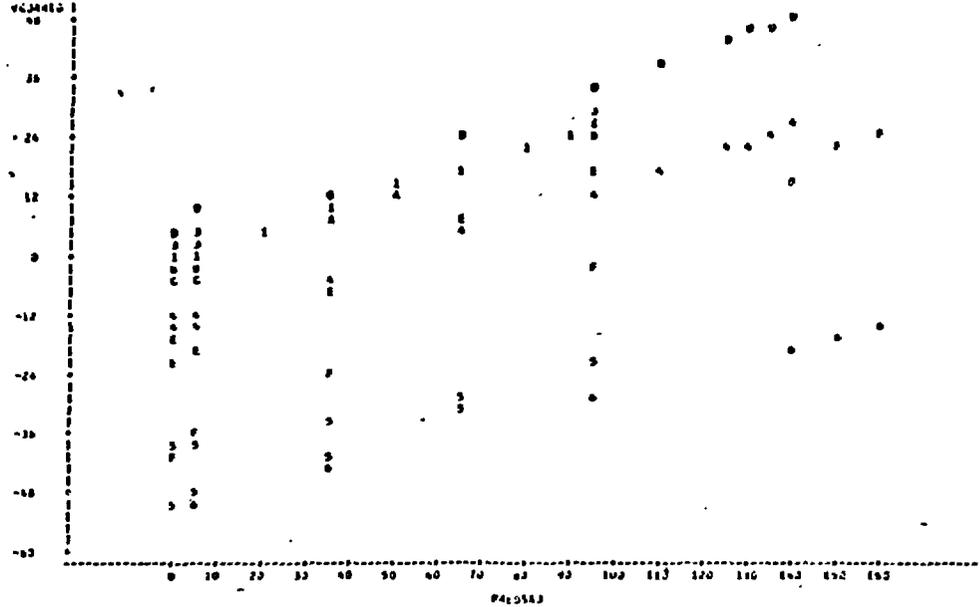


FIG. 4.17. - Distribuicao variavel pelos eixos 24 e 25 para todas as celulas.

CELULAS DE C-302 - LOAD CELL - IMPEDICAO: 218 24 NR DIA - ESPECI M 20 FODRIG. (19678).
 CASH-170

PLOT OF VARIATION-PROBANDS STRAIN IN VALUE OF CASH

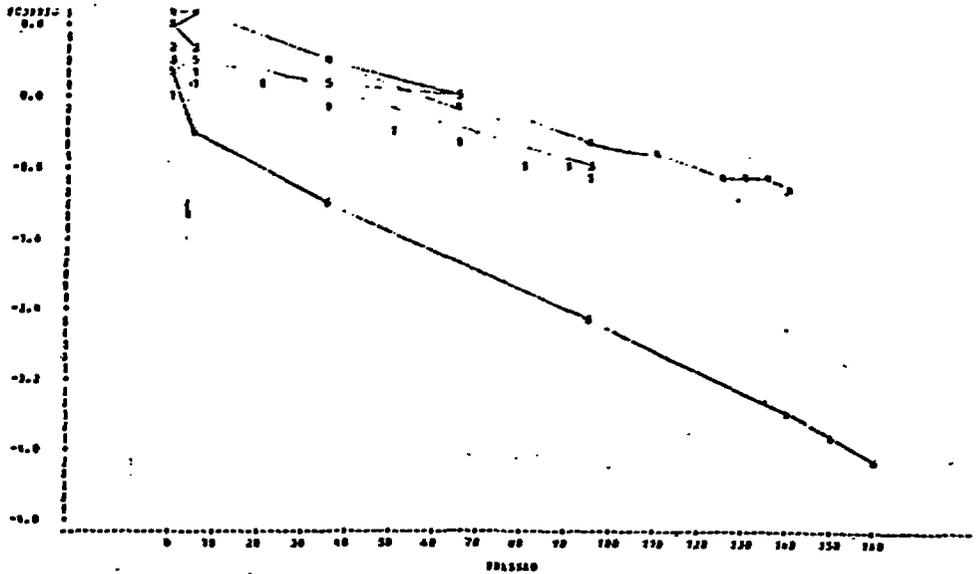


FIG. 4.18. - Comportamento da célula de carga do cavil 109 perante as variações de pressão.

os VCORRIG para Ordem maior ou igual a 21, igualando assim VCORRIG (Ordem 19) = VCORRIG (Ordem 21) através de uma translação de todos os pontos dos ciclos 4, 5 e 6. Analogamente, fez-se com que VCORRIG da Ordem = 32 se tornasse igual ao VCORRIG da Ordem = 41, através da soma da diferença entre eles, em todos os VCORRIG do ciclo 5 e 6, eliminando-se assim o salto existente nos gráficos, entre o fim do ciclo 4 e o início do ciclo 5 .

Novos gráficos foram feitos, de VCORRIG versus PRESSÃO, para cada Canal .

4.2.1.4. Células de Carga

Instaladas nos canais de 102 a 110, as Células de Carga não tiveram bom funcionamento, ou talvez, a carga que a que estiveram sujeitas variou muito pouco . Somente a Célula de Carga do canal 108 apresentou uma correlação lógica entre VCORRIG e PRESSÃO, o que pode ser visto no gráfico da Figura 4.18 .

Embora os resultados obtidos pelo canal 108 sejam bons, merecem pouca confiança pois só aquele único canal se apresentou bem. Por isso, não será levado adiante o estudo do comportamento das Células de Carga .

4.2.1.5. Transdutor de Pressão

O gráfico de VCORRIG medido pelo Transdutor de Pressão, que esteve acoplado à entrada do "liner", contra os valores de PRESSÃO impostos pela Bomba de Pressurização, controlada por outro Transdutor de Pressão, saiu perfeitamente linear. Isso mostra que o controle da pressão interna aplicada foi bom, e é confiável; tira qualquer dúvida que se possa ter quanto ao bom funcionamento da bomba e seus controles em qualquer ensaio .

4.2.1.6. "Strain Gage" /28/

Os gráficos feitos para "Strain Gages", quanto a qualidade dos resultados, podem ser divididos em três categorias.

Numa primeira categoria, podem ser incluídos os canais 122, 130, 133 e 134, estes canais tiveram um comportamento nitidamente linear, em todos os ciclos. Por terem grandes variações de leitura, e por serem bem correlacionadas, merecem credibilidade. A Figura 4.19 mostra o comportamento do "strain gage" do canal 122, como exemplo .

Numa segunda categoria, podem ser enquadrados os canais 124, 131, 132, 135, 136 e 137, que tiveram um comportamento linear e bom nos ciclos 1, 2, 3 e no ciclo 4 até por volta de 100 atn; a partir daí, perderam a linearidade, acumulando deformações residuais de um ciclo para outro. Pela Figura 4.20 pode ser visto um exemplo desta categoria. O sentido das deformações residuais oscilaram de um canal para o outro .

Finalmente, na terceira categoria, encaixamos os demais "strain gages" (canais 111 a 121, 123, 125 a 129 e 138 a 140), que tiveram comportamento ruim. Os SG dos canais 125 a 129 tiveram um comportamento completamente absurdo, como pode ser visto na Figura 4.21; provavelmente estes SG não estiveram bem solidários à superfície do modelo, por problemas que podem ter sido de colagem, ou imperfeições na superfície do modelo . Os demais SG desta categoria, tiveram um comportamento semelhante ao do canal 115, mostrado na Figura 4.22, que variou muito pouco em função da pressão e apresentou grandes variações de leituras residuais de um ciclo para outro, principalmente, nos ciclos 5 e 6 . Todos os SG desta categoria, não merecem ser estudados pois é evidente que houve algum problema em seu funcionamento. Uma explicação possível para a não variação das leituras de SG, é a de que as estrias do modelo, lugar onde eles foram colocados, não apresentam a mesma deformação que as paredes do modelo. Para contornar esse possível erro, os SG deveriam ser colados no mesmo nível do fundo das canaletas de protensão do modelo, submersos no concreto ou colados no fundo de buracos próprios feitos nas estrias .

Dessa maneira somente 10 dos 30 SG usados, servem para estudo do comportamento do modelo. É, entretanto, um número muito pequeno de aparelhos para conduzir a um bom estudo do comportamento estrutural do VPCP.

Como se dispõe de muito maior número de TD, é conveniente então que se estude o comportamento do modelo através das respostas dos TD. Os resultados de SG podem mais tarde ser usados, para comparação da resposta, em algumas posições somente .

4.2.1.7. Transdutores de Deslocamento

De uma maneira geral o comportamento dos TD, analisados através dos gráficos de VCORRIG versus PRESSÃO, parece ser bom. Alguns canais apresentaram comportamento ruim, e possivelmente terão que ser abandonados .

Invariavelmente, os Transdutores de Deslocamento acusaram um comportamento absurdo entre 0 atm de pressão interna e 5 atm. Absurdo porque não tem nenhuma regularidade, porque não se correlaciona bem com a expectativa teórica e porque distoa dos resultados observados para pressões maiores .

Explica-se esse comportamento absurdo para pressões baixas (até 5 atm) como decorrência de acomodações de folgas das protensões. Essas folgas, mínimas e aleatórias, inevitáveis, deixam de existir após a aplicação de certa pressão interna, que, impondo deformações e deslocamentos em toda a estrutura, faz acomodar a protensão. A partir dessa pressão interna mínima de base, o comportamento da estrutura, passa a ser o esperado .

Como os TD após a pressão de 5 atm tiveram bom comportamento, é de se supor que os efeitos abaixo de 5 atm, em todos os ciclos deviam ser eliminados. Isto é, deveríamos ter os mesmos valores de deslocamento para as leituras feitas numa Ordem cuja Pressão fosse 5 atm e Sentido = V (despressurização) e na Ordem cuja pressão fosse também 5 atm, Sentido = I do ciclo seguinte .

Já numa segunda fase de correções, os VCORRIG para todos os TD, foram alterados somando-se ou subtraindo-se uma constante em todos os VCORRIG de cada ciclo, de maneira a se coincidir o fim de um ciclo com o começo do próximo, agora sendo considerado como começo e fim

dos ciclos os VCORRIG para Pressão = 5 atm .

As Ordens onde a pressão é igual a zero, foram abandonadas. Sempre que havia duas Ordens subsequentes com mesmos VCORRIG e PRESSÃO igual a 5 atm, foi desprezada uma delas, por serem redundantes .

Neste ponto da análise, apesar das rejeições, dispõe-se , ainda, de 3800 informações, referentes aos TD .

4.2.2. Estudo da Resposta dos TD na Fase Elástica do Modelo

4.2.2.1. Os ciclos de pressurização

Os ensaios de pressurização do SCM4.2 conforme a Figura 1.12b foram idealizados com base na Pressão Normal de Trabalho ($92 \text{ kgf/cm}^2 = 89 \text{ atm}$), da Pressão de Projeto ($101 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ atm}$) e da Pressão Máxima de Cavidade ($104 \text{ kgf/cm}^2 = 101 \text{ atm}$) citadas no ítem 1.4.2.1 .

No ciclo 1, aos poucos, se chegou a 95 atm de pressão interna, e depois de uma vez, foi retirada a pressão até 5 atm. No ciclo 2 e no ciclo 3, se pressurizou novamente o vaso com 95 atm e se despressurizou. Nesses três primeiros ciclos, nenhuma deformação residual deveria ser notada. Objetivou-se com estes três primeiros ciclos; ensaiar o vaso dentro da fase linear-elástica .

Já no ciclo 4, foi ultrapassado o valor da Pressão Máxima de Cavidade e a expectativa foi a de se ter ultrapassado o regime linear-elástico, indo até 140 atm de pressão interna .

4.2.2.2. A Comparação de Resultados

Com facilidade, poder-se-ia comparar os resultados apresentados por um aparelho qualquer e os resultados teóricos (obtidos utilizando o programa FEAST, ítem 3) calculados para aquele ponto da

estrutura. Isso nos traria uma conclusão diferente para cada aparelho. Mais que isso, lembrando que para cada Posição (Figura 4.16) há uma resposta teórica diferente e que nas laterais do modelo há 8 transdutores em cada posição (em diferentes localizações) poder-se-ia fazer um estudo da aderência desses pontos experimentais em relação à respectiva curva teórica. Mesmo assim, teríamos ainda uma conclusão para cada posição e não uma conclusão global.

Os VCORRIG (deslocamentos) de cada Posição variam com a pressão, mas, enquanto o vaso permanece no regime elástico-linear, espera-se que os VCORRIG sejam proporcionais às pressões internas. Se a proporcionalidade entre Pressão Interna e Deslocamentos for garantida, poder-se-á tentar ajustar todos os pontos experimentais da fase linear, de uma só vez, à curva dos resultados teóricos e assim analisar o comportamento do vaso como um todo. Isso será conseguido, através da introdução de uma variável y que será igual a variação de deslocamentos (VCORRIG) dividida pela variação de pressão entre dois pontos de Ordens subsequentes, de mesmo canal. Os y não mais variarão com a pressão interna dentro do regime linear. Os y teóricos (calculados com FEAST) variarão de posição para posição e podem ser resumidos em duas curvas como as da Figura 4.15, onde os valores de y serão aqueles deslocamentos divididos por 90 atm. Assim, a comparação dos resultados, será um ajuste dos pontos (y , posição) experimentais à curva de y teórico contra posição.

4.2.2.3. Proporcionalidade entre Pressão e Deslocamento

A. O ajuste linear pelo SAS

Foi testada a hipótese de proporcionalidade entre pressão interna e deslocamento para os dados de cada canal, usando todas as observações do ciclo 1, ciclo 2, ciclo 3 e mais as observações do ciclo 4 até a ordem 25, onde a pressão interna é 95 atm.

Como, até o momento em que foram feitas as leituras da ordem 25, o modelo de VPCP não fora submetido a pressões superiores a 95 atm, era de se esperar que até aí, seu comportamento fosse linear. -

Através da PROC GLM do programa SAS /4 / (Procedimento de Modelo Linear), foi feito o ajuste de uma reta, utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados, para todos os pontos de Ordem inferior ou igual a Ordem 25. Como resultado da PROC GLM, o programa nos fornece :

- Os valores dos parâmetros da reta ajustada (intercepto = a, coeficiente angular = b) : $VCORRIG = a + b * PRESSÃO$.

- O parametro R^2 , que serve para avaliar o quanto os pontos se ajustaram bem ou mal à reta imposta pela regressão e que será definido na equação 4.21 adiante .

- O Teste T de Student, que fornece a probabilidade de não dependência de cada um dos parâmetros ao modelo ajustado ($PR > |T|$). Para valores de ($PR > |T|$) maiores que 5%, é mais provável (segundo o teste) que a variável em questão seja sem significância para o modelo. Ao contrário, quando ($PR > |T|$) for menor que 5%, é porque a variável é significativa perante o modelo ajustado para aquele conjunto de pontos .

- E outros resultados como : média, desvio padrão, etc ... que não foram utilizados nesta fase .

Vale ressaltar que (1) :

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} = \frac{N \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[N \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] [N \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

(4.21)

onde :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

(4.22)

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$$

(4.23)

(x_i, y_i) são os pontos (PRESSÃO, VCORRIG) do ajuste em questão .

