

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR / SÃO PAULO
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS NO ESTUDO DE EFEITOS
DE IRRADIAÇÃO EM CIMENTO PORTLAND COMUM
DE FABRICAÇÃO NACIONAL**

MANOEL HENRIQUE CINTRA GABARRA

Dissertação apresentada à Comissão Nacional de Energia Nuclear/São Paulo - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre na Área Concentração em Reactores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Georgi Lucki

**São Paulo
1983**

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR / SÃO PAULO
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS NO ESTUDO DE EFEITOS
DE IRRADIAÇÃO EM CIMENTO PORTLAND COMUM
DE FABRICAÇÃO NACIONAL

Manoel Henrique Cintra Gabarra

Dissertação apresentada à Comissão Nacional de Energia Nuclear/São Paulo – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre na área de Concentração em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Georgi Lucki



SÃO PAULO – BRASIL
1983

À MEUS PAIS

AGRADECIMENTOS

- Ao Dr. Georgi Lucki, pela orientação, estímulo e compreensão.
- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, que possibilitou a realização deste trabalho.
- Ao Dr. José Antônio Díaz Diegues, pelo apoio indispensável à concretização do trabalho.
- Aos colegas do, "CARREI", "REATOR", "CPRD", "CPD", "CEN" e "IPT", pela valiosa colaboração prestada.
- Às bibliotecas do IPEN, IPT, ABCP e EPUSP.
- À Lourdes, que datilografou o manuscrito.
- À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

TÍTULO: Aplicação de Técnicas Ultra-sônicas no Estudo de Efeitos de Irradiação em Cimento Portland Comum de Fabricação Nacional.

NOME: MANOEL HENRIQUE CINTRA GABARRA

RESUMO

O presente trabalho estuda os Efeitos de Irradiação com neutrons rápidos ($E = 1 \text{ MeV}$) em amostras de cimento Portland utilizando as técnicas ultra-sônicas de Frequência de Resonância e Velocidade de Pulso. Um programa de ENSAIOS sob forma de matriz 6×5 foi desenvolvido com objetivo de se avaliar a influência da umidade, temperatura e irradiação sobre as amostras. As irradiações foram realizadas no caroço do reator de pesquisas IEA-R1 com fluxo instantâneo da ordem de $5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ na temperatura de 170°C devida ao aquecimento gama. Os resultados obtidos mostram que para o fluxo integrado ao qual foram submetidas as amostras ($\sim 10^{17} \text{ nvt}$), os efeitos da temperatura são maiores que os da irradiação. Estudos específicos quanto à aparelhagem, ativação das amostras, dispositivos de segurança e efeitos de temperatura no cimento são apresentados nos apêndices.

TITLE: The Use of Ultrasonic Techniques for the Study of Irradiation Effects on Portland Cement of Local Production.

NAME: MANOEL HENRIQUE CINTRA GABARRA

ABSTRACT

In this work the effects of fast neutron irradiation ($E = 1 \text{ MeV}$) on portland cement samples using the ultrasonic techniques of Resonance Frequency and Pulse Velocity are studied. A testing program within a matricial 6×5 framework was developed to estimate the influence of humidity, temperature and irradiation on the samples. The sample irradiation was performed inside IEA-R1 reactor core at gamma heating temperature of 170°C and instant flux of $5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$. For integrated flux $\phi = 10^{17} \text{ nvt}$, the results show no significant influence of irradiation when compared with the influence of temperature. Specific studies regarding the instrumentation, sample activation, safety devices and temperature effects on cement are presented in the appendixes.

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO

	Pag.
1.1. <u>EFEITOS DE IRRADIAÇÃO</u>	
1.1.1. Vaso de Pressão de Concreto Protendido	1
1.1.2. Absorção da Radiação no Concreto.....	3
1.1.3. Danos de Radiação em Materiais.....	6
1.1.4. Objetivos do Trabalho	8
1.2. <u>QUÍMICA DO CIMENTO</u>	
1.2.1. Principais Componentes.....	11
1.2.2. Estrutura Química Cristalina.....	14
1.2.3. Micro Estrutura da Pasta.....	15
1.3. <u>TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS</u>	
1.3.1. Características Fundamentais.....	18
1.3.2. Relações Básicas	20
1.3.3. Técnicas de Frequência de Ressonância.....	21
1.3.4. Técnicas de Propagação de Pulso	23
1.3.5. Propriedades Dinâmicas.....	25

II - DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1. PREPARO DOS CORPOS DE PROVA (AMOSTRAS)

2.1.1. Cimento Utilizado.....	27
2.1.2. Moldagem e Cura das Amostras.....	28
2.1.3. Representatividade dos Lotes	29

2.2.	<u>MONTAGEM UTILIZADA NOS ENSAIOS</u>	
2.2.1.	Descrição da Aparelhagem	31
2.2.2.	Testes de Reprodutibilidade.....	32
2.2.3.	Sistemas de Segurança.....	32
2.3.	<u>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO</u>	
2.3.1.	Descrição do Ensaio.....	32
2.3.2.	Programa de Ensaios.....	36
2.3.3.	Tabela de Resultados.....	39
2.4.	<u>DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO</u>	
2.4.1.	Descrição dos Elementos.....	41
2.4.2.	Instalação das Amostras no Dispositivo.....	45
2.4.3.	Posicionamento das Amostras no Carço.....	47
2.5.	<u>IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS</u>	
2.5.1.	Tempo de Irradiação.....	50
2.5.2.	Irradiação das Amostras.....	51
2.5.3.	Temperatura de Irradiação	51

III - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1.	<u>CÁLCULO DOS RESULTADOS</u>	
3.1.1.	Entrada de Dados.....	52
3.1.2.	Operações.....	52
3.1.3.	Tabela de Resultados.....	53

3.2.	<u>DIAGRAMAS DE COMPORTAMENTO</u>	53
3.2.1.	Médias e Desvio Padrão.....	54
3.2.2.	Superposição dos TIPOS	54
3.2.3.	Características Interdependentes.....	54
3.2.4.	Superposição de Características Interdependentes	54
3.2.5.	Dados Emparelhados.....	55
3.2.6.	Convenção de Traços Empregada.....	55
3.3.	<u>ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE ERRO</u>	55
3.4.	<u>INFLUENCIA DA DOSE ATINGIDA</u>	56
IV -	<u>INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS</u>	
4.1.	<u>DADOS EMPARELHADOS</u>	
4.1.1.	Frequência de Ressonância.....	60
4.1.2.	Velocidade de Pulso.....	62
4.2.	<u>DADOS NÃO EMPARELHADOS</u>	
4.2.1.	Volume	64
4.2.2.	Porcentagem de Água Evaporada	66
4.2.3.	Peso Específico	69
4.2.4.	Frequência de Ressonância.....	72
4.2.5.	Velocidade de Pulso	74
4.2.6.	Relação entre Velocidade de Pul so e Peso específico	77