(1) Todas as somatórias são de 1 até N onde N é o número de pontos do ajuste .

O parâmetro R, é um número que varia entre zero e um e que se aproxima da unidade quando os pontos se ajustam bem a uma reta .

Os valores R^2 ou R-QUADRADO, apresentados pelo SAS, são exatamente o quadrado de R, e portanto, requerem um melhor ajuste para que se aproximem da unidade da mesma maneira que $R(R=0,981 \rightarrow R^2 = 0,962)$. Costuma-se admitir que um ajuste é bom a partir de $R = 0,9$ ($R^2 = 0,81$) .

B - Gráficos

Embora o parâmetro R seja um bom avaliador da qualidade dos ajustes, não é suficiente. Foram feitos gráficos dos resíduos dos ajustes (RVC) em função das variáveis VCORRIG, PRESSÃO e RRVC para cada canal .

Os resíduos (RVC) de um ajuste são a diferença entre VCORRIG e o valor ajustado ($a+b*PRESSÃO$). O resíduo de um ponto, graficamente, é a distância vertical entre o ponto e a reta ajustada .

O gráfico de resíduos versus as variáveis do modelo (VCORRIG e PRESSÃO) serve para verificar se há alguma correlação entre os resíduos e as variáveis, o que indicaria que o ajuste proposto não é bom. Espera-se portanto que os gráficos de resíduos contra as variáveis, apresentem pontos aleatórios, sem nenhuma formação lógica .

A variável RRVC, é um conjunto de valores de resíduos com distribuição normal, gerados pela PROC RANK, que simplesmente associa a cada valor de PRESSÃO um valor de resíduo teórico (independente do resíduo do ajuste) de tal forma que o conjunto de resíduos gerados seja um conjunto com distribuição Normal .

O gráfico de RRVC contra RVC (resíduos normais contra resíduos do ajuste) tem a função de avaliar o quanto o conjunto de resíduos tem distribuição Normal ou não .

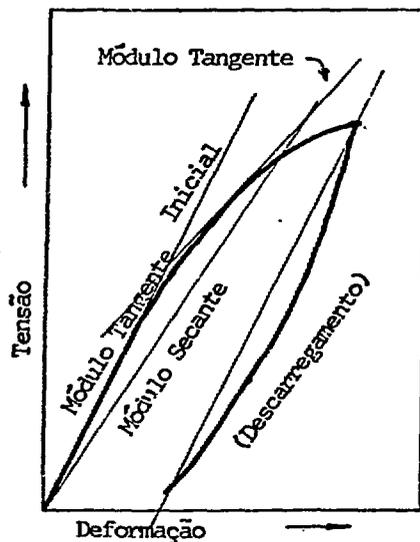
A normalidade dos resíduos ou não, não é de importância vital para a avaliação da qualidade do ajuste. É simplesmente mais uma avaliação.

Para resíduos do ajuste com distribuição normal, espera-se que o gráfico RRVC * RVC seja linear .

C - Resultados do Primeiro Ajuste

Na análise dos ajustes entre VCORRIG e PRESSÃO para os canais dos TD, foram obtidos os seguintes resultados :

- Os valores de R^2 , se apresentaram acima de 0,81 ($R > 0,9$) para 90% dos canais .
- Os gráficos de RRVC * RVC, saíram lineares na sua maioria.
- Os gráficos de resíduos versus VCORRIG e PRESSÃO, quase que invariavelmente, apresentaram os pontos do Ciclo 1, formando uma barreira, como pode ser visto na Figura 4.23. Esse comportamento pode ser explicado lembrando-se que o concreto apresenta como curva de tensão x deformação dentro da fase chamada linear, uma pequena curvatura como na Figura 4.24 / 29/ durante o carregamento e que frequentemente no descarregamento se obtém uma curva cuja secante costuma ser paralela à tangente inicial da curva no carregamento .



Módulos de elasticidade .

FIGURA 4.24. - Curva típica de Tensão-Deformação para o concreto .

--CELDO VALCIC--
 ..A.N.A.L.I.S.E.....D.E.....D.A.C.S.....D.D.....M.O.D.E.L.O.....D.E.....V.P.R.....P.....S.....E.....S.....O.....V.....A.....L.....L.....I.....N.....
 TESTES ESTADISTICOS PARA PREVER LINEARIDADE ANTES DA PRESSAO 95 AFX DC CICLO 4 - IC VERT SUP - CAC -
 CANAL 4

PLOT OF RVC+TVC LEGEND: A = 1 Obs, b = 2 Obs, ETC.

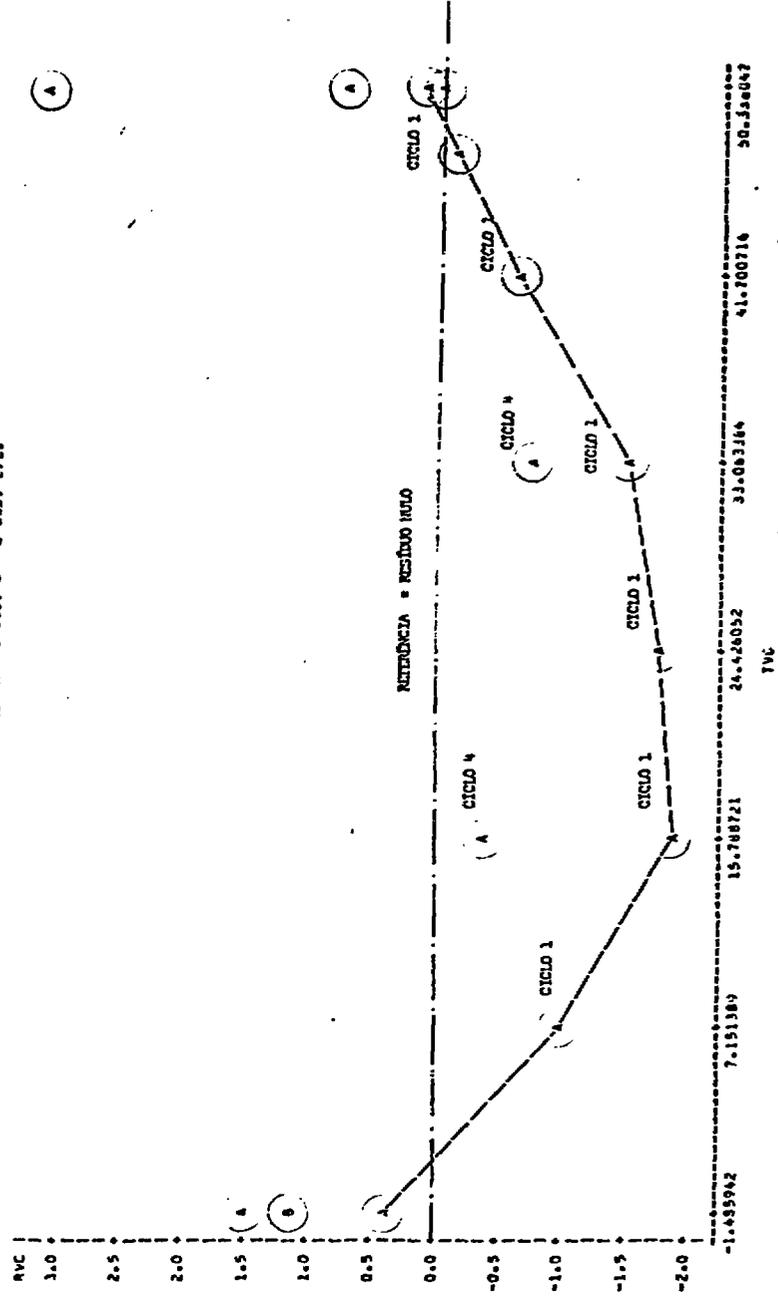


FIG. 4.23. - GRÁFICO DE RESÍDUOS VIEROS INCLUIDO Ajustado - Ajuste de Deslocamento Versus Pressão

Deveriam ter sido feitos muitos ensaios dentro da fase elástica do modelo, com leituras em pressões intermediárias, na pressurização e na despressurização, para que se pudesse observar melhor esse fenômeno. Infelizmente, dos ciclos de pressurização do SCM4.2, na fase elástica, somente no ciclo 1 é que foram realizadas paradas para leituras durante a pressurização. Nos ciclos 2 e 3, há informações do estado do modelo somente para antes e após a pressurização (5 e 95 atm). O ciclo 4, tem duas ordens de parada para leituras entre 5 e 95 atm, porém, como cita Neville /29/, o fenômeno conhecido por histerese é mais acentuado nos primeiros ciclos.

A manutenção dos pontos intermediários do ciclo 1, no ajuste linear, tentado para a fase elástica, faria com que fossem obtidos coeficientes angulares menores para as retas ajustadas e além do que, a qualidade do ajuste (R^2) deve ser pior para o conjunto de todos os pontos, do que quando se retira os pontos intermediários do ciclo 1.

Se houvesse informações a respeito do comportamento do modelo também na despressurização, além das leituras extremas, estas informações se contraporiam às outras intermediárias da pressurização, e no computo geral, a coeficiente angular da reta ajustada, seria um valor intermediário entre o equivalente ao módulo tangente de carregamento e o equivalente no módulo tangente de descarregamento. (Figura 4.24).

Se houvesse vários ciclos de pressurização dentro da faixa elástica, todos com leituras em valores intermediários de pressão, talvez pudesse ser estabelecida, alguma correlação entre V_{CORRIG} e $PRESSÃO$ que não fosse linear.

De qualquer maneira, a opção adotada neste estudo foi a de se abandonar os dados intermediários do ciclo 1 (Ordens 3, 4, 5, 6, 7 e 8). Assim evitou-se que eles pesassem muito no ajuste, fazendo com que a reta ajustada se desviasse para o lado de sua curvatura e se afastasse dos demais.

D. Ajuste sem pontos intermediários

Vale ressaltar que, até aqui, foram abandonados os dados

dos canais 2, 10, 46, 100 e 101, dentre os TD, por apresentarem resultados completamente absurdos, demonstrando falha de funcionamento dos aparelhos. Em particular, nos canais 100 e 101 não foram instalados os aparelhos durante os ensaios.

Foi feito novo ajuste para cada canal, novamente levando em conta só as ordens anteriores à ordem 26 (exclusive), mas desta vez abandonando os dados das ordens 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do ciclo 1. A Tabela 4.2 compara alguns resultados obtidos para os ajustes, com e sem as ordens intermediárias do ciclo 1.

O valor R^2 melhorou em 90% dos casos, demonstrando assim, que os pontos sem as ordens intermediárias do ciclo 1 se ajustam melhor a uma reta.

O teste T de Student, revelou, em praticamente todos os casos, que a variável PRESSÃO foi significativa na explicação dos VCORRIG.

Os valores de "a" (intercepto), deviam, teoricamente, ser nulos. Os pequenos valores de "a" encontrados no ajuste, são fruto de interferências como, por exemplo, as variações de temperatura ou devido às imprecisões dos aparelhos e do Sistema de Aquisição de Dados (SAD). Além disso, que pode ser desprezado, há também o problema dos dados das Ordens intermediárias do ciclo 1, que por causa da barriga da histerese, deslocaram da origem a reta ajustada no primeiro ajuste. Pode ser visto na Tabela 4.2 que os valores de "a" são menores no segundo ajuste.

O resultado de Teste "T" de Student para o coeficiente "a" (intercepto), em 40% dos casos do primeiro ajuste revelaram a não significância do coeficiente "a" como se esperava e, posteriormente, abandonando os pontos das ordens intermediárias do ciclo 1, 70% dos ajustes revelaram válida a hipótese de que $a = 0$, confirmando o acerto da decisão de se abandonar as ordens intermediárias do ciclo 1.

Os novos gráficos, dos novos resíduos (RVC) contra VCORRIG e contra PRESSÃO, não tiveram muita utilidade pois agora, ao invés de 16 pontos em cada gráfico, como antes, se tem somente 10 pontos, dificultando

CANAL	AJUSTE.COM TODOS OS PONTOS					AJUSTE SEM OS PONTOS INTERMEDIÁRIOS DO CICLO 1				
	R ²	b	a	P (b=0) %	P (a=0) %	R ²	b	a	P (b=0) %	P (a=0) %
4	0,9962	0,58	-4,4	-	-	0,9980	0,58	-3,6	-	-
6	0,9516	0,46	-2,8	-	12,7	0,9844	0,45	-0,3	-	80,1
8	0,9853	0,40	-2,4	-	1,15	0,9937	0,40	-1,5	-	8,2
12	0,9976	0,52	-3,6	-	-	0,9985	0,52	-3,1	-	-
14	0,9433	0,36	-1,6	-	30,3	0,9738	0,36	0,3	-	81,4
16	0,9909	0,30	-3,6	-	-	0,9930	0,30	-3,2	-	-
18	0,9948	0,59	-3,2	-	-	0,9995	0,59	-2,2	-	0,3
20	0,9947	0,49	-2,8	-	-	0,9991	0,49	-2,0	-	0,3
22	0,9930	0,37	-2,8	-	0,5	0,9904	0,38	-1,9	-	5,5
24	0,9993	0,39	-4,3	-	-	0,9999	0,39	-3,3	-	0,2
26	0,9895	0,81	-4,0	-	1,4	0,9978	0,81	-2,1	-	4,5
28	0,9974	0,64	-4,3	-	-	0,9982	0,63	-3,7	-	-
30	0,9767	0,53	-1,7	-	22,58	0,9896	0,53	-0,1	-	93,5
32	0,9973	0,40	-3,5	-	-	0,9974	0,40	-3,2	-	-
34	0,9345	0,14	-0,6	-	37,13	0,9327	0,14	-0,9	-	32,9
35	0,8679	0,14	-1,4	-	15,22	0,9353	0,14	-0,5	-	56,5
36	0,7181	0,11	2,7	-	3,72	0,7205	0,11	3,5	0,2	4,8
37	0,8832	0,14	-1,5	-	9,56	0,9398	0,15	0,3	-	38,0
38	0,9651	0,15	-0,6	-	21,34	0,9657	0,15	-0,9	-	25,1
39	0,8974	0,16	-1,9	-	5,3	0,9499	0,17	-1,2	-	25,0
40	0,9433	0,14	-0,9	-	17,03	0,9492	0,14	-1,2	-	12,3
41	0,9292	0,18	-2,0	-	3,52	0,9578	0,19	-1,3	-	12,5
42	0,9463	0,18	+1,0	-	20,24	0,9392	0,19	+1,3	-	22,2
43	0,9174	0,25	-2,0	-	14,31	0,9517	0,25	-0,9	-	51,3
44	0,9882	0,24	-0,7	-	14,83	0,9572	0,24	-0,9	-	22,2
45	0,9729	0,33	-2,4	-	2,22	0,9951	0,34	-1,6	-	13,5
47	0,9790	0,40	-2,7	-	1,57	0,9986	0,41	-1,3	-	10,4
48	0,9881	0,39	-0,3	-	69,29	0,9869	0,39	+0,1	-	93,0
49	0,9853	0,48	-2,9	-	1,22	0,9906	0,49	-1,9	-	11,7
50	0,9959	0,41	-1,5	-	0,25	0,9952	0,41	-1,5	-	4,2

Tabela 4.2. Resultados dos ajustes de Deslocamento versus Pressão dos Canais.

a visualização de alguma formação lógica. De qualquer forma, estes gráficos não mais apresentaram, nenhuma formação lógica, indicando independência entre os resíduos e as variáveis .