4.2.7.	Relação entre Frequência de Ressonância Medida e Frequência de Ressonância Calculada	79
4.2.8.	Correlação entre Velocidade de Pulso e Peso Específico	81
4.2.9.	Correlação entre Frequência de Ressonância e Peso Específico.....	83
4.2.10.	Correlação entre Frequência de Ressonância e Velocidade de Pulso.....	83
4.2.11.	Módulo de elasticidade Dinâmico	86
V - <u>CONCLUSÃO E SUGESTÕES</u>		
5.1.	<u>EFEITOS DE IRRADIAÇÃO</u>	89
5.2.	<u>TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS</u>	
5.2.1.	Técnica de Frequência de Ressonância.....	90
5.2.2.	Técnica de Velocidade de Pulso.....	90
5.3.	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</u>	
5.3.1.	Objetivos Propostos.....	91
5.3.2.	Sugestões para Futuros Trabalhos	92

6 - <u>APÊNDICE</u>	pag.
1. Ensaio Preliminares	95
2. Irradiação Protótipo	111
3. Sistemas de Segurança	122
4. Efeitos Térmicos	137
5. Cálculo de Propagação de Erro	144
6. Programa de Irradiação e ENSAIOS	150
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	154

NOTAÇÃO

C_1	-	- Cimento armazenado em sacos de papel
C_2	-	- Cimento armazenado em sacos plásticos
d	:	Diâmetro da amostra de cimento (mm)
E	:	ENSAIO em cada etapa do programa - ($E_{1,2,3,4,5,6}$)
E_d	:	Módulo de elasticidade dinâmico
F_i	:	Fluxo de neutrons instantâneo (n/cm^2)
FI	:	Fluxo de neutrons integrado (nvt)
FR	:	Frequência fundamental de ressonância (KHz)
ΔFR	:	Variação de FR entre E_1 e E_6 (KHz)

FRo : Frequência de ressonância medida
 FRe : Frequência de ressonância calculada
 h : Altura ou comprimento da amostra (mm)
 ℓ : Comprimento ou altura da amostra (mm)
 L : Lote de 10 amostras ($L_{1,2,3,4,5,6}$)
 n,ns: Neutron, neutrons
 P : Peso da amostra - (gf)
 Pe : Peso específico da amostra (gf/cm^3)
 ΔPe : Variação do Pe entre E_1 e E_6
 PL : Precisão de leitura
 PR : Período de onda na FR
 S : Desvio padrão
 \bar{S} : Desvio padrão médio
 Sv : Sievert - (unidade de dose = 0,1mlirens)
 t : Tempo
 ttr : Tempo de trânsito do pulso ultra-sô-
 nico na amostra de cimento (μs)
 Δttr : Variação do ttr em cada amostra en-
 tre E_1 e E_6
 T : TIPO de procedimento com amostras de
 cimento ($T_{1,2,3,4,5}$)
 us : Micro-segundos (10^{-6}s)
 V : Volume das amostras de cimento (cm^3)

Vp : Velocidade do pulso ultra-sônico
nas amostras de cimento (Km/s)

ΔVp : Variação da Vp entre E_1 e E_6

VPCP: Vaso de pressão de concreto pro-
tendido

Ensaio: cada teste em particular realizado em uma amostra.

ENSAIO: conjunto de todos os testes realizado em um lote de 10
amostras

OBS.: todas as dimensões indicadas neste trabalho são dadas
em milímetros, exceto indicação em contrário.

TABELAS

	pag.
1.1 : Efeitos de doses variáveis de irradiação em concreto de vasos de pressão	10
4.1 : Redução da frequência de ressonância entre E_1 e E_6	60
4.2 : Redução da velocidade de pulso entre E_1 e E_6	62
4.3 : Variação de volume das amostras de cimento	64
4.4 : Variação da porcentagem de água evaporada nas amostras de cimento	66
4.5 : Porcentagem de água evaporada nas amostras de cimento no ENSAIO 4	67
4.6 : Variação de peso específico das amostras de cimento	69
4.7 : Peso específico no ENSAIO 4	70
4.8 : Variação da frequência de ressonância nas amostras de cimento	72
4.9 : Variação da velocidade de pulso nas amostras de cimento	75
4.10 : Relação entre F_{Ro} e F_{Re}	79
4.11 : Variação do módulo de elasticidade dinâmico nas amostras de cimento	86

	pag.
A2.1 : Prováveis elementos ativados no cimento estudado.....	120
A3.1 : Limites de dose recomendados pela ICRP.....	125
A6.1 : Intervalo de tempo entre os ENSAIOS em cada lote	152

FIGURAS

1.1 : Vaso de pressão de concreto protendido de um reator refrigerado a gás (GCFR) de 300MWe,(14) pag. 495.....	2
1.2 : Atenuação da radiação no concreto de vaso de pressão,(17) pag. 264.....	5
1.3 : Colisão em cascata,(26) pag. 25	7
1.4 : Átomo intersticial,(27) pag. 40	7
1.5 : Concentração de defeitos,(27) pag. 57	8
a) Intersticiais	
b) Lacunas	
1.6 : Modelo de estrutura do cimento Hidratado segundo W. Richartz e F.W. Locher , (33) pag. 191.	15
1.7 : Hidratação e desenvolvimento da micro-estrutura na pasta de cimento,(38) pag.35	17

1.8	: Modelo de estrutura do gel de cimento, (38) pag. 49	17
1.9	: Ondas mecânicas em um sólido,(49)pag.12	18
	a) Longitudinal	
	b) Transversal	
	c) Superfície	
1.10	: Relações de Rayleigh	20
1.11	: Técnica de frequência de ressonância- - posicionamento dos transdutores, (51) pag. 7	22
1.12	: Amplitude de vibração na amostra na frequência de ressonância fundamental e primeiros harmônicos ,(44) pag. 20	23
1.13	: Técnicas de propagação de pulso	24
1.14	: Tempo de trânsito do pulso ultra- sô- nico	24
1.15	: Estimativa da frequência de ressonân- cia a partir do tempo de trânsito do pulso ultra-sônico	25
2.1	: Armazenagem do cimento.....	27
	C ₁ : saco de papel (tipo supermercado)	
	C ₂ : : saco plástico e sílica gel	
2.2	: Molde de aço e câmara saturada	28
2.3	: Influência das condições de umidade de cura na resistência mecânica da pasta, (37) pag. 197	30

2.4	: Montagem utilizada nos ensaios de ultra-som	31
2.5	: Medida de dimensões da amostra	33
	a) Altura	
	b) Diâmetro	
2.6	: Ensaio de ressonância: fixação do transdutor e bloco deslizando	34
2.7	: Ensaio de velocidade de pulso	35
2.8	: Corpo de prova padrão	35
2.9	: Programa de ensaios	38
2.10	: Tabela de anotação de medidas e resul- tados	40
2.11	: Dispositivo de irradiação	42
	a) Tubo de irradiação	
	b) Tubo flexível	
	c) Tubo suporte	
2.12	: Tubo de irradiação	43
2.13	: Tubo Flexível	44
2.14	: Instalação das amostras no dispositivo	46
2.15	: Mapa do caroço - posição de irradiação	47
2.16	: Posição das amostras no caroço	48
2.17	: Fluxo instantâneo médio em cada amos- tra	49
3.1	: Fluxo integrado térmico nas amostras irradiadas	57