Os gráficos de RVC * RRVC resultaram razoáveis. Em quase todos os casos a distribuição dos resíduos foi, portanto, Normal .

Os aparelhos instalados na face horizontal inferior do modelo mediram valcres muito menores que os demais, principalmente, os que estiveram próximos do anel metálico de apoio do modelo, onde o deslocamento foi nulo. Isso fez com que as interferências ficassem grandes quando comparadas as variações de leitura causadas pela pressão interna. Assim , se explica a predominância de ajustes ruins, naqueles canais (canais 13 , 15, 17, 19 e 31) .

E. Conclusão

Foram obtidos 89% dos ajustes com $R^2 > 0,81$, indicando um bom ajuste. Mais que isso : em 51% deles, R^2 foi superior a 0,98 ($R > 0,99$) mostrando um ajuste quase perfeito. Lembrando, ainda, que os gráficos e testes estatísticos, na grande maioria dos casos, mostraram uma perfeita coerência, pode-se concluir que os VCORRIG são diretamente proporcionais às PRESSÕES, ou seja, pode-se garantir a proporcionalidade entre Pressão Interna e Deslocamentos, ao menos para os pontos até a Ordem 25 o que significa que para pressões até 95 atm o vaso teve comportamento linear elástico .

4.3. Comparação das Respostas

4.3.1. Preparação dos Resultados Experimentais

Para que se possa comparar os resultados experimentais com os teóricos (calculados com os programas de computador), dentro da fase linear elástica, todos de uma só vez, é necessário que se comparem os coeficientes angulares das respectivas retas dos gráficos VCORRIG * PRESSÃO

Dois caminhos podem ser seguidos :

1 - Tomar para cada ponto (cada posição) o resultado do ajuste linear feito para o conjunto de aparelhos que estiveram naquela posição e correlacionar esses valores (um valor para cada posição) com a curva dos valores teóricos .

2 - Calcular os valores de y (Variação de $VCORRIG$ /Variação de Pressão) entre cada ponto e seu anterior imediato, obtendo assim um conjunto de valores correspondente aos coeficientes angulares das retas que ligam cada ponto do gráfico ($VCORRIG * PRESSÃO$) ao seu anterior imediato, e depois, correlacionar esses valores (9 para cada TD) à curva dos valores teóricos .

Foi dada preferência pela segunda opção de estudo pelo fato do correlacionamento entre a teoria e experiência, ser feito através de ajustes estatísticos e nesses casos, se dá preferência a conjuntos com o maior número de dados possível .

Assim, foram calculados os valores $y = [(VCORRIG - VANT) / PRESSÃO - PANT]$ para todos os pontos, de cada canal, onde $VANT = VCORRIG$ do ponto de Ordem imediatamente anterior e $PANT = PRESSÃO$ do mesmo ponto. Para a Ordem 2 não existe o valor y porque nenhuma ordem a antecede .

A expectativa sobre os valores de y , é a de que enquanto se estiver dentro da fase de comportamento linear, os valores de y , dentro de cada Posição, deverão variar pouco e aleatoriamente, como fruto das interferências incontroláveis características de dados experimentais. Somente quando o modelo abandonar a fase linear é que os valores y deverão se distanciar do conjunto dos demais, e espera-se ainda, que após a perda de linearidade, em termos de y , sejam maiores que os demais .

4.3.2. Correlação Linear entre Respostas

A maneira mais simples e adequada encontrada para se correlacionar os resultados teóricos e experimentais, estatisticamente, foi

através do uso do GLM do SAS, descrito anteriormente. Trata-se, portanto, de um ajuste linear .

Daqui por diante será tratado de y_t (y teórico) o valor do coeficiente angular da reta do gráfico de Deslocamento Calculado Versus Pressão Interna (item 4.1.2) para uma determinada posição. Analogamente , trataremos de Y_o (y observados) os valores de y obtidos no item 4.3.1, para cada posição determinada .

Na tentativa de encontrar uma relação do tipo $y_o = a + b \cdot (y_t)$, através do GLM do SAS, usando y_t como sendo a variável independente e y_o a variável dependente, poderá ser obtida uma correlação entre as duas respostas e assim elas estarão sendo comparadas. Se forem encontrados $a = 0$ e $b = 1$, implicará em que a resposta experimental é absolutamente igual à teórica. Se forem encontrados valores de "a" significativos, e valores de "b" próximos da unidade, conforme a grandeza de "a", a disparidade de resultados observados e calculados poderá ser atribuída facilmente a problemas com a determinação do coeficiente de Poisson do concreto , (veja item 4.1.2.2 e Figuras 4.11 e 4.12) . Para valores de "a", resultados do ajuste, não significativos ($a=0$) e valores de b diferentes da unidade, dentro de certos limites, pode-se atribuir a diferença a problemas com a determinação do módulo de elasticidade do concreto (E), onde E_o seria obtido pela relação :

$$E_o = \frac{E_t}{b} \quad (4.24)$$

com :

E_o = E observado (experimental)

E_t = E admitido em cálculo teórico

Finalmente, um resultado com $a \neq 0$, mas pequeno, e com $b \neq 1$, mas próximo da unidade, pode ser explicado com um misto das diferenças entre os coeficientes de Poisson, admitido em cálculo e o real, e diferenças entre os Módulos de Elasticidade E_o e E_t .

4.3.3. Preparação dos Resultados Teóricos

Conforme foi mostrado no item 4.1, a resposta teórica calculada, em termos de deslocamentos é discreta e, somente para as posições onde foram localizados os nós, conforme a malha da Figura 4.2, é que se têm os valores de deslocamento. Infelizmente essas posições dos nós não coincidem com as Posições em que foram instalados os TD. Para a obtenção dos valores de deslocamento teóricos, nas mesmas Posições onde foram colocados TD, poder-se-ia, simplesmente, interpolar os valores mais próximos onde se tem a resposta teórica; porém, preferiu-se fazer o ajuste de uma função para todo o conjunto de Posições, de modo a se obter valores mais exatos.

A determinação de uma função (FDX) que correlacionasse y_t com as Posições, foi feita através do uso das PROC GLM e PROC STEPWISE do programa SAS, por tentativas de ajustes lineares entre y_t e diversas funções fixas F (Posição). Foram usadas, nas tentativas de ajuste as seguintes funções da variável Posição :

1. $x_1 = \text{POSIÇÃO}$
2. $x_2 = x_1 * x_1$
3. $x_3 = x_1 ** 3$
4. $x_4 = x_1 ** 4$
5. $x_5 = x_1 ** 5$
6. $x_6 = x_1 ** 6$
7. $x_7 = x_1 ** 7$
8. $x_8 = x_1 ** 8$
9. $x_9 = x_1 ** 9$
10. $x_{10} = x_1 ** 10$
11. $x_{11} = x_1 ** 11$
12. $\text{EXP1x2} = \text{EXP} [-x_2 / 10.000,]$
13. $\text{EXP1x3} = \text{EXP} [-x_3 / 10.000.000,]$
14. $\text{EXPx2} = \text{EXP} [-x_2 / 100.000,]$
15. $\text{EXPx3} = \text{EXP} [-x_3 / 100.000.000,]$
16. $\text{EXP3x2} = \text{EXP} [-x_2 / 31.000,]$
17. $\text{EXP3x3} = \text{EXP} [-x_3 / 31.000.000,]$
18. $\text{EXP1xx2} = \text{EXP} [-(xx**2) / 10.000,]$

19. $EXP_{1xx3} = EXP [-(\alpha^{**3}) / 10.000.000,]$
 20. $EXP_{xx2} = EXP [-(\alpha^{**2}) / 100.000,]$
 21. $EXP_{xx3} = EXP [-(\alpha^{**3}) / 100.000.000,]$
 22. $EXP_{3xx2} = EXP [-(\alpha^{**2}) / 31.000,]$
 23. $EXP_{3xx3} = EXP [-(\alpha^{**3}) / 31.000.000,]$

onde :

xx = 611 - POSIÇÃO na superfície lateral

e

xx = 615 - POSIÇÃO nas superfícies horizontais.

Dentre todas as tentativas de ajuste feitas, as melhores e menos complexas encontradas foram as seguintes :

$$YV = 0,2'07 + EXP_{x2} - 0,267 * EXP_{x3} \quad (4.25)$$

$$YSUP = YV + 0,2352 \quad (4.26)$$

$$YINF = YV - 0,2352 \quad (4.27)$$

$$YH = 0,7669 - 0,000177 x_1 - 0,5459 * EXP_{x3} \quad (4.28)$$

onde :

YV, YSUP e YINF são os valores calculados de Y_t (Δ deslocamento / Δ PRESSÃO) para a superfície horizontal do modelo, na média, superior e inferior respectivamente e YH é o valor calculado de Y_t para a superfície lateral (deslocamentos radiais) .

Para o ajuste dos Y_t correspondentes aos deslocamentos verticais, foi encontrado R-QUADRADO = 0,999987 e as probabilidades das variáveis do ajuste não serem significativas resultaram todas iguais a 0,01% ou 0,0001 . No caso dos YH foi obtido o valor R-QUADRADO = 0,996964, e as probabilidades 0,76% para x_1 e 0,01% para EXP_{x3} .

De posse das funções para o cálculo de y_t em qualquer Posição, foi associado então, um valor de y_t a cada observação experimental, conforme a posição do TD do Canal corresponde à observação. Por serem teóricos, os valores y_t são os mesmos para todas as observações de cada Canal assim como para as observações dos Canais de mesma Posição.

4.3.4. Movimentos de Corpo Rígido

Como foi mostrado no ítem 3.2.4, o modelo sofre movimentos de translação horizontal aleatoriamente, conforme as dilatações por temperatura, os atritos na base e outros fatores. Esses deslocamentos, embora indeterminados, tem mesmo valor e sentido contrário em canais ligados a TD simetricamente opostos. Assim, a simples média entre as medidas feitas em pontos simetricamente opostos, corrige os erros trazidos por esses movimentos, quaisquer que sejam. O ajuste feito para as médias, ao invés dos valores individuais, fornece resultados diferentes e espera-se que o parâmetro R seja mais próximo da unidade devido a diminuição das disparidades.

4.3.5. Ajuste Linear entre as respostas teóricas e experimentais

A - Tentativas

Os dois conjuntos de dados : deslocamentos radiais dos pontos da superfície lateral e, deslocamentos verticais das superfícies horizontais superior e inferior foram tratados separadamente.

Várias tentativas de ajuste foram feitas até que se tivesse certeza de que as interferências fossem as mínimas possíveis. Pela Tabela 4.3 podem ser vistos os vários passos dados e a evolução dos termos 'R-QUADRADO e "b" conforme foram sendo abandonados ou agrupados os dados.

Tabela 4.3. - Resultados dos Ajustes $y_0 = a + b * y_t$.

TENTATIVA	SUPERFÍCIE	R-QUADRADO	b	a
VALORES ISOLADOS				
1	SUP	0,9006	0,714	+ 0,019
2	SUP	0,9006	0,714	+ 0,019
3	SUP	0,9931	0,742	-
1	INF	0,9410	0,891	- 0,026
2	INF	0,9659	0,936	- 0,029
3	INF	0,9757	0,872	-
1	LAT	0,8419	0,870	- 0,050
2	LAT	0,8601	0,845	- 0,038
3	LAT	0,9707	0,752	-
MÉDIAS DE PONTOS SIMETRICAMENTE CPOSTOS				
4	HORIZ	0,9909	0,782	-
5	HORIZ	0,9932	0,764	-
8	HORIZ	<u>0,9950</u>	<u>0,766</u>	-
4	LAT	0,9928	0,650	-
5	LAT	0,9935	0,652	-
6	LAT	0,9946	0,654	-
7	LAT	0,9953	0,660	-
8	LAT	<u>0,9961</u>	<u>0,660</u>	-

A Tabela 4.3 foi preparada considerando as seguintes hipóteses :

a) A primeira tentativa foi feita, usando-se os dados com as correções citadas até agora. Foram desprezados somente os canais 2, 10, 100 e 101. Foi permitida a existência de intercepto (a ≠ 0) no ajuste. Foram usadas as informações isoladas, sem médias .

b) A segunda tentativa foi feita também com intercepto (a ≠ 0), ainda com informações isoladas e diferiu da primeira porque foram então! desprezados os dados dos canais 1 na superfície inferior e canais 68 e 74

na superfície lateral .

c) A terceira tentativa, foi para informações isoladas, mas, não admitindo a existência de intercepto no ajuste ($a = 0$) .

d) A quarta tentativa de ajuste foi feita para os valores ¹ das médias, entre cada ponto e seu oposto simétrico, sem intercepto e desprezando-se no total os pares de canais : 1 e 2, 9 e 10, 100 e 101, 68 e 69, 74 e 75 .

e) Na quinta tentativa, feita com as médias e sem intercepto, foram desprezados os pares de canais 46 e 47, 13 e 14, 25 e 26, além dos ¹ citados nas tentativas anteriores .

f) Na sexta tentativa análoga à quinta, foram desprezados os canais 67 e 66 .

g) Na sétima tentativa, análoga à sexta, foram desprezados ¹ ainda, os dados referentes à Ordem 18, de todos os canais.

h) Finalmente, para a oitava tentativa, foram desprezados os dados de Canais e Ordens variados, que apresentavam resíduos muito grandes, num total de 18 dados.

Assim, após todos os abandonos foram usadas 285 observações ¹ no ajuste dos deslocamentos verticais (oitava tentativa) e 693 observações no ajuste dos deslocamentos radiais (oitava tentativa). Lembrando que, como se trata das médias, cada observação é resultante de duas das originais, pode-se afirmar que foram usadas para a fase linear, 30% das informações colhidas, sendo ainda 40% das informações, colhidas para os TD, e 80% das informações colhidas para TD dentro da fase de comportamento elástico .

B - Resultados

Os dados que foram sendo abandonados de uma para outra tentativa, apresentaram-se disparatados em relação aos demais, fato que pôde ser observado através dos gráficos de resíduos. Todos os abandonos resultaram ¹ em melhoria dos ajustes e bons gráficos de resíduos .

O abandono do parâmetro de intercepto "a" a partir da terceira tentativa (Tabela 4.3) melhorou bastante a qualidade dos ajustes, indicando que realmente esse parâmetro não deveria ser considerado e que as diferenças entre teoria e experimento foram principalmente por variações do módulo de elasticidade (Ítem 4.3.2).

Uma melhoria considerável nos ajustes, apesar de reduzir à metade do nº de informações, deu-se quando se passou a usar as médias dos valores simetricamente opostos. Eliminando-se, assim, os movimentos de corpo rígido.

Os abandonos de dados finais, das etapas 5 a 8, tiveram como objetivo, simplesmente aprimorar os resultados, eliminando aquelas observações onde as interferências foram maiores.