3.2	: Variação do peso específico nas amostras irradiadas	58
3.3	: Variação da velocidade de pulso nas amostras irradiadas	59
4.1	: Redução da frequência de ressonância das amostras entre E_1 e E_6	61
4.2	: Redução da velocidade de pulso das amostras entre E_1 e E_6	63
4.3	: Variação de volume das amostras de cimento	65
4.4	: Porcentagem de água evaporada nas amostras de cimento	68
4.5	: Comportamento do peso específico das amostras de cimento	71
4.6	: Comportamento da frequência de ressonância das amostras de cimento	73
4.7	: Comportamento da velocidade de pulso das amostras de cimento	76
4.8	: Relação entre velocidade de pulso e peso específico das amostras de cimento	78
4.9	: Relação entre frequência de ressonância medida e frequência de ressonância calculada	80

4.10	: Correlação entre velocidade de pulso e peso específico	82
4.11	: Correlação entre frequência de res- sonância e peso específico	84
4.12	: Correlação entre frequência de resso- nância e velocidade de pulso	85
4.13	: Comportamento do módulo de elastici- dade dinâmico das amostras de cimento	88
A1.1	: Líquido de acoplamento entre transdu- tor e amostra	98
A1.2	: Influência da umidade na estabilidade da F R	101
A1.3	: Influência da umidade na reprodutibi- lidade da F R	103
A1.4	: Influência do comprimento da amostra na F R	104
A1.5	: Incerteza de leitura no teste de velo- cidade de pulso	106
A1.6	: Influência da redução de comprimento na F R e V p	108
A1.7	: Condição de umidade das amostras nos ensaios	110

A2.1 : Decaimento da radiação em cimento at <u>i</u> vado	116
a) $\beta + \gamma$	117
b) γ	117
A2.2 : Influência da variação do fluxo inte- grado na ativação das amostras	118
A2.3 : Espectro de emissão radioativa do ci- mento estudado	119
A3.1 : Pinças de alumínio	126
A3.2 : Atenuação da radiação no ar	127
A3.3 : Atenuação da radiação β em luvas de borracha antiderrapante	128
A3.4 : Nível de dose na operação de troca de tubos	129
A3.5 : Transferência das amostras para caste <u>l</u> lo de chumbo	130
A3.6 : Castelo de chumbo	131
A3.7 : Transporte dos castelos de chumbo	130
A3.8 : Medida das dimensões de amostras irra <u>d</u> diadas	132
A3.9 : Pesagem das amostras irradiadas	133
A3.10: Ensaio de ressonância - proteção con- tra contaminação	133
A3.11: Ensaio de velocidade de pulso em a- mostras irra <u>d</u> diadas	134

A3.12: Disposição dos aparelhos na montagem utilizada nos ensaios	135
A3.13: Secagem de amostras irradiadas	135
A4.1 : Curvas de temperatura das amostras du rante a irradiação	140
a) início de operação do reator	
b) término de operação do reator	
A6.1 : Intervalo entre os ciclos de irradiação.	153

1 - INTRODUÇÃO

1.1. EFEITOS DE IRRADIAÇÃO

1.1.1. Vaso de Pressão de Concreto Protendido

O projeto e construção de uma central nuclear envolve a participação coordenada de setores diversos. Um extensivo programa de pesquisas e desenvolvimento é executado considerando os problemas particulares de cada aspecto do projeto, (2,4, 14,20).

Em determinados tipos de reatores, particularmente os refrigerados a gás, o concreto protendido tem sido apontado como solução ótima para estrutura do Vaso de pressão (VPCP) - (FIGURA 1.1), (5,6,9,10,11,28).

Nos projetos atuais, um sistema de reflexão e absorção de neutrons limita a dose absorvida pelas paredes internas do VPCP a um valor entre 10^{19} e 10^{20} nvt (neutrons rápidos) para a qual os efeitos de irradiação são esperados serem desprezíveis, (15,21,25).

A dose real e o espectro de energia de irradiação variam entre os tipos de reatores e os diversos projetos de um mesmo tipo. Por exemplo, um A.G.R. (Advanced Gas Reactor) operando a um fator de carga 85% durante 30 anos (21):

NEUTRONS RÁPIDOS	- $2,3 \times 10^{18}$ nvt (>1 MeV)
NEUTRONS TÉRMICOS	- $6,0 \times 10^{19}$ nvt
RAIOS GAMA	- 10^{11} Rads

Dispositivos de blindagem térmica e refrigeração, além de evitarem perdas térmicas no caroço, mantêm a superfície interna do VPCP a uma temperatura máxima em torno de 70°C , limi

tando assim o gradiente de temperatura na massa de concreto, (1, 3,13,17,19,20).

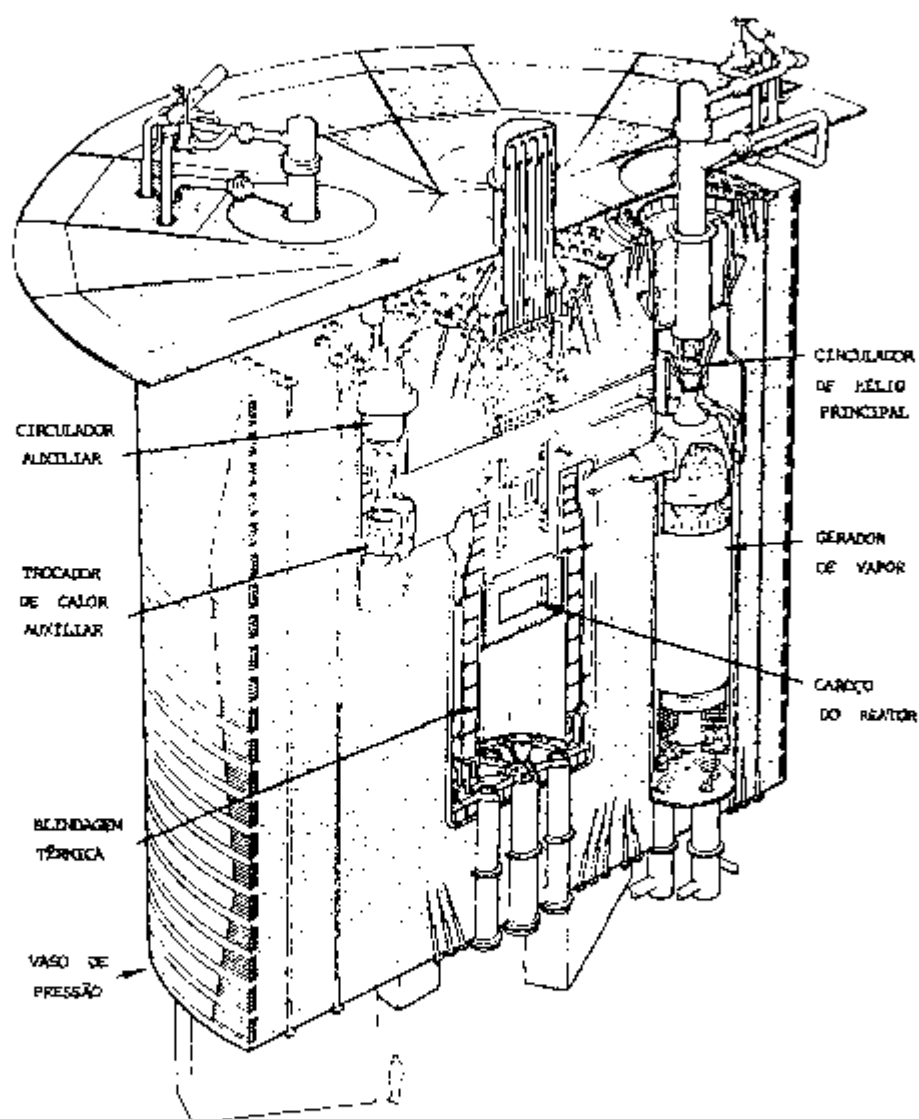


FIGURA 1.1 - Vaso de Pressão de Concreto Protendido de um Reator Rápido Refrigerado a Gás (GCFR) de 300 MWe.

Nestas condições, os efeitos de doses de irradiação no concreto devem ser melhor compreendidos. Pode-se postular "a priori" uma redução de resistência mecânica a partir de determinada dose em vista do efeito semelhante observado em outros materiais. Doses limites devem ser estabelecidas considerando o concreto particular empregado e a redução de resistência localizada aceitável na estrutura em questão, (7,8,18,21,22,23,24).

1.1.2. Absorção da Radiação no Concreto

Os neutrons rápidos e intermediários que atingem a massa de concreto são atenuados principalmente pelo hidrogênio, presente na água de hidratação e água livre no cimento e agregados e, então, absorvidos juntamente com os neutrons térmicos emitindo raios gama secundários, (29,30,31).

A interação dos neutrons com o núcleo dos átomos pode ocorrer em uma ou mais das seguintes formas:

- ESPALHAMENTO ELÁSTICO (n,n): ocorre apenas transferência de energia cinética entre o neutron e o núcleo.

- ESPALHAMENTO INELÁSTICO (n,n'): semelhante ao caso anterior. O núcleo é deixado em estado excitado e decai emitindo raios gama (INELASTIC γ RAYS).

- CAPTURA RADIOATIVA: o neutron é capturado pelo núcleo, que emite um ou mais raios gama de captura (CAPTURE γ RAYS).

- REAÇÕES DE PARTÍCULAS CARREGADAS: neutrons podem desaparecer como resultado de reações de absorção do tipo (n, α) e (n,p).

- REAÇÕES DE PRODUÇÃO DE NEUTRONS: são reações do tipo (n,2n) e (n,3n) que ocorrem com neutrons energéticos.

- FISSÃO: o neutron, colidindo com certos núcleos , pode provocar a divisão deste em duas ou mais partes formando novos elementos.

Os raios gama provenientes do caroço, juntamente com os raios gama secundários, interagem com a matéria sob diversas maneiras; contudo somente três processos devem ser considerados em problemas de engenharia nuclear, (29,30,31):

- EFEITO FOTOELÉTRICO: os raios gama incidentes interagem com a totalidade do átomo e um dos elétrons é ejetado com energia igual a do fóton incidente menos a energia de ligação do elétron.

- PRODUÇÃO DE PARES: o fóton incidente é transformado em pósitron e nêgatron (e^+ e e^-).

- EFEITO COMPTON: é o espalhamento elástico de um fóton por um elétron. O fóton não desaparece na colisão e continua a interagir em outras partes do sistema.

A espessura requerida estruturalmente para as paredes do VPCP (>3m) associada à blindagem interna possibilitam a atenuação e absorção da radiação no concreto sem o uso de materiais especiais (agregados pesados: alta densidade ou grande capacidade de absorção), (FIGURA 1.2). Observações experimentais indicam os seguintes valores médios de $1/2$ espessura* para con-

* distância percorrida pela radiação em um meio determinado até que sua energia seja reduzida por um fator 2.

creto comum, (12,16) :

- NEUTRONS RÁPIDOS (>1 MeV) - 10 - 12 cm
- RAIOS GAMA PRONTOS - 11 cm
- RAIOS GAMA SECUNDÁRIOS - 19 cm

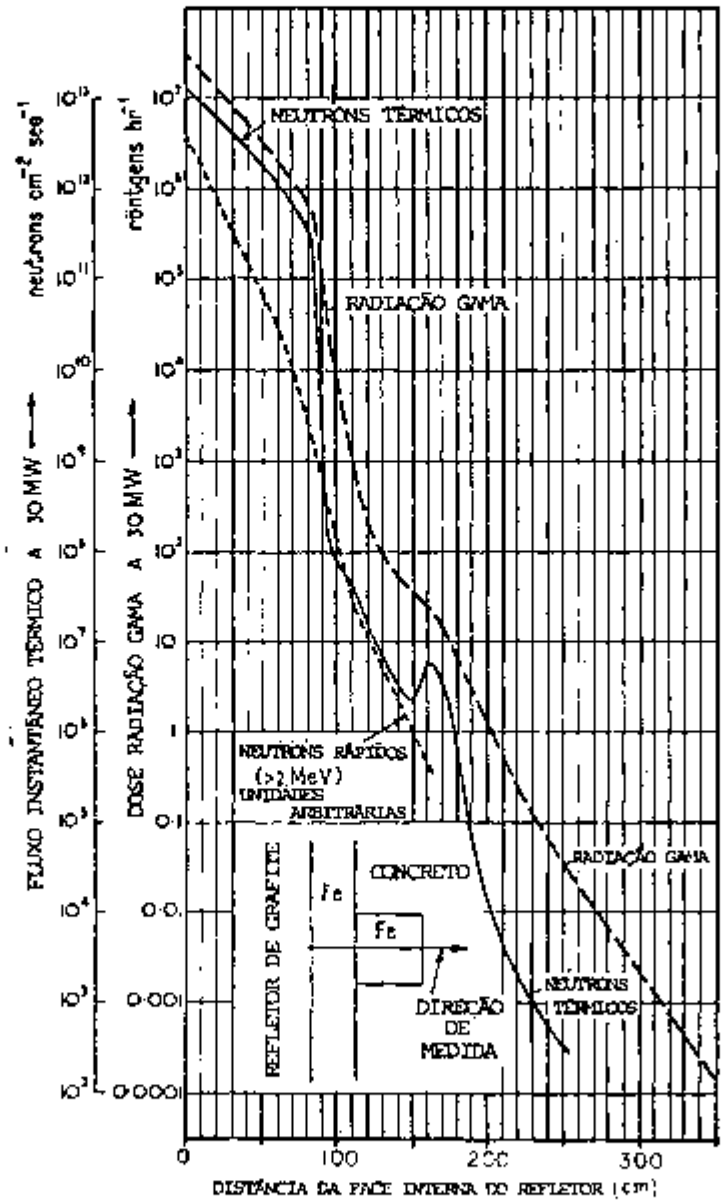


FIGURA 1.2 - Atenuação da radiação no concreto de vasos de pressão (concreto comum de alta resistência).

1.1.3. Danos de Radiação em Materiais

Todos os componentes do concreto (cimento e agregados) apresentam fase cristalina caracterizada pela disposição regular de um grande número de células básicas que definem o tipo de estrutura do cristal, (32,36,38).

Propriedades como plasticidade, módulo de elasticidade, maleabilidade, dureza, resistividade, ponto de fusão e outras, estão intimamente relacionadas ao estado da rede cristalina do material, (26,27,55).