A diferença entre o parâmetro "b" encontrado no ajuste dos deslocamentos verticais e c , encontrado para os deslocamentos radiais não deveria existir. Olhando somente o ajuste dos deslocamentos radiais, pode-se dizer que um módulo de elasticidade (E) 51,5% ($1/0,660$) maior que aquele admitido no cálculo (Ítem 4.1.2.2.) levaria a resultados estatisticamente idênticos aos experimentais. Se, por outro lado, forem observados os resultados do ajuste dos deslocamentos verticais, chegar-se-á à conclusão de que admitindo um E 30,5% ($1 / 0,766$) maior do que o E obtido nos ensaios, conforme o Ítem 2.2.2, chegar-se-ia a resultados teóricos de deslocamento, estatisticamente idênticos aos experimentais. Poder-se-ia pensar na existência de dois módulos de elasticidade, um na direção horizontal e outro na vertical, porém essa hipótese foi descartada tendo em vista que o concreto é um material considerado isotrópico. Pequenas diferenças entre o comportamento do Módulo de elasticidade, em duas direções, poderiam ocorrer devido a pequenas ortotropias aleatórias resultantes de condições diversas da construção. Mas, com certeza não deverão ser tão grandes como no caso (15%). É provável que as interferências nas medidas e/ou as falhas no processo de ajuste estatístico, tenham feito com que os resultados na vertical se distanciassem da teoria, diferentemente que os deslocamentos radiais. Assim, devemos supor que o valor correto de E seja um valor intermediário entre 30,5% e 51,5% maior que aquele admitido no Ítem 4.1 ou seja, $450.000 \text{ kgf/cm}^2 < E < 530.000 \text{ kgf/cm}^2$. Os resultados gráficos da última tentativa de ajuste deste Ítem estão nas Figuras 4.26 a 4.33.

C - Disparidade da Instrumentação em Regiões Diferentes

Na lateral do Modelo, foram usados mais que o dobro das informações utilizadas para o ajuste na vertical. Isso aconteceu devido à desproporção entre o número de aparelhos nas superfícies horizontais e lateral .

Os aparelhos colocados na lateral do modelo, foram posicionados visualmente no centro das estrias que tinham 25 mm; (Figura 2.6) dessa maneira não houve possibilidade de grandes falhas de posicionamento. Já nas superfícies horizontais, superior ou inferior, os medidores tiveram sua posição determinada somente pela furação da viga do Pórtico Metálico, podendo ocupar de forma indeterminada posições num raio de 53 mm do centro dos 4 furos onde foram fixados os suportes de TD . Não houve nenhuma marcação de posição nas superfícies do modelo. Essa variação indeterminada de posições para medição de deslocamentos verticais além de indesejável e exagerada .

Para o gráfico de deslocamentos verticais médios teóricos (Figura 4.15), entre duas posições distantes 53 mm, pode haver uma variação de até 10 μ , o que significa até 17% de erro. Esse erro de posicionamento do medidor, apareceria em todas as suas medidas .

Os pares de canais 13 e 14, 25 e 26, apresentaram resultados que separadamente podem ser considerados bons, mas foram abandonados, na quinta tentativa de ajuste com a teoria, por se mostrarem distoantes em relação aos demais. Provavelmente, problemas de posicionamento causaram essa incompatibilidade. Outros erros de posicionamento de menor grandeza, podem ter ocorrido nos demais TD, usados na leitura de deslocamentos verticais, causando um erro nos resultados do ajuste, e não podendo ser identificados .

Assim, devido ao menor número de aparelhos usados para os deslocamentos verticais e devido ao seu mau posicionamento, deve-se confiar muito menos nesses resultados do que naqueles obtidos para os deslocamentos radiais .

D - Erros no Cálculo Teórico

A Figura 4.15 do item 4.1, mostra os resultados de deslocamentos, calculados por 3 diferentes programas de cálculo. Foram usados somente os resultados obtidos com o FEAST, para este estudo. Na Figura 4.15, observa-se que os deslocamentos radiais não diferem muito entre os 3 Métodos de cálculo mas os deslocamentos verticais do PV2 são proporcionalmente maiores que os calculados pelo FEAST e NONSAP. Pode-se grosseiramente encontrar a relação :

$$(\delta_V)_{PV2} = (\delta_V)_{FEAST} * 1,16 \quad (4.29)$$

δ_V = deslocamentos verticais

Pelos resultados apresentados na Tabela 4.3, para deslocamentos verticais, temos :

$$(\delta_V)_{EXP} = (\delta_V)_{FEAST} * 0,766 \quad (4.30)$$

$(\delta_V)_{EXP}$ = deslocamentos verticais experimentais .

pode-se, então, a grosso modo, afirmar que :

$$(\delta_V)_{EXP} = \{ (\delta_V)_{PV2} / 1,16 \} * 0,766$$

$$\text{ou } (\delta_V)_{EXP} = (\delta_V)_{PV2} * 0,66 \quad (4.31)$$

Coincidentemente 0,66 é o fator encontrado na Tabela 4.3 para o ajuste nos deslocamentos radiais. Isso indica que se fosse feito o estudo em relação aos resultados calculados com o PV2, haveria coerência entre os resultados do ajuste na horizontal e na vertical, apesar das falhas de posicionamento dos TD para deslocamentos verticais .

E - Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade $E = 350\ 000\ \text{kgf/cm}^2$ encontrado nos ensaios descritos no ítem 2.2.2. foi determinado aos 56 dias de idade do concreto. Os ensaios do modelo na fase linear foram feitos a 84 e 85 dias de idade do concreto, como foi citado no ítem 2.2.3.

O Módulo de Elasticidade, assim como a resistência do Concreto, cresce, até o período de 1 ano aproximadamente. Para idades de 85 dias, pode-se ter um Módulo de Elasticidade até 20% maior que o encontrado a 56 dias, conforme gráfico da Figura 4.25 /29/. Isso explica parte das diferenças encontradas neste estudo, mas, não explica os 51,5% do ítem 4.3.5.

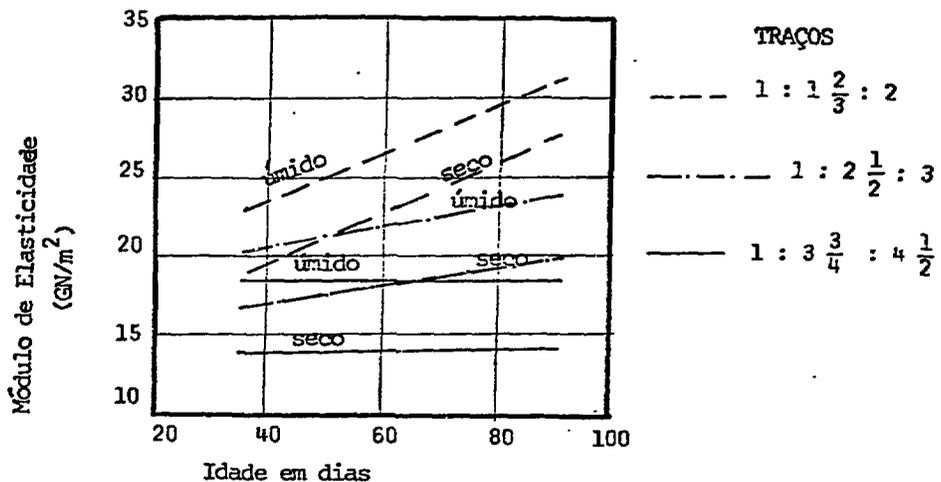


FIGURA 4.25. - Módulos de Elasticidade em função da idade e Condições de Umidade

4.4. Determinação do Limite de Elasticidade

Dentro dos mesmos conceitos e critérios anteriores, que nortearam a comparação através do ajuste, usando os dados até a Ordem 25, para a qual se tinha certeza da elasticidade do modelo, pode-se agora, introduzir os dados das Ordens subsequentes, uma a uma e esperar que enquanto o comportamento do modelo for linear, os resultados de ajuste serão bons.

As Figuras 4.26 a 4.29 mostram todos os gráficos feitos e

usados na última tentativa de ajuste linear do item 4.3.5., para os deslocamentos verticais até Ordem 25. As Figuras 4.30 a 4.33 mostram os gráficos correspondentes ao ajuste dos deslocamentos radiais, também até Ordem 25. Nos itens 4.2.2.3 A e B são comentados os critérios de análise dos gráficos apresentados.

As Figuras 4.34 a 4.39 mostram os resultados gráficos do ajuste, usando os dados até a Ordem 26 (Pressão = 110 atm). Nelas pode-se notar que o ponto "A", correspondente aos dados da Ordem 26, começa em algumas posições, a sobressair-se dos demais por ser maior.

A Tabela 4.4. mostra as ordens equivalentes aos pontos usados nos gráficos das Figuras 4.26 a 4.45.

Tabela 4.4. - Equivalência de Ordens e Pontos para Gráficos das Figuras 4.26 a 4.45.

ORDEM	9	10	13	14	17	18	23
PONTO	1	2	3	4	5	6	7
ORDEM	24	25	26	27	28	29	30
PONTO	8	9	A	B	C	D	E

Os gráficos das Figuras 4.40 a 4.45 mostram os resultados do ajuste usando dados até a ordem 27. A ordem 27, se refere aos valores de Y_0 (Δ deslocamento / Δ pressão) calculados entre as ordens 26 e 27, correspondente a 110 e 125 atm, respectivamente.

A Tabela 4.5 mostra os valores de R-QUADRADO e "b" para os ajustes feitos incluindo às ordens de 26 a 30, uma a uma. É visível que a qualidade do ajuste cai a cada ordem que se acrescenta, além de crescer o fator "b". Isso é válido como indício da perda de elasticidade.

Pode-se afirmar que o modelo não está mais em regime linear a partir da pressão 125 atm pela preponderância de altos resíduos de ajuste para os pontos das ordens 27, observados no ajuste que usou dados até a Ordem 27. Isso pôde ser confirmando pelos gráficos do ajuste com dados até a ordem 28 e depois usando a Ordem 29, que não são apresentados mas mostram as mesmas características dos gráficos das Figuras 4.40

Tabela 4.5 - Resultados dos Ajustes $y_0 = b * y_t$.

<u>Deslocamentos Verticais</u>			
DADOS USADOS	PRESSÃO MÁXIMA (atm)	R-QUADRADOS	b
até ordem 25	95	0,9950	0,766
até ordem 26	110	0,9942	0,772
até ordem 27	125	0,9908	0,785
até ordem 28	130	0,9865	0,786
até ordem 29	135	0,9856	0,791

<u>Deslocamentos Radiais</u>			
DADOS USADOS	PRESSÃO MÁXIMA (atm)	R-QUADRADOS	b
até ordem 25	95	0,9961	0,660
até ordem 26	110	0,9958	0,666
até ordem 27	125	0,9945	0,671
até ordem 28	130	0,9906	0,683
até ordem 29	135	0,9909	0,683

a 4.45 (mas com resíduos ainda maiores) .

Como os resultados do ajuste para a Ordem 26 não deram resíduos muito altos, provavelmente aquela pressão (110 atm) o modelo ainda estava dentro do regime linear .

Assim, a perda de linearidade e de elasticidade, devem ter ocorrido entre 110 a 125 atm .

ANALISE DE DADOS DE MODELO DE V. P. C. P. SERIE 2

ANALISE DE Y = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - 12 OBSERVAÇÕES - 5 E M INTERCEPTO
 COMPARAÇÃO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO PRIMEIRO TENTATIVA AJUSTE LINEAR PARA

PLOT OF RESIDUOS SERIE 2 IS VALUE OF AQZDEM

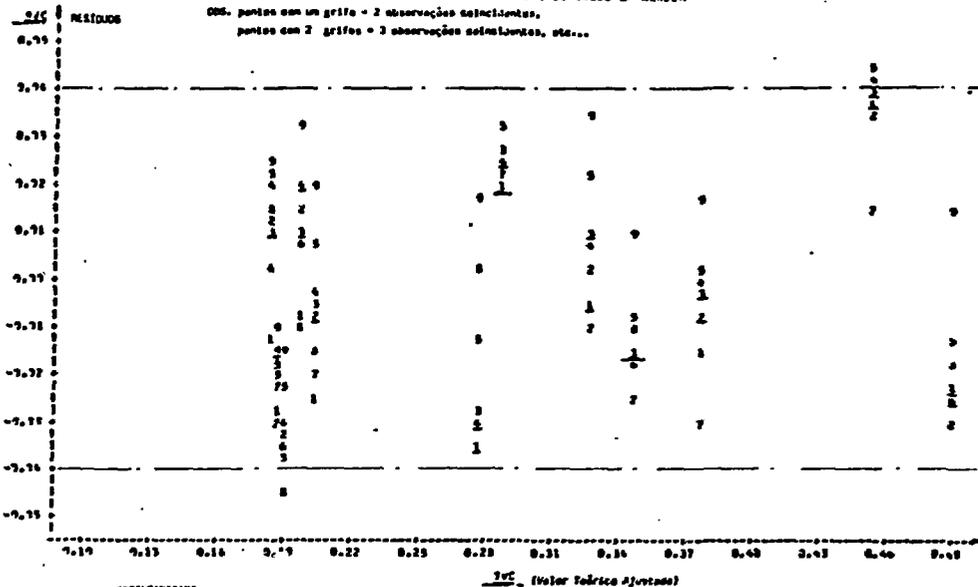


FIGURA 4.26 - GRÁFICO DE RESÍDUOS VERSUS VALOR TÉCNICO AJUSTADO.

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. SERIE 2

ANALISE DE Y = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - 12 OBSERVAÇÕES - 5 E M INTERCEPTO
 COMPARAÇÃO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO PRIMEIRO TENTATIVA AJUSTE LINEAR PARA

PLOT OF RESIDUOS SERIE 2 IS VALUE OF AQZDEM

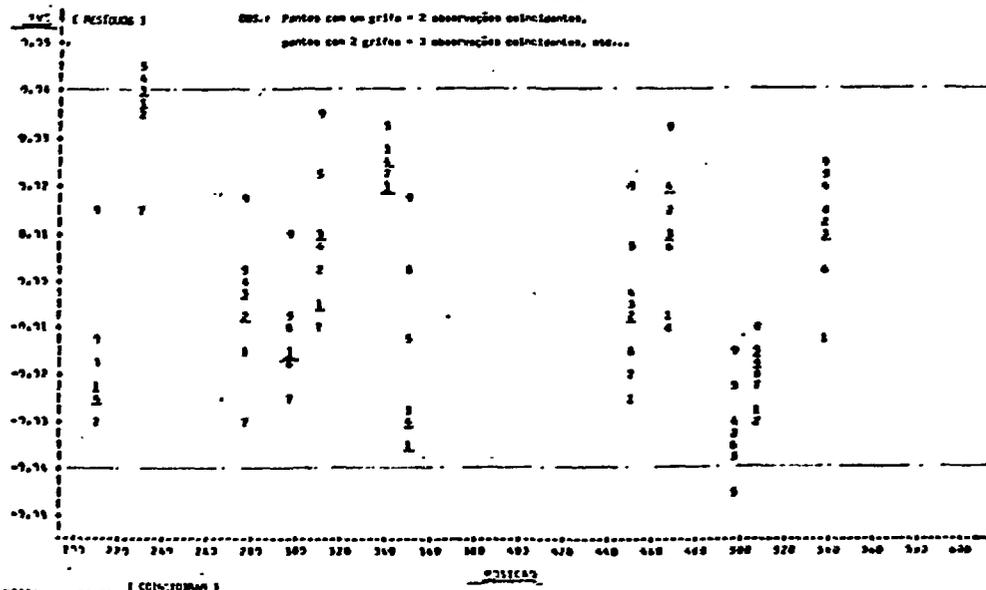


FIGURA 4.27 - GRÁFICO DE RESÍDUOS VERSUS POSIÇÃO.