Durante a irradiação os neutrons incidentes interagem quase que somente com o núcleo dos átomos e, na colisão elástica, apenas energia cinética é transferida ao núcleo. Se a energia transferida é maior que um certo valor limite, da ordem de 25 eV, o átomo será deslocado de sua posição de equilíbrio na rede, colidindo com seus vizinhos e, possivelmente, deslocando-os de suas posições. Este fenômeno, denominado "colisão em cascata" (FIGURA 1.3), produz certo número de átomos intersticiais (FIGURA 1.4) e um número correspondente de posições vazias, (26,27) :

<u>PARTÍCULA INCIDENTE</u>	<u>ENERGIA</u> (MeV)	<u>Nº DE PARES FORMADOS</u> (ordem de grandeza)
ELÉTRON	1	1
PARTÍCULA ALFA	1	5
NEUTRON RÁPIDO	1	10^3
FRAGMENTO DE FISSÃO	50-100	10^4

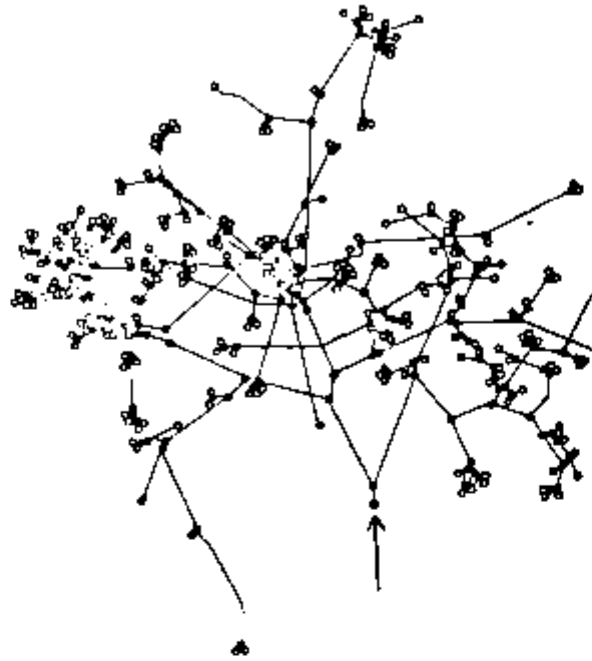


FIGURA 1.3 - Colisão em cascata
 ▲ Intersticial
 ○ Lacuna

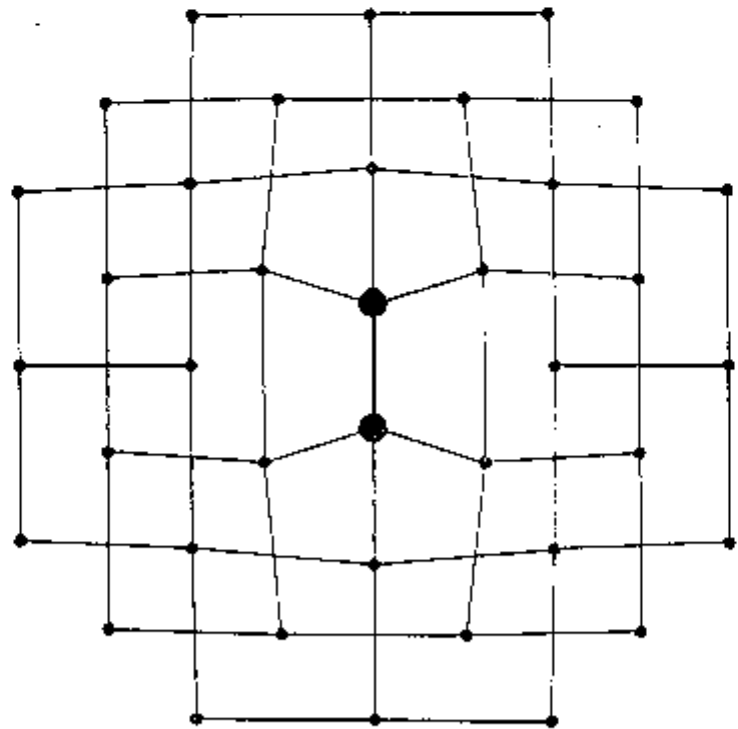


FIGURA 1.4 - Átomo Intersticial
 Configuração DUMB-BELL

Sob ação de temperatura, a vibração térmica da rede cristalina pode causar a migração de defeitos no cristal: quando dois defeitos complementares se encontram (LACUNA-INTERSTICIAL) dá-se a aniquilação do par; se os defeitos são semelhantes há tendência de agrupamento formando assim grupos de intersticiais ou lacunas que causam distorção na rede cristalina (FIGURA 1.5) e uma conseqüente deformação do cristal macroscópico, (26,27).

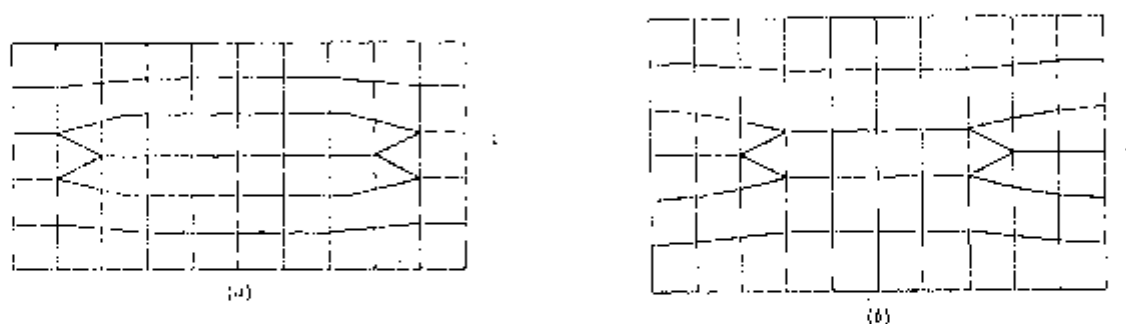


FIGURA 1.5 - Concentração de defeitos

- a) Intersticiais
- b) Lacunas

A concentração de defeitos afeta as propriedades elásticas e plásticas dos materiais causando redução na resistência mecânica e fragilização do modo de ruptura, (26,27).

1.1.4. Objetivos do Trabalho

O progresso técnico e a inerente elevação de potência dos reatores nucleares resultaram em crescente exposição de materiais a fluxo de neutrons e temperatura. O estudo do comportamento dos materiais sob ação combinada de calor e irradiação to

ma, a cada dia, maior importância dentro da área de pesquisas experimentais no setor nuclear, (23).

Grande parte dos estudos de efeitos de irradiação em concreto dirige-se a concretos especiais para blindagem, havendo ainda poucos resultados experimentais publicados acerca de concretos de alta resistência para vasos de pressão, (21).

A questão básica, em concretos de vasos de pressão (V.P.C.P.), é a determinação da magnitude de dose que, em condições particulares de temperatura, pressão, atmosfera, estado de tensões, etc..., causa alterações detectáveis nas propriedades mecânicas de um concreto específico (TIPO, TRAÇO, AGREGADOS, CURA, IDADE, ETC). É de interesse, também, avaliar a relação entre doses progressivamente maiores e a correspondente redução de resistência, além de outros efeitos tais como alteração de condutividade térmica e possíveis variações na razão de deformação lenta, (21,22,23,24).

Trabalhos experimentais publicados apresentam certa diversidade de resultados (TABELA11). De maneira geral, pode-se afirmar que em níveis de dose entre 10^{19} - 10^{20} os efeitos de irradiação começam a se tornar significativos, (21,22,23,24,25).

TABELA 11- Efeitos de doses variáveis de irradiação em concreto de vasos de pressão.

Efeito	Dose		Temperatura	Referência
	Rápida	Térmica		
Nenhum		$0,5 \times 10^{18}$		(25)
Em doses até	$2,3 \times 10^{18}$	2×10^{19}	20 - 100°C	(21)
	10^{18}	10^{19}	130°C	(24)
Início de Deterioração Detetável	$1,0 \times 10^{19}$	--	--	(25)
	--	2×10^{19}	120°C	(21)
	$10^{19} - 10^{20}$	--	45°C	(23)
	10^{18}	10^{19}	130°C	(24)
<u>Concreto</u>	4×10^{19}	--	45°C	(25)
Redução de Resistência	--	$7,5 \times 10^{19}$	50°C	(21)
	$10^{19} - 10^{20}$	--	140-200	(22)
<u>Concreto</u>				
Aumento de Resistência com grande dispersão	10^{19}	--	200°C	(23)
<u>Cimento</u>				
Aumento de Velocidade do Pulso com grande dispersão	$10^{19} - 10^{20}$	--	140-200	(22)
	3×10^{19}	--	200°C	(23)

A diversidade de resultados pode ser, em parte, atribuída a grande variedade de concretos possíveis, associados a condições experimentais específicas (espectro de energia, fluxo integrado, condições de umidade e temperatura, etc) de cada trabalho. Deve-se lembrar que, em vasos de pressão de reatores

nucleares, o concreto apresenta esta diversidade de características devido ao próprio processo construtivo.

O presente trabalho propõe-se estudar as condições experimentais básicas e testar técnicas de ensaios não destrutivos aplicadas ao estudo dos efeitos de irradiação em concreto. Decidiu-se pelo estudo preliminar do componente básico do concreto, eliminando assim as variações relacionadas às características dos agregados, traço do concreto, comportamento do cimento em concretos, etc...

As técnicas ULTRA-SÔNICAS de ensaios não destrutivos escolhidas - RESSONÂNCIA e VELOCIDADE DE PULSO - além de possibilitarem observação de alterações em uma mesma amostra (emparelhamento de dados - item 3.3) proporcionam vantagens particulares principalmente relativas à segurança durante os ensaios com amostras irradiadas (não destruição da amostra: possibilidade de refazer o teste, melhor controle estatístico de uma medida, composição do lixo radioativo em blocos cilíndricos e outras).

1.2. QUÍMICA DO CIMENTO

1.2.1. Principais componentes

"Cimento" pode ser definido como "substância adesiva capaz de unir fragmentos ou massas de matéria sólida em um bloco compacto", (35). No presente trabalho o termo "cimento" é restringido à cimentos calcários, particularmente ao cimento Portland comum.

É obtido pela calcinação de uma mistura convenientemente dosada de substâncias calcárias e argilosas. O produto assim obtido, denominado "CLINQUER", é moído até sua pulveriza-

ção, quando então é chamado cimento. Silicatos e aluminatos de cálcio, sob forma de compostos complexos, constituem 90% da massa do clínquer (34,35,37):

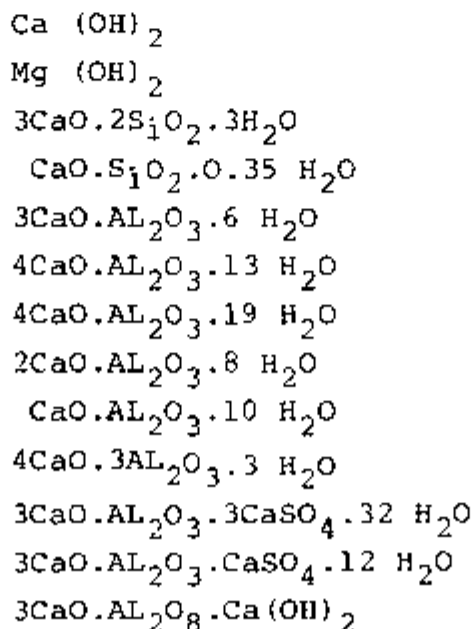
<u>COMPOSTOS BÁSICOS</u>		<u>PORCENTAGEM</u>	<u>NOTAÇÃO SIMPLIFICADA</u>
Ca O <i>CaO</i>	Cal	61-67	C
Si O_2 <i>SiO₂</i>	Sílica	20-23	S
AL_2O_3 <i>Al₂O₃</i>	Alumina	1,5-7	A
Mg O <i>MgO</i>	Magnésia	0,5-6	Mg
$\text{Fe}_2 \text{O}_3$ <i>Fe₂O₃</i>	Óxido de ferro	2-3,5	F
S O_3 <i>SO₃</i>	Sulfato	1-2,3	
$\text{Na}_2 \text{O}$ <i>Na₂O</i>	Alcalis	0,3-1,5	
$\text{K}_2 \text{O}$ <i>K₂O</i>			
Ti O_2 <i>TiO₂</i>		0,1-0,4	T
$\text{P}_2 \text{O}_5$ <i>P₂O₅</i>		0,1-0,2	P

<u>COMPOSTOS COMPLEXOS</u>	<u>NOTAÇÃO SIMPLIFICADA</u>
3 Ca O.SiO ₂	C ₃ S
2 Ca O.SiO ₂	Ca S
3 Ca O.2SiO ₂	C ₃ S ₂
3 Ca O.AL ₂ O ₃	C ₃ A
5 Ca O.3AL.O ₃	C ₅ A ₃
12 Ca O.7AL ₂ O ₃	C ₁₂ A ₇
Mg O.SiO ₂	Mg S
3 Ca O.MgO.2SiO ₂	C ₃ M S ₂
Ca O.MgO.SiO ₂	CMgS
3 Ca O.2TiO ₂	C ₃ T ₂

Continuação

<u>COMPOSTOS COMPLEXOS</u>	<u>NOTAÇÃO SIMPLIFICADA</u>
3 Ca O.5AL ₂ O ₃	C ₃ A ₅
Ca O.5AL ₂ O ₃	C A ₅
2 Ca O.AL ₂ O ₃ .SiO ₂	C ₂ AS
2 Ca O.Fe ₂ O ₃	C ₂ F
Ca O.Fe ₂ O ₃	C F
4 Ca O.AL ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
6 Ca O.2AL ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₆ A ₂ F
6 Ca O.AL ₂ O ₃ .2Fe ₂ O ₃	C ₆ AF ₂
K ₂ O.23CaO.12SiO ₂	K C ₂₃ S ₁₂
Na ₂ O.8CaO.AL ₂ O ₃	N C ₈ A
3 Ca O.P ₂ O ₅	C ₃ P

Os compostos presentes no clínquer são anidros. Quando expostos à ação da água são atacados ou decompostos formando novos compostos hidratados menos solúveis que causam o endurecimento da pasta (item 1.2.2), (35,37,40):

COMPOSTOS HIDRATADOS

Podem também estar presentes um certo número de impurezas provenientes das jazidas de matéria prima e da água de amassamento, (37).