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. ESCALA 2
 ANALISE DOS V = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - 13 VERTICAIS - S E M INTERCEPTO
 COMPARACAO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO PEAST - PRIMEIRA TENTATIVA AJUSTE LINEAR PARA MEDICAO 23
 PLOT OF RAVEC/RVC SYMBOL IS VALUE OF ADDEND
 PLOT OF RAVEC/RVC SYMBOL IS VALUE OF ADDEND

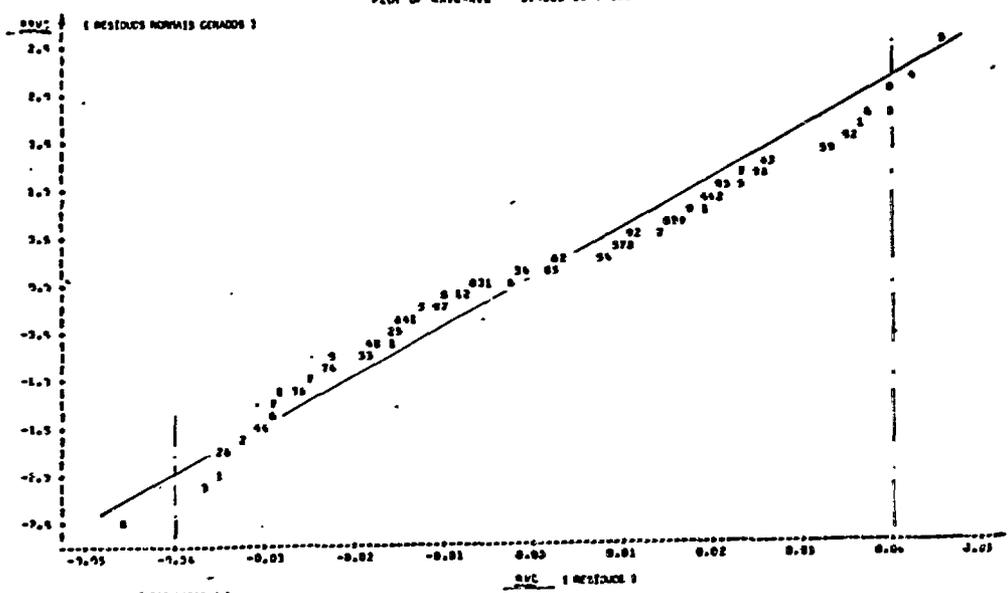


FIGURA 4.28 - GRAFICO DE RESIDUOS NORMAIS ESPACOS VERSUS RESIDUOS.

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. ESCALA 2
 ANALISE DOS V = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - 13 VERTICAIS - S E M INTERCEPTO
 COMPARACAO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO PEAST - PRIMEIRA TENTATIVA AJUSTE LINEAR PARA MEDICAO 23
 PLOT OF VPOSICAO SYMBOL IS VALUE OF ADDEND
 PLOT OF VPOSICAO SYMBOL USED IS 0

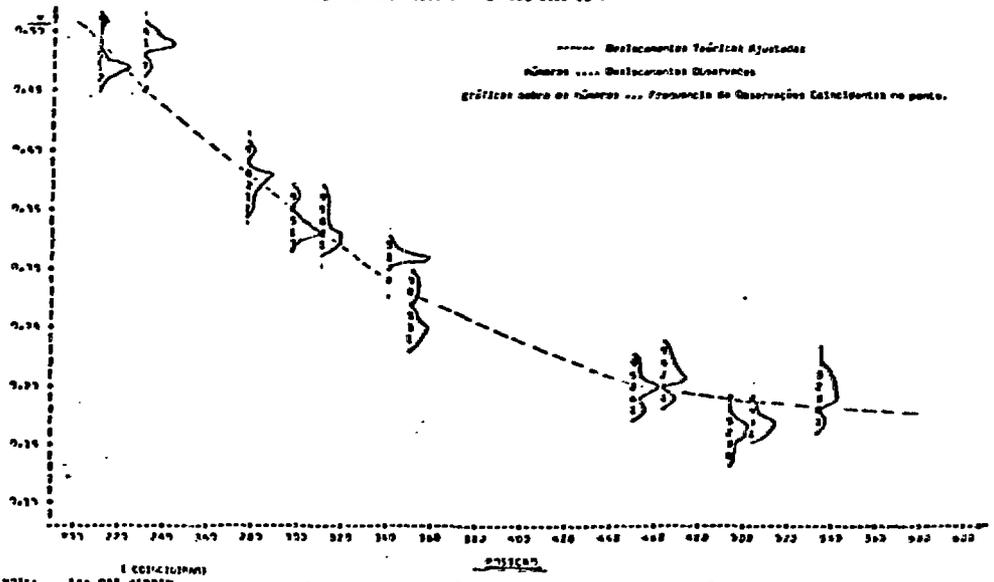


FIGURA 4.29 - Comparação Crítica de Distribuições Observadas e Teóricas Ajustadas.

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. SERVO 2
 ANALISE DE V = DELTA DEFLORACAO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - ED. UNIV. BRASILIA - 1980 - 3 & 4 - INTERENCIO
 CONSTATADO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DE PRATI - PRIMEIRA TENTATIVA AJUSTE LINGUAR PARA DELTA 12
 PLOT DE RUC=VUC SYMBOL IS VALUE OF AORDEN

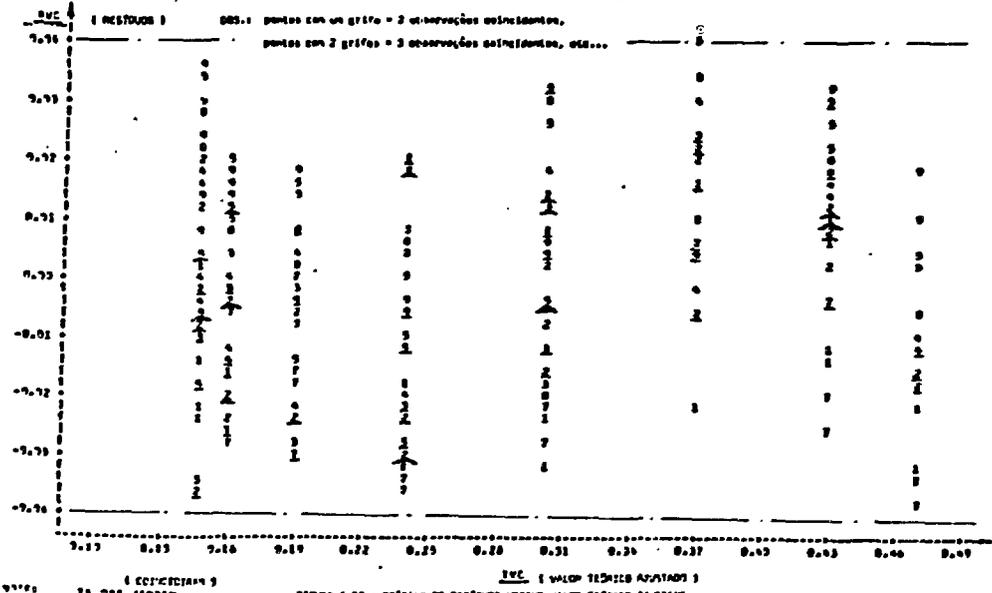


FIGURA 4.30 - GRAFICO DE RESIDUOS VERSUS VALOR TECNICO AJUSTADO

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. SERVO 2
 ANALISE DE V = DELTA DEFLORACAO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - ED. UNIV. BRASILIA - 1980 - 3 & 4 - INTERENCIO
 CONSTATADO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DE PRATI - PRIMEIRA TENTATIVA AJUSTE LINGUAR PARA DELTA 12
 PLOT DE RUC=VUC SYMBOL IS VALUE OF AORDEN

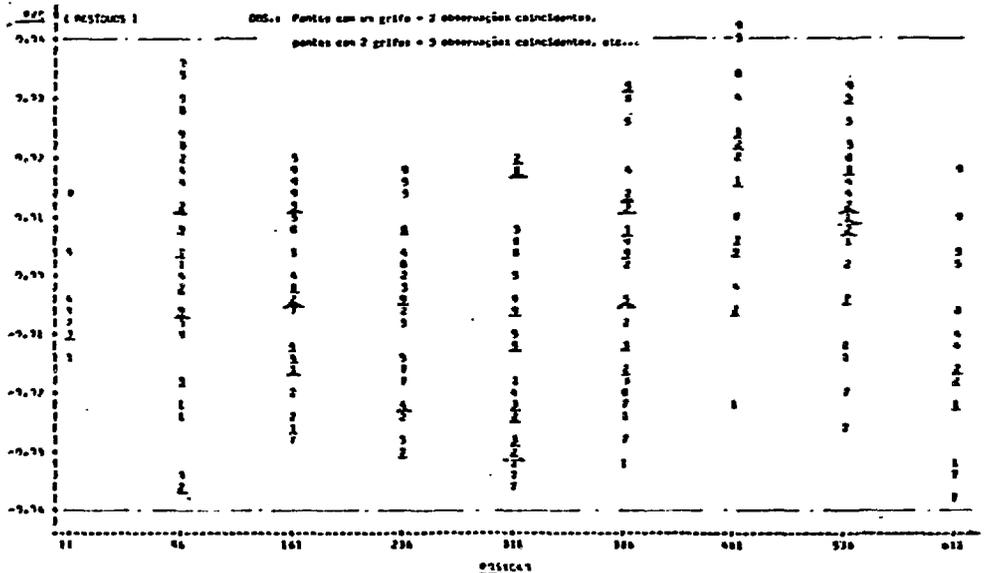
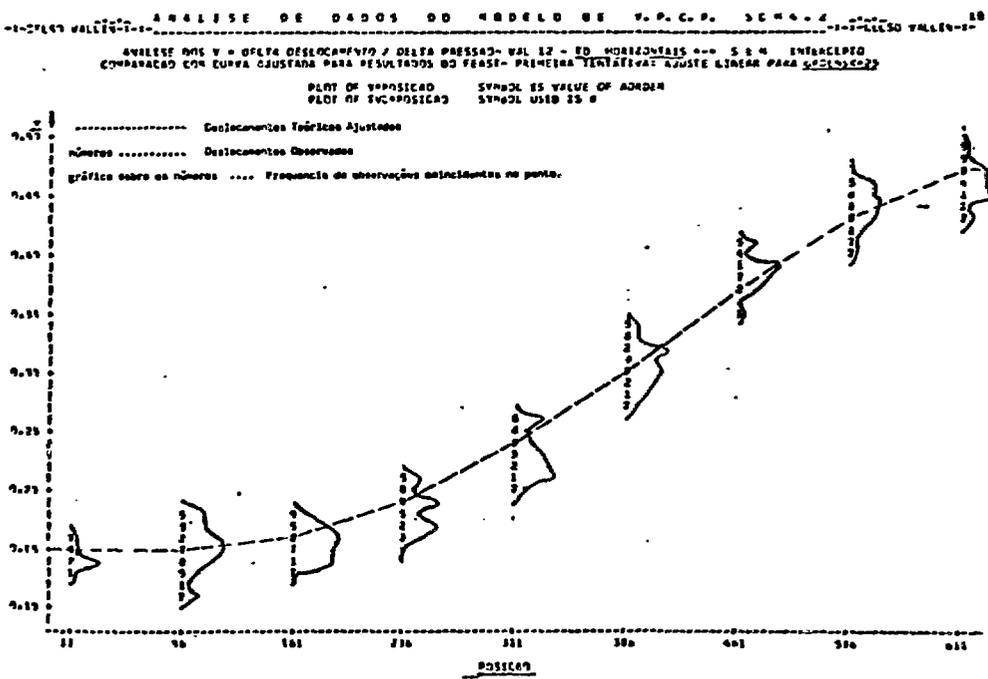
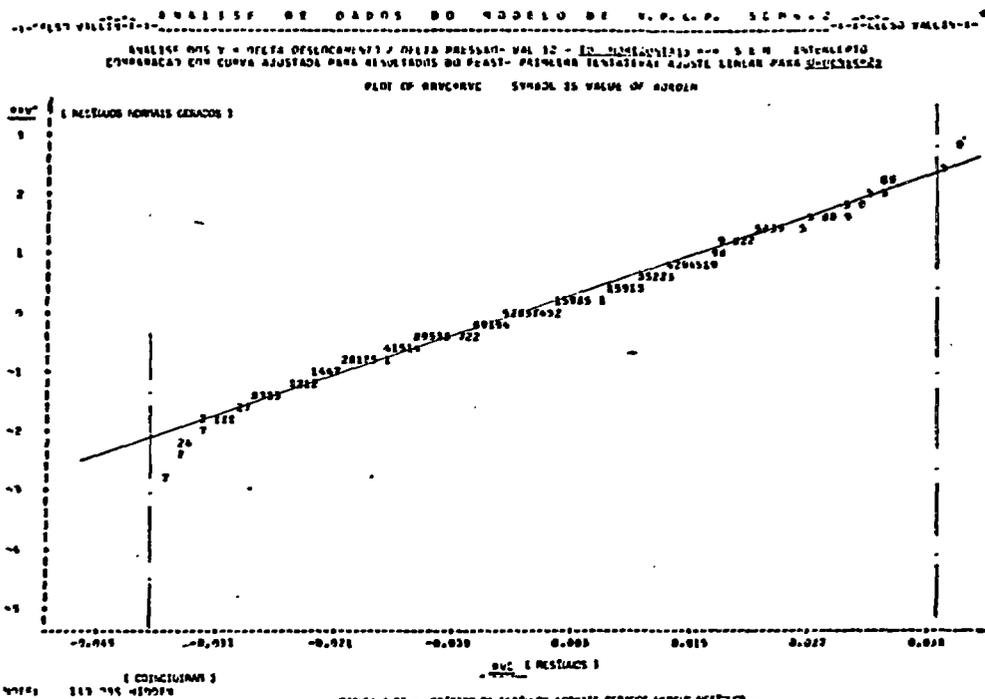