1.2.2. Estrutura Química Cristalina

Duas teorias clássicas procuram explicar a hidratação da pasta de cimento: teoria de "LE CHATELIER" (1882) e teoria de "MICHAELIS" (1893).

Na primeira, cristaloidal, o endurecimento é explicado pelo engavetamento de cristais que se formam pela cristalização de uma solução supersaturada de compostos hidratados menos solúveis que os anidros, (37).

Pela teoria coloidal de MICHAELIS, a hidratação do cimento dá origem a uma solução supersaturada e formam-se cristais em agulhas e palhetas hexagonais. Há a formação de um silicato monocálcico hidratado, pouco solúvel, que dá origem a um gel coloidal na massa geleificada, que aprisiona os cristais; o gel continua a tomar água, a massa endurece e impermeabiliza-se, (37).

Atualmente a tendência é de uma síntese entre as duas teorias, (38,39,40,42), (FIGURA 1-6).

O exame microscópico da pasta revela a presença de grãos de cimento não hidratados, cristais hexagonais de hidróxido de cálcio, cristais hexagonais ou cúbicos de aluminatos e sulfa-aluminatos e poros preenchidos ou não com água, (38,42,43).

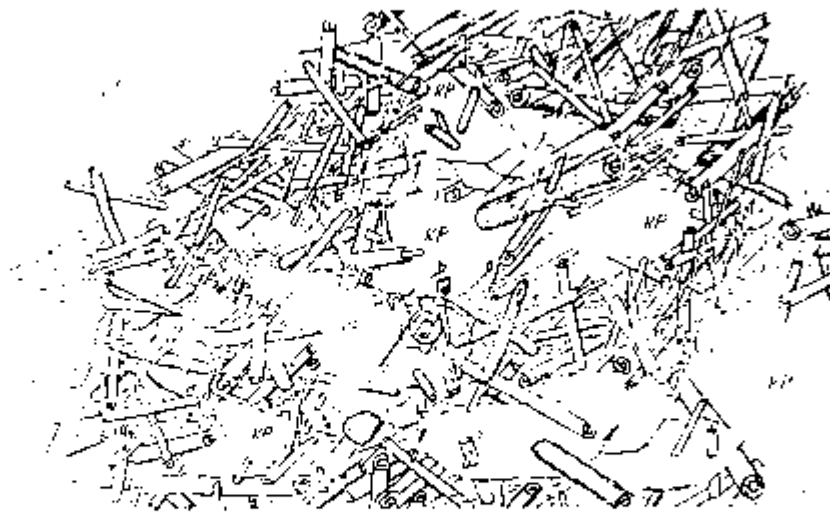


FIGURA 1.6 - Modelo de estrutura do cimento hidratado, segundo W. Richartz e F.W. Locher. Kp: Poros capilares , Lp: Poros de ar.

O gel é formado por pequenas partículas de dimensões coloidais ($\sim 200 \text{ \AA}$), principalmente hidratos e silicatos de cálcio com alguns aluminatos e ferrites . A cristalização dos compostos se dá sob formas variadas tais como sistemas hexagonais, placas ou prismas, agulhas, texturas fibrosas, fases amorfas, formascúbicas, etc., (33,38,40).

Foram já identificados pelo menos 14 tipos de soluções sólidas entre os compostos hidratados, sendo provável a existência de outras mais complexas, (32,34,35,38,39).

A aplicação da microscopia eletrônica em estudo de cimento possibilitou a observação direta da variedade de morfologias locais existentes na pasta, (40,42,43).

1.2.3. Micro Estrutura da Pasta

As propriedades da pasta de cimento são, em última análise, determinadas por sua composição química e estrutura fi-

sica. A interação com água, gases e outros agentes agressivos são dependentes da composição das fases cristalinas enquanto as características físicas como resistência, constância de volume, permeabilidade, plasticidade e densidade são, em grande parte, determinadas pela estrutura física, (32,33,40,42).

A formação da estrutura se inicia com a adição de água ao pó de cimento, estabilizando-se gradualmente no decorrer do processo de cura (FIGURA 1.7). A maior parte da água é incorporada nas fases sólidas, permanecendo o restante como água livre nos poros e capilares ou aderentes às partículas sob forças de superfície (38).

A porosidade é definida como a fração de volume ocupada pela água evaporável e compreende os poros capilares e os poros do gel, atingindo cerca de 28% do volume da massa (FIGURA 1.8). Diferenças estruturais entre pastas feitas com o mesmo cimento são, em primeiro lugar, devido às diferenças na porosidade capilar em função da relação água/cimento efetiva, (38,39,41,43).

O desenvolvimento da resistência mecânica é determinado por diversas e complicadas inter-relações entre fenômenos de solubilidade e super-saturação, formação e crescimento de núcleos cristalinos, grau de crescimento da superfície específica dos produtos de hidratação e estabelecimento de contactos mecânicos ou químicos na estrutura dos cristais entrelaçados. De maneira geral, pode-se atribuir a resistência mecânica às forças de coesão (VAN DER WALLS) atuantes entre as partículas do gel ou ao entrelaçamento dos cristalitos e a formação de ligações químicas nos seus pontos de contacto, (35,38,43).

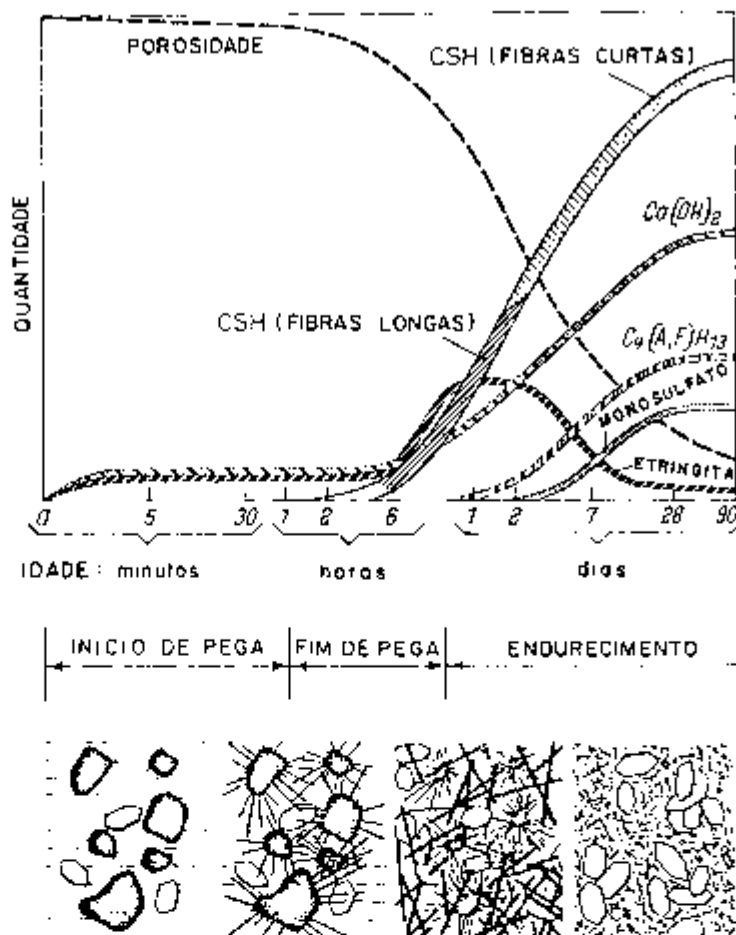


FIGURA 1.7 - Hidratação e desenvolvimento da micro-estrutura na pasta de cimento.