FIGURA 4.31 - GRAFICO DE RESIDUOS VERSUS POSICAO

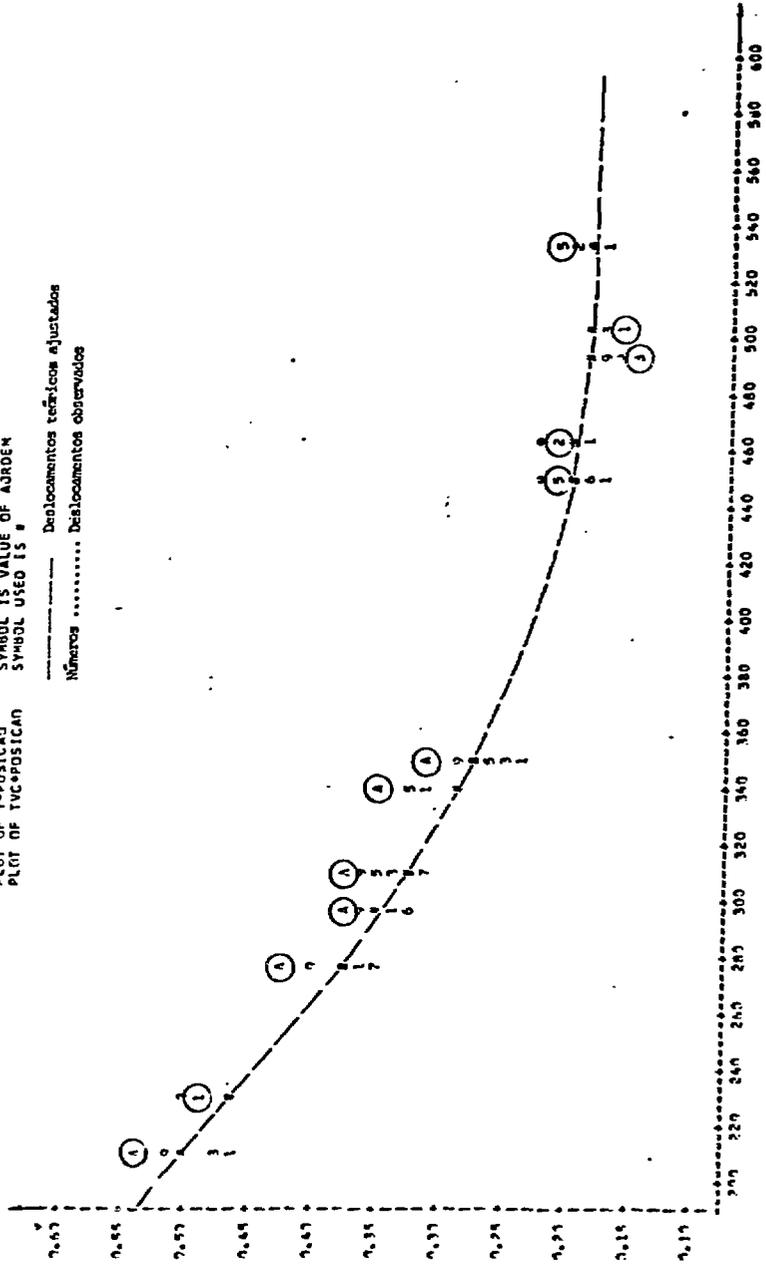


ANÁLISE DE DADOS DO MODELO DE V.P.G.P. SCMA.2 - CÉSAR VALLIN

ANÁLISE DE DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSÃO - VAL 12 - TO VERTICAIS - SEM INTERCEPTO
 COMPARAÇÃO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO FEAST - AJUSTE LINEAR PARA ORDENS=26 - PRESSÃO ATE 110

PLOT OF Y=POSICAO SYMBOL IS VALUE OF AORDEN
 PLOT OF X=TVC+POSICAO SYMBOL USED IS 9

----- Deslocamentos teóricos ajustados
 Números Deslocamentos observados



Y=FEAST
 VAL 12 - TO VERTICAIS
 SEM INTERCEPTO

FIG. 4.35. - Comparação gráfica de deslocamentos observados e teóricos ajustados.

ANALISIS DE DATOS DE MODELOS V. P. L. P. C. H. O. Z. - T. C. D. VALLIN-
 APRES VON V. OFER HINGAMATO / BELLA PUNTO - VAL. E. C. LA. COLLIER - A. L. H. INTERCEPT
 - ADJUSTED CURVE ADJUSTADA PARA RESULTADOS VITRIS - AJUSTE LINEAR PARA RESULTADOS - ADJUSTED ALL I.D
 UNIT OF ANALYSIS SYMBOL IS VALUE IN COLUMN

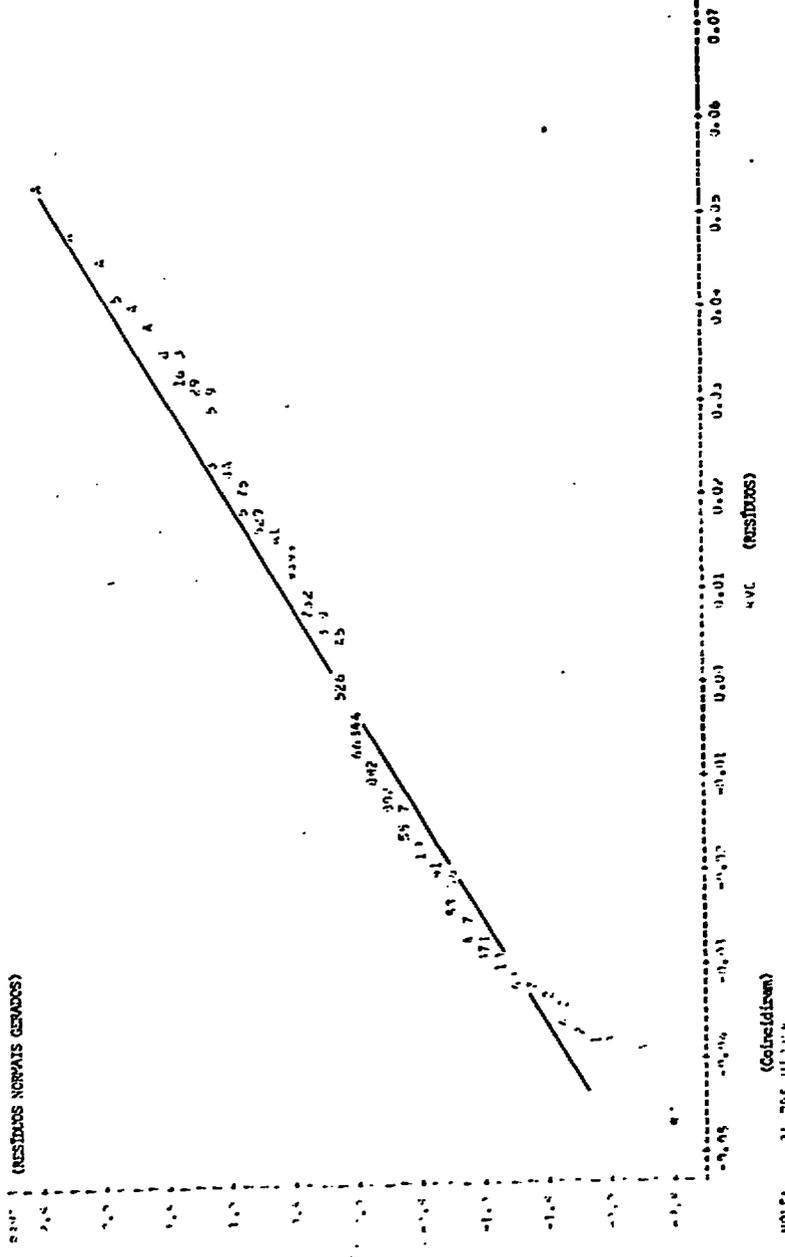


FIG. 4.36. GRÁFICO DE RESIDUOS NORMAIS GERADOS E RESIDUOS .

ANALISE DE DADOS DE MÓDULO DE V. P. C. P. S. C. H. 6. 2. - CALSO VALLEIRAS
 ANÁLISE DE DADOS DE MÓDULO DE V. P. C. P. S. C. H. 6. 2. - CALSO VALLEIRAS
 ANÁLISE DE DADOS DE MÓDULO DE V. P. C. P. S. C. H. 6. 2. - CALSO VALLEIRAS

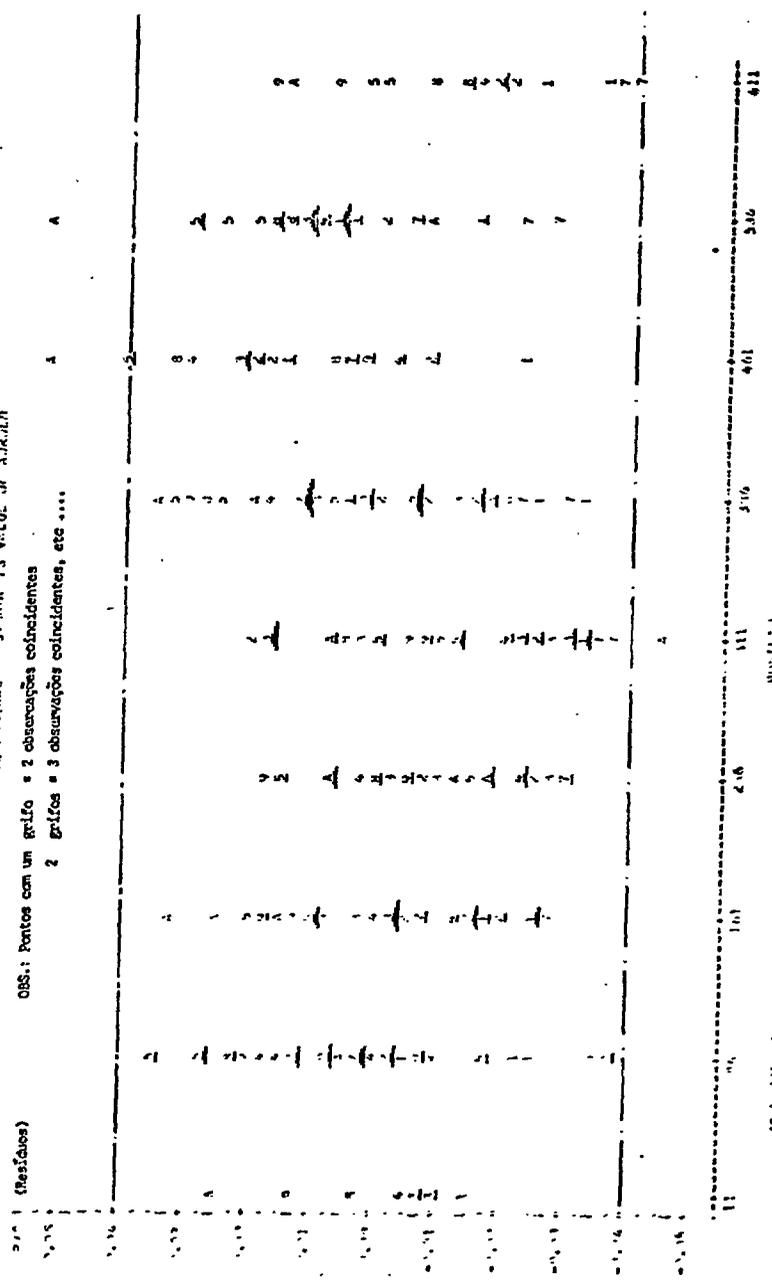


FIG. 4.37. - GRÁFICO DE RESÍDUOS E POSIÇÃO

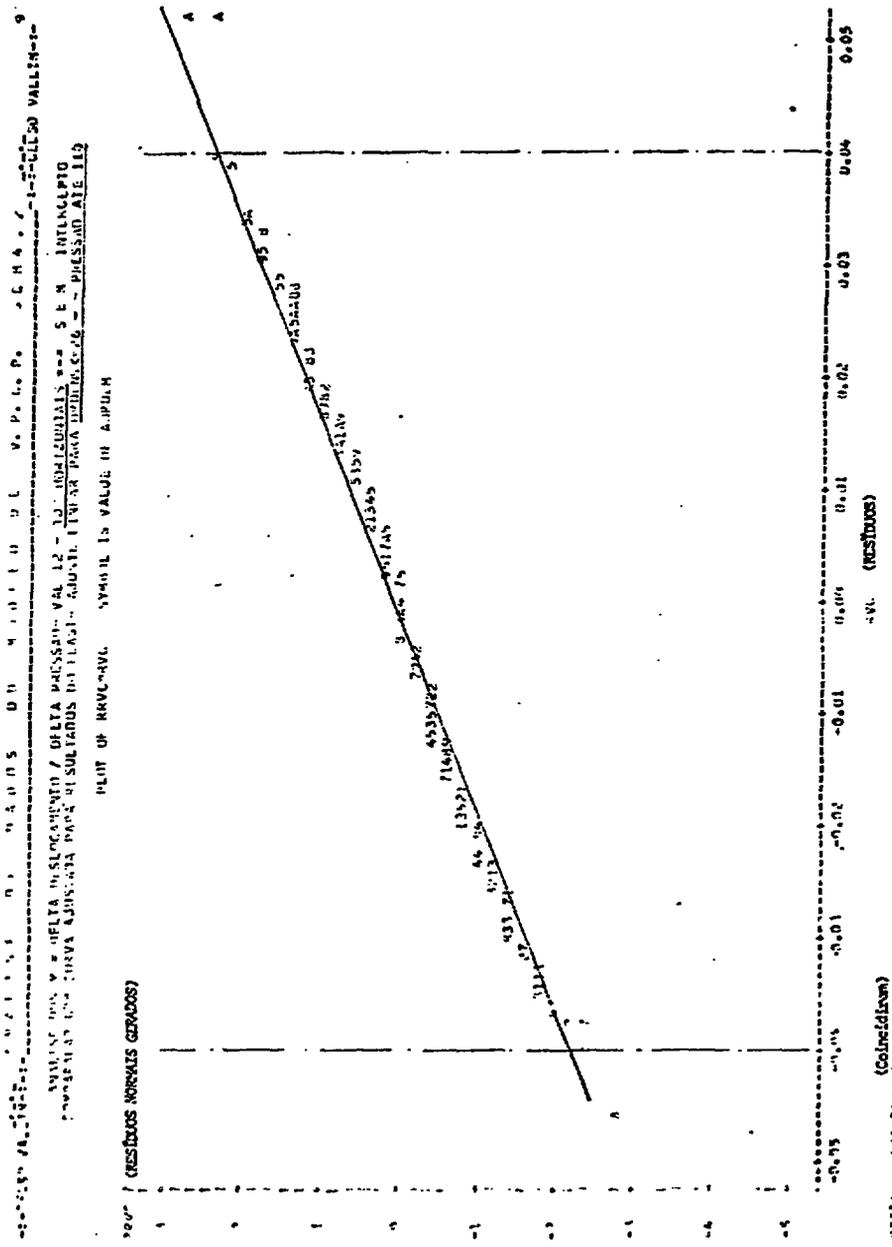
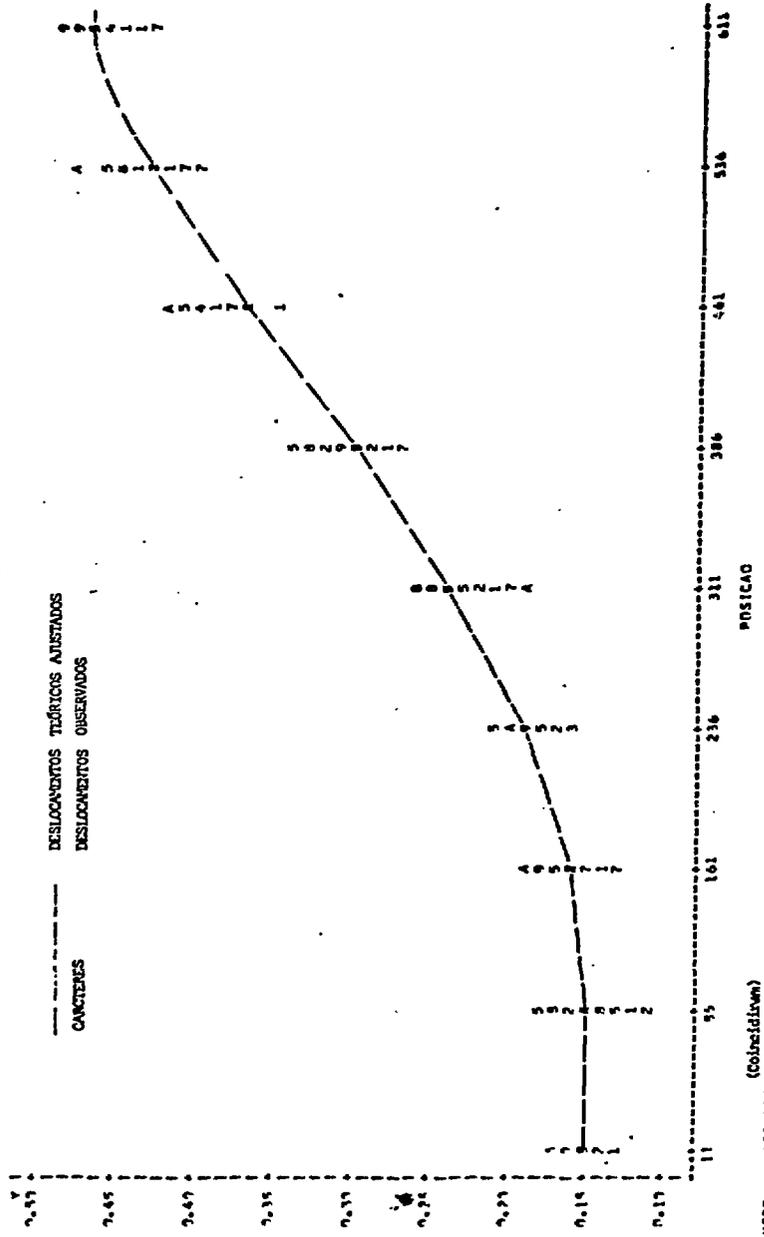


FIG. 4.38. - GRÁFICO DE RESIDUOS NORMALES GEOMÉTRICOS E RESIDUOS.

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. S. C. M. 2. CELSO VALLIN-10

ANALISE DOS Y e DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO- VAL 12 - TD HORIZONTALIS - S E M INTERCEPTO
 COMPARICA COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO FEAST- AJUSTE LINEAR PARA DIMENSÃO 26 - PRESSAO ATE 110

PLIN OF Y e POSICAO SYMBOL IS VALUE OF AUMDEN
 PLIN OF TVC e POSICAO SYMBOL USED IS #



YATES: 491 DAS HINDEN
 (Coincidem)

FIG. 4.39 - COMPARAÇÃO GRÁFICA DE DESLOCAMENTOS OBSERVADOS E TEÓRICOS AJUSTADOS

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V.P.C.P. S.C.M.4.2 - CÉSO VALLIN-5

ANALISE DOS Y = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - ID VERTICAIS - S E M INTERCEPTO
 COMPARAÇÃO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO FEAST - AJUSTE LINEAR PARA DENSIDADEZ - PRESSAO ATE 125

PLOT OF Y*POSICAO SYMBOL IS VALUE OF AORDEM
 PLOT OF YVC*POSICAO SYMBOL USED IS #

----- DESLOCAMENTOS TEÓRICOS AJUSTADOS
 - - - - - DESLOCAMENTOS OBSERVADOS

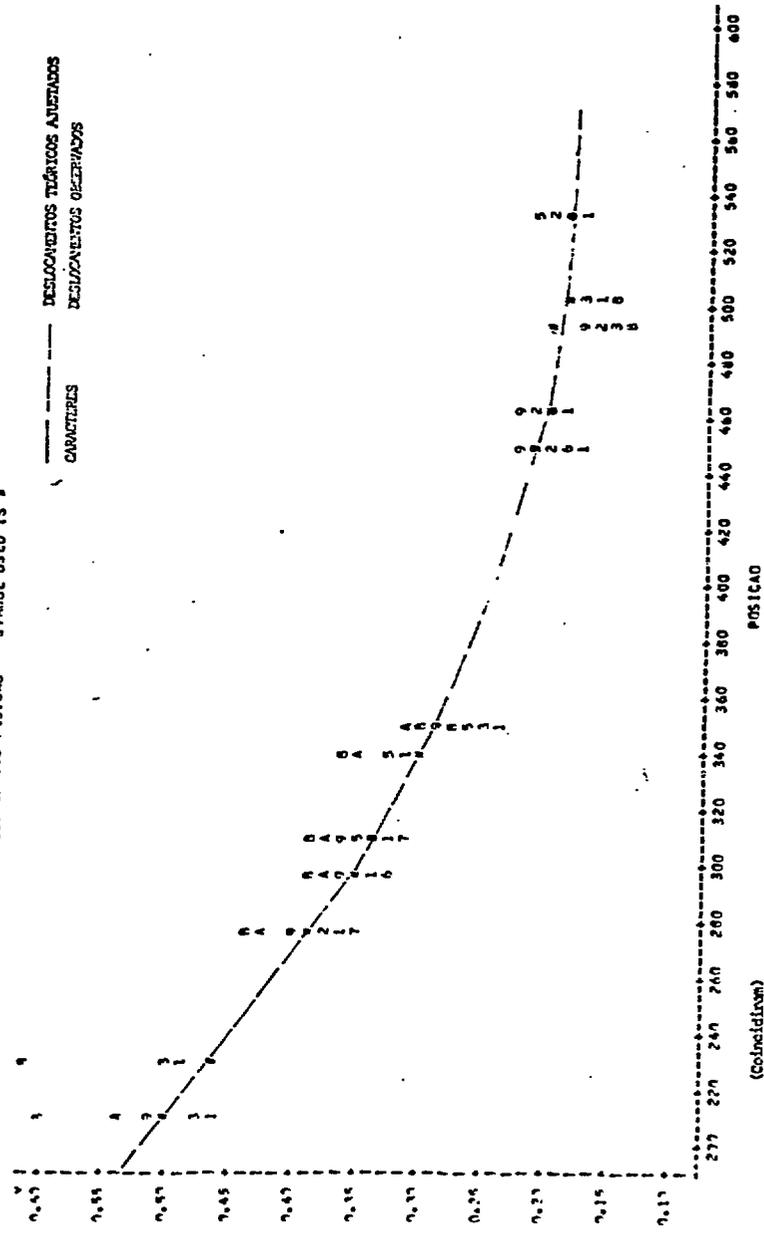
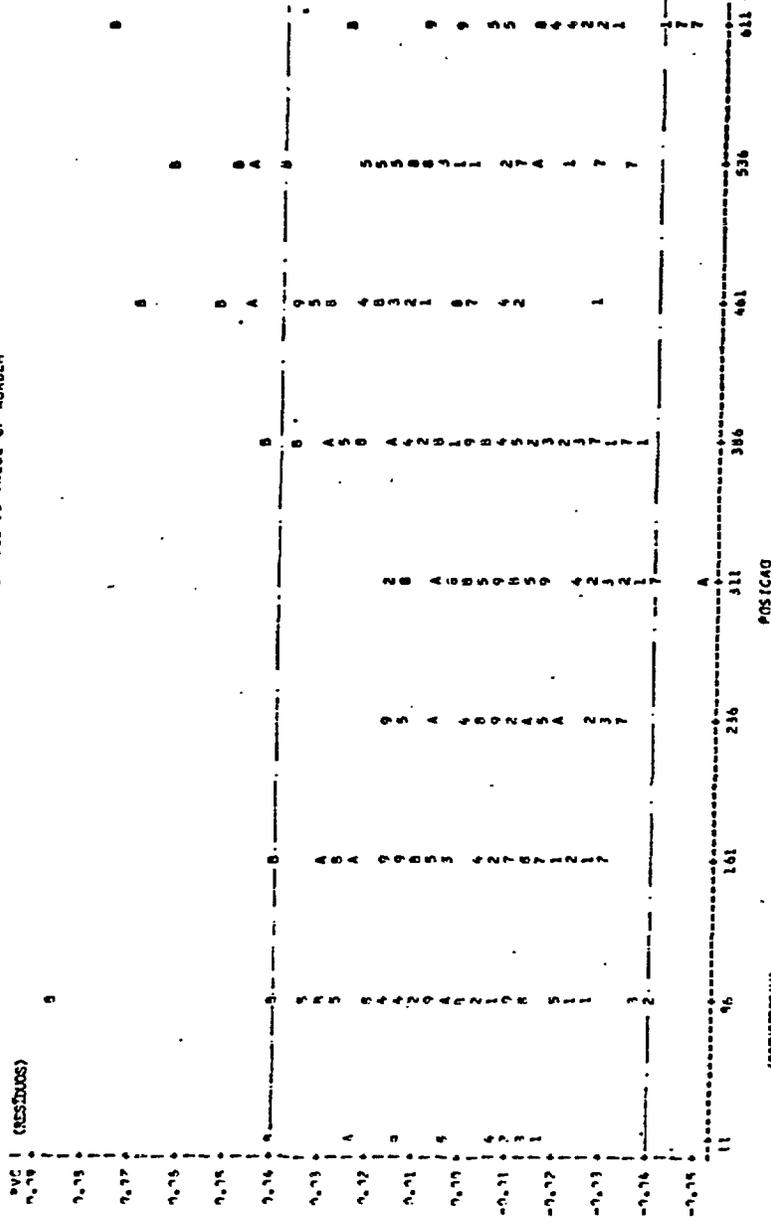


FIG. 4.42. - COMPARAÇÃO GRÁFICA DE DESLOCAMENTOS OBSERVADOS E TEÓRICOS AJUSTADOS

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V.P.C.P. SCN 4.2 - PRESSAO VALLEN-
 ANALISE DOS Y = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - ID. HORIZONTAIS - S E M INTERCEPTO
 COMPARACAO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO FEAST - AJUSTE LINEAR PARA ONDENS<27 - PRESSAO ATE 125

PLOT OF RVC#POSICAO SYMBOL IS VALUE OF AORDEM



NOTA: 128 NRS 4171197 (CONCENTRAN)
 FIG. 4.13. - GRÁFICO DE RESÍDUOS E POSIÇÃO

ANALISE DE DADOS DO MODELO DE V. P. C. P. S. C. H. 4. 2 - T. CELSO VALLIN - 9

ANALISE DOS Y = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - ID. HORIZONTAIS - P. S. E. N. INTERCEPTO
 COMPARACAO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO FEAST - AJUSTE LINEAR PARA ORDENS 0-27 - PRESSAO AIE 125

PLOT OF RAVC*RYC SYMBOL IS VALUE OF AORDEM

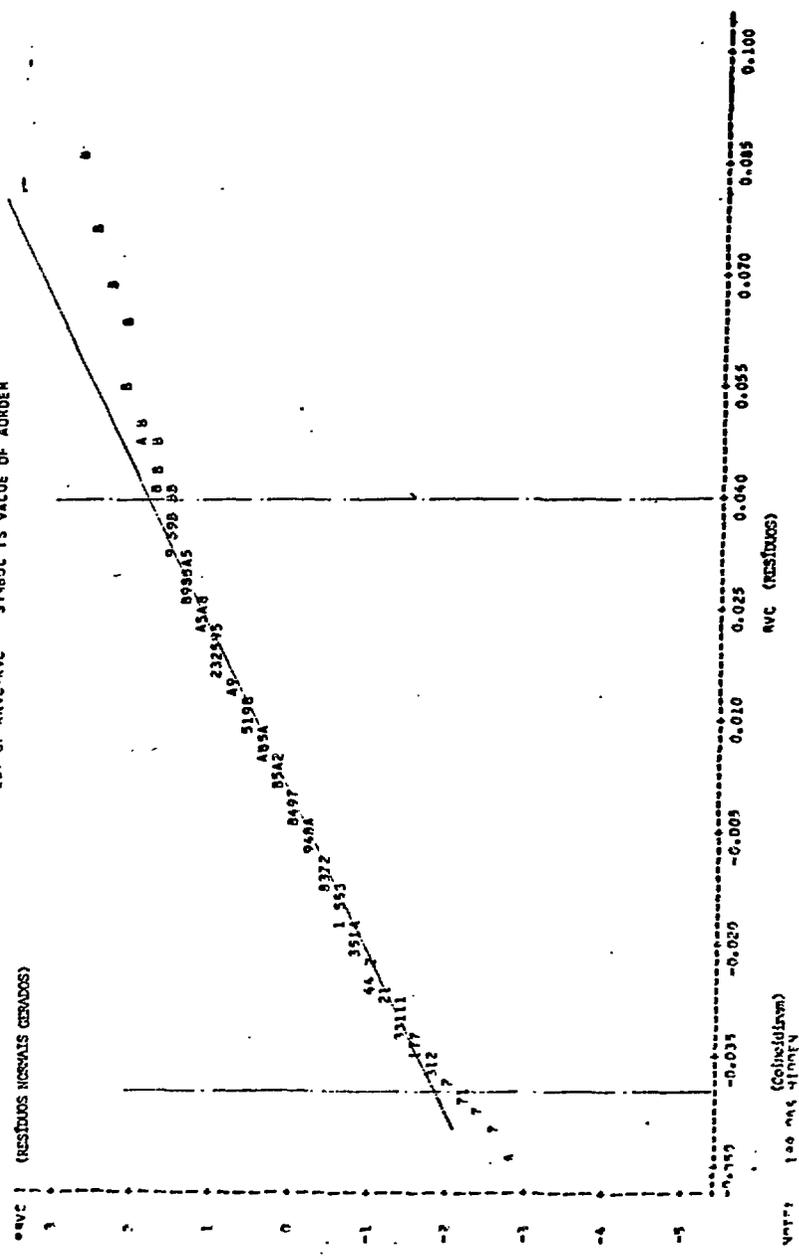


FIG. 4.14. - GRAFICO DE RESIDUOS NORMAIS CERRADOS E RESIDUOS

UNITS: 100 MAS 4110004 (Colocados em)

ANÁLISE DE DADOS DO MODELO DE V.P.C.P. SCM 4.2 - CASO VALLEM-10

ANALISE DOS Y = DELTA DESLOCAMENTO / DELTA PRESSAO - VAL 12 - ID HORIZONTALIS - S E M INTERCEPTO
 COMPARACAO COM CURVA AJUSTADA PARA RESULTADOS DO FEAST - AJUSTE LINEAR PARA ORDENS < 27 - - PRESSAO ATE 125