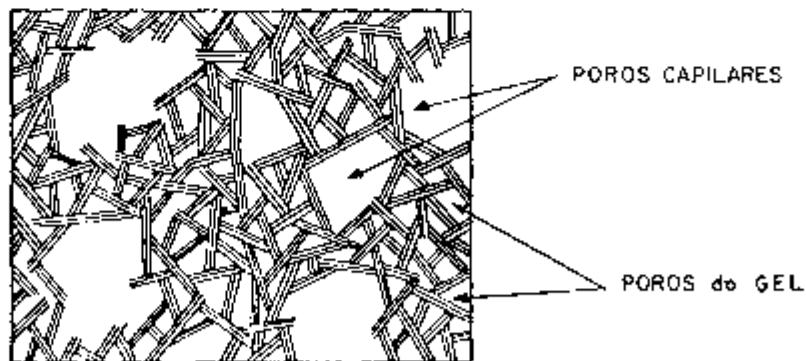


FIGURA 1.8 - Modelo de estrutura do gel de cimento.

O conteúdo de água desempenha também importante papel na resistência da pasta, cuja estrutura é mecanicamente ins^utável e torna-se permanentemente alterada quando a pasta é seca pela primeira vez. A temperatura exerce efeito semelhante sobre a micro-estrutura do cimento, (39,42,43).

1.3. TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS

1.3.1. Características Fundamentais

Som é a alteração na pressão, tensão, deslocamento de partículas ou velocidade da partícula, que é propagada em um material elástico; ou a superposição de tais vibrações propagadas. A energia destas vibrações apresenta-se sob forma potencial, no elemento elástico, e cinética, na massa, (46,47).

Cada elemento interage com os próximos por meio de forças elásticas e viscosas, induzindo o deslocamento de elementos sucessivos no meio. A elasticidade fornece a força de restauração que tende a manter o elemento em sua posição de partí^uda até que, novamente, alcance uma posição de equilíbrio. As órbitas descritas pelos elementos caracterizam o tipo básico de onda: longitudinal, transversal e de superfície (FIGURA 1.9) , (45,49,50).

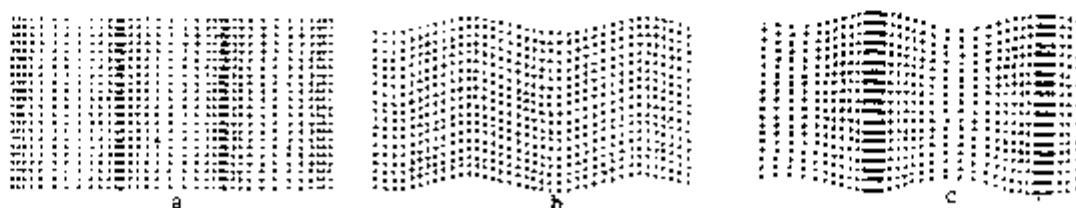


FIGURA 1.9 - Ondas mecânicas em um sólido

- a) Longitudinal
- b) Transversal
- c) Superfície

São três as propriedades da matéria relacionadas à propagação destas perturbações, (47):

1. ELASTICIDADE: pela qual é oferecida uma resistência à variação de densidade em todos os estados da matéria e alterações na forma em sólidos;

2. VISCOSIDADE: pela qual forças resistivas são desenvolvidas proporcionalmente à razão de tempo na deformação;

3. INÉRCIA: que oferece resistência à aceleração das partículas do meio perturbado que se movem devido à deformação.

A perda de energia e a conseqüente atenuação da onda, em sólidos, está vinculada a quatro fatores, sendo o tipo predominante dependente do material em questão, (50):

- Transformação em calor
- Fricção viscosa
- Histerese elástica
- Espalhamento

Em materiais policristalinos a fricção viscosa entre os grãos é responsável por grande parte das perdas, (50).

Técnicas ultra-sônicas, ou simplesmente sônicas, referem-se às técnicas que se utilizam de ondas de natureza sonora (ondas mecânicas) abrangendo frequências de 1/10 Hz (Sismologia) a 10^{14} Hz (Física de Sólidos). É elevado o número de aplicações destas técnicas nos mais diversos setores, (44).

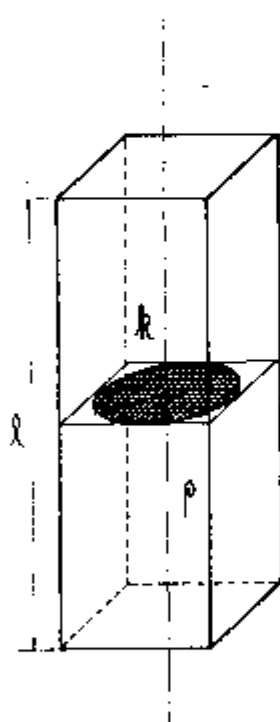
Neste trabalho restringir-nos-emos às técnicas de análise dinâmicas, particularmente às técnicas de frequência de ressonância e velocidade de pulso, empregadas com intuito de avaliar possíveis alterações de propriedades físicas no cimento,

quando submetido à irradiação de neutrons e raios gama.

1.3.2. Relações Básicas

"A frequência de ressonância de um espécime e a velocidade de uma onda vibratória passando através do material de que é feito o espécime estão relacionados entre si e ao módulo de elasticidade do material" (RAYLEIGH, 1877), (51).

Para uma barra vibrando em flexão temos (FIGURA 1.10):



$$n = \frac{k \cdot V}{2 \pi l^2}$$

$$V = \frac{E}{\rho}$$

n = Frequência fundamental de ressonância (Hz).

R = Raio de giração de uma seção perpendicular ao eixo longitudinal da barra.

V = Velocidade do som no meio.

l = Comprimento do espécime.

E = Módulo de elasticidade dinâmico.

ρ = Densidade do meio.

m = Constante = 4,73 para o modo fundamental de vibração.

FIGURA 1.10 - Relações de Rayleigh.

Estas relações aplicam-se a diversos materiais (metais, plásticos, madeira, tijolos, rocha, concreto, etc...) , dando origem a técnicas que envolvem a determinação da frequência de ressonância de um espécime e a medida da velocidade que

uma onda mecânica de compressão desloca-se através do meio. Segundo teorias desenvolvidas por RAYLEIGH, TIMOSHENKO, LOVE e outros (51), certas propriedades podem ser calculadas a partir dos resultados de testes sônicos (48,51), (item 1.3.5):

- Módulo de elasticidade
- Coefficiente de Poisson
- Decremento logarítmico
- Constante de amortecimento

• Outras características podem ainda ser avaliadas:

- Pega
- Fluência
- Uniformidade da massa
- Fissuração
- Qualidade em geral

Correlações empíricas podem ser estabelecidas entre frequência de ressonância ou velocidade de pulso e a resistência mecânica do material. No caso de cimento e concreto, contudo, estas correlações tem sua validade restrita ao lote de amostras em estudo.

1.3.3. Técnicas de Frequência de Ressonância

Um oscilador de frequência variável gera uma onda senoidal que é transformada em vibração mecânica por um transdutor apropriado