PLATE OF Y=DELTA/Delta P
 PLOT OF Y=DELTA/Delta P

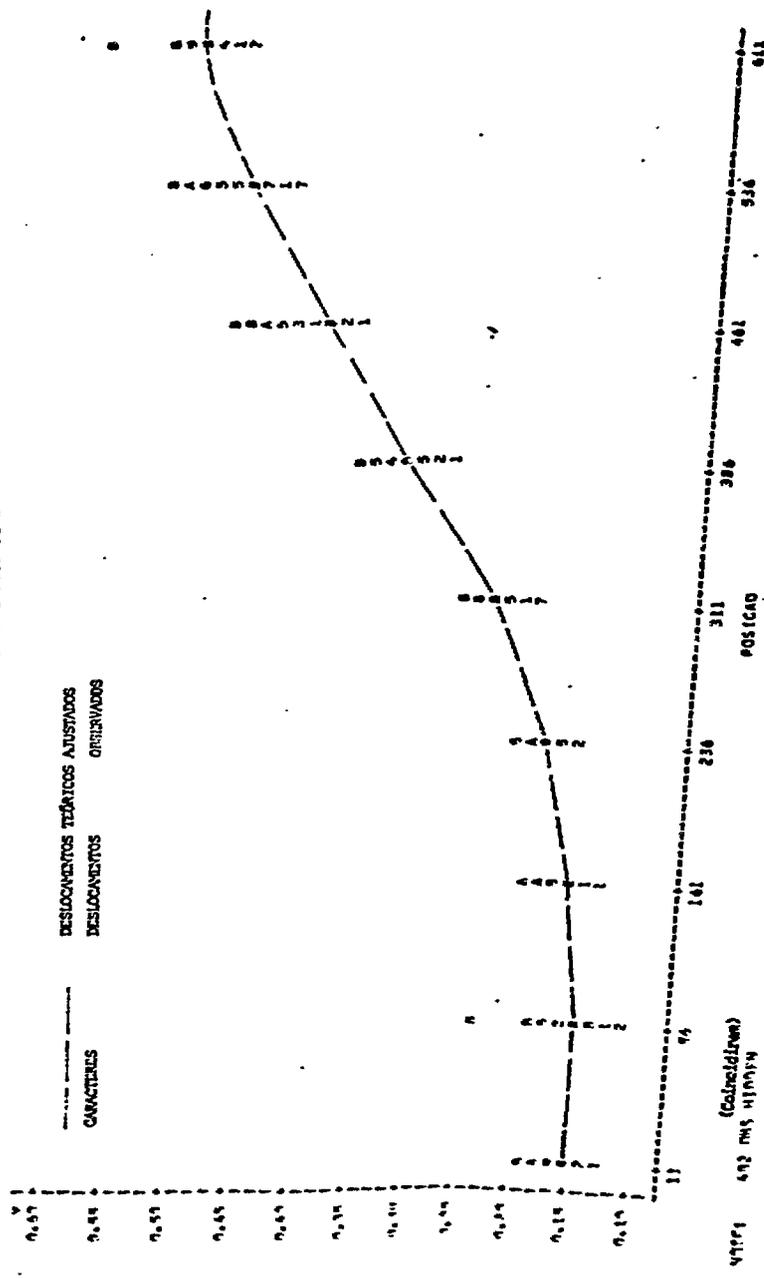


FIG. 4.15. - COMPARACAO GRAFICA DE DESLOCAMENTOS OBSERVADOS E TEORICOS AJUSTADOS.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Sugestões de Ordem Geral

Como foi concluído na introdução, para a boa utilização do urânio da natureza na geração de eletricidade, a tecnologia dos reatores regeneradores deve ser desenvolvida e deve-se procurar usar, cada vez mais, esse tipo de reator .

5.2. Ensaio de Corpos de Prova

Deve-se ensaiar corpos de prova (CP) de concreto no mesmo dia dos ensaios do modelo, evitando assim, que o CP estudado e o modelo tenham características diferentes, devido ao envelhecimento do concreto .

Além da Resistência à Compressão e do Módulo de Elasticidade, devem ser determinados para os CP, o coeficiente de Poisson e as curvas de Tensão x Deformação no carregamento e no descarregamento, para compressão axial e triaxial, a fim de que se possa estabelecer uma melhor correlação entre os resultados dos ensaios de CP e o comportamento dos modelos ou das próprias estruturas do reator .

5.3. Instalações

A temperatura ambiente deve ser mantida constante. Devem ser feitas medidas antes dos ensaios de pressurização de forma a comprovar o funcionamento dos sensores e a ausência de interferências nas medidas, devidas a variação de temperatura ou qualquer outro motivo .

Deve ser mantido o esquema de uso de um TD simetricamente oposto a outro, de forma que com a média dos dois, sejam evitadas as diferenças de medidas devidas a Movimento de Corpo Rígido .

Os sensores devem ser dispostos de maneira a cobrir, uniformemente, toda a estrutura. Deve ser evitada a predominância de TD na lateral e/ou incrementado o número desses aparelhos nas superfícies superior e inferior. Os planos onde foram colocados TD, devem formar entre si 90° , de forma também, a permitir uma distribuição uniforme dos sensores pela estrutura .

Na instalação dos TD, devem ser marcadas suas posições na própria superfície do modelo, de modo a determinar com precisão o local das medidas .

Seria ideal a utilização nos ensaios, de um gravador magnético de informações, compatível com as leitoras de fita do CPD do IPEN, acoplado ao Sistema de Aquisição de Dados. Isso facilitaria muito o tratamento dos resultados, podendo-se fazer, até, uma análise estatística entre um e outro ensaio, mediante a preparação de programas de computador para tal fim. Assim, qualquer falha constatada num ensaio, poderia ser evitada no próximo.

5.4. Metodologia de Ensaio

Os ciclos de pressurização, devem ter paradas para leituras , a intervalos de pressão pequenos e constantes (5 a 15 atm). Devem ser feitas paradas para leitura dos sensores, na despressurização, da mesma forma que na pressurização, (conforme item 4.2.2.3-C) .

Deve ser mantida a parada a 5 atm na ida e na volta, para que sirva como referência, após o acomodamento da folgas de protensão .

Toda e qualquer pressurização que o modelo sofrer, deve ser acompanhada e medida. Os primeiros ensaios devem, por precaução, alcançar valores da ordem de 70% da pressão máxima de cavidade .

Muitos ensaios devem ser feitos, dentro da fase elástica, para aumentar a confiabilidade dos resultados. Convém lembrar, que o vaso de um reator deve trabalhar na fase elástica durante toda a sua vida .

5.5. Sensores

5.5.1. "Strain Gage" (SG)

Os SG devem ser instalados com mais rigor quanto às condições de unidade, colagem e impermeabilização, na tentativa de melhorar seu índice de aproveitamento .

Deve ser tentado instalar os SG da superfície lateral do modelo, no nível do fundo das canaletas de protensão e não sobre as estrias , tentando evitar sua inutilização por trincas nas estrias .

Os SG de 60 mm, seriam os ideais para o concreto, que tem muitas fissuras, mesmo no regime elástico .

Um número grande de SG distribuídos pelo modelo, dá mais condições de avaliar o seu comportamento e assim o do modelo .

5.5.2. Outros Sensores

Os TD, apesar de terem fundo de escala exagerado (± 5 mm) comportaram-se bem. A calibração dos TD deve ser feita a intervalos pequenos (10 μ), em torno do zero, e para isso deve ser utilizado um micrômetro com precisão de 1 a 2 μ .

Alguns medidores de tensão, deveriam ser usados, embebidos no concreto, de modo a verificar a exatidão do carregamento de protensão e confirmar os programas de cálculo .

Devem ser estudadas células de carga que possam medir bem as forças de protensão vertical.

5.6. Conclusões

O modelo mostrou comportamento elástico-linear, para pressões

de até 110 atm, superando assim a Máxima Pressão de Cavidade (100 atm) como se esperava. A perda da linearidade deu-se entre as pressões de 110 e 125 atm (114 e 129 kgf/cm²). Além disso, o SCM4.2, como foi dito no item 1.6, suportou 210 atm (217 kgf/cm²) sem romper nenhum fio ou tensão da protensão e sem nenhum dano aparente, além do vazamento do liner. Suportou, portanto, a pressão prevista no segundo quesito do item 1.4.2.1-C.

Conforme os deslocamentos medidos, o modelo de VPCP, apresentou-se de 31,5% a 51,5% mais rígido do que os Corpos de Prova. Assim, pode-se dizer que apresentou um Módulo de Elasticidade entre 450 e 530 mil kgf/cm².

Os programas de cálculo FEAST e NONSAP apresentaram incoerência entre resultados dos ajustes teoria/experiência para a superfície lateral e para as superfícies horizontais. O programa PV2, não mostrou essa incoerência.

O Método de comparação estatística das respostas teórica e experimental, desenvolvido para este trabalho é bom e deve ser usado na comparação de respostas de ensaios futuros.

5.7. Sugestões de estudos futuros

Em continuidade a este trabalho, pode-se estudar a resposta dos SG bons em relação ao comportamento observado pelos TD.

Para explicação das diferenças entre cálculo e ensaio, devem ser melhor estudadas as diferenças entre o Módulo de Elasticidade dos CP e aquele apresentado pelas estruturas.

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. Jan 1, 1975.
3. 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. July 1, 1977.
4. BARR, J.A.; GOODNIGHT, J.H.; SALL, J.P. SAS user's guide. Raleigh, N.C., SAS Institute, 1979.
5. BATHE, K.J.; WILSON E.L.; IDING, R.H. NONSAP : A structural Analysis program for static and dynamics response of nonlinear systems. California University, Berkeley (USA), Feb. 1974. (UCSESM 74.3).
6. BIRKNER, D.L.; LANKARD, D.R.; FONDRIEST, F.F.; SWOPE, M.J. Heat resistant concrete for PCRV reactor. Battelle Memorial Institute, Jan 69. (EHI-1855) (EURAEC-2084).
7. CALLAHAN, J.P.; CORUM, J.M.; CANONICO, D.A.; DODGE, W.G.; RICHARDSON, M.; ROBINSON, G.C.; WHITMAN, G.D. PCRV thermal cylinder model study. Oak Ridge, Tenn.; Oak Ridge National Laboratory, June 1977. (ORNL/TM 5613).
8. CORNELL, D.C. Safe-2D: a computer program for stress analysis of plane and axisymmetric composite structure. A user's manual. San Diego, CA, General Atomic Company, Feb. 1969. (GA-9076).
9. COSTA, J.R. Curso de introdução ao estudo dos ciclos de combustível. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1972. (IEA- Inf. - 20).

10. 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) .
11. DORNER, H. & GUHL, H. PCRIV for 100 atm. internal pressure. Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1966. (ORNL-tr-1568) .
12. EL-WAKIL, M.M. Nuclear energy conversion. Sem local, Intext, 1971.
13. FANNING, D.N. Analytical investigation of a multicavity PCRIV for elastic loading conditions. Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory Sep. 1978. (ORNL/TM-6099) .
14. FAURE, R. KOPRINA, M.; JACCOUD J.P. Tests on Model of a prestressed concrete nuclear pressure vessel with multiple cavities. In : JAEGER, T.A., editor & BOLEY, B.A., editor. Structural mechanics in reactor technology : transactions of the 4th international conference on ... held in San Francisco, Calif. 15-19 September, 1977, v.H Structural engineering of prestressed reactor pressure vessels. Amsterdam, 1977, H.4/2 .
15. FOUNDRIEST, F.F. & SNYDER, M.Y. Heat resistant concrete for PCRIV reactor : quarterly progress report. Batelle Memorial Institute, Sep. 1966. (BML-X-10180) .
16. GENERAL ATOMIC. Information Package for PCRIV model test program GCFR 300 MW(e) Demonstration Plant. San Diego, CA, GCFR Component Engineering Branch, 31 Oct 73. (GCFR-731031-01) .
17. GENERAL ATOMIC. Prestressed concrete reactor vessel model 1. San Diego, Calif., Oct. 1966 (GA-7097) .
18. GENERAL ATOMIC. Prestressed concrete reactor vessel model 2. San Diego, Calif., Nov. 1966. (GA-7150) .
19. 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) .

20. HORNBY, I.W.; VERDON, G.F.; WONG, Y.C. Testing the Oldbury vessel model. In: THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, London. Prestressed concrete pressure vessels, conference on ... held at Church House, Westminster, SW1, 13-17 March, 1967. London, 1968 .
21. HOUGHTON, B.A. The design and construction of PCPV with particular reference to Oldbury Nuclear Power Station. In: UNITED NATIONS. Peaceful uses of atomic energy, proceedings of a 3th international conference on ... held in Geneva, 31 Aug. 9 Sep., 1964. New York, N.Y., 1965. p. 433-445 .
22. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR. Manual de Utilização do PV2MRD. São Paulo, 1979 .
23. LAMARSH, J.R. Introduction to nuclear reactors theory. 2 ed New York, Addison-Wesley, 1972
24. LOCKETT, G.E. & KINHEAD, A.N. PV for helium high-temperature reactors. In: THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, London. Prestressed concrete pressure vessels, conference on ... , held at Church House, Westminster, SW1, 13-17 March, 1967. London, 1968 .
25. 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 vessel 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) .
26. MEGY, J. Role passe et present des reacteurs rapides. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Design, construction and operating experience of demonstration LMFR, proceedings of a symposium on ... , held in Bologna, 10-14 April 1978. Vienna, 1978. 115-34 .
27. NAGAMATI, M.; DAVIDSON, I., MATTAR NETO, M.; MEYLAN, D.M.; VALLIN, C. Projeto, Construção e Ensaios de Modelos de vasos de pressão de concreto pretendido. São Paulo, 1980 .

28. NAUS, D.J.; HURTT C.C. Performance of Selected concrete embedment strain meters under normal and environmental conditions. Outubro, 1978. (ORNL/TM-6191/V2) .
29. NEVILLE, A.M. Properties of Concrete. London. Pitman, 1972 .
30. NUCLEAR power and the environment: questions and answers. Hinsdale, Ill., American Nuclear Society, 1976. p.68 .
31. SEABORG, G.T. & BLOON, J.L. Fast breeder reactors. Sci. Am., 223 (5): 13-21, Nov. 1970 .
==
32. SOKOLNIKOFF, I.S. Mathematical Theory of elasticity. 2. ed. New York, N.Y., Mc-Graw-Hill, 1956 .
33. TAMURA, M. Aplicação dos Métodos de relaxação dinâmica e elementos finitos na análise estrutural de um modelo reduzido de vaso de pressão de concreto protendido. São Paulo, 1979. (Dissertação de Mestrado, Insituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) .
34. TIMONSHENKO, S.P. & GOODIER, J.N. Teoria da Elasticidade. 3a. Ed. Rio de Janeiro, Guanabara, Dois, 1980 .
35. WILSON, E.L. Progran FEAST1-65, user's manual. Cambridge (USA), Massachusetts Institute of Technology, 1966 .
36. WIRTZ, K, Lectures on fast breeder reactors. Karlsruhe, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, 1973 .
37. WORLD List of nuclear power plants. Nucl. News, 23 (10):89-96, Aug. 1980 .
==
38. ZIENKIEWICZ, O.C. The finite element method. London, MacGraw-Hill, 1977 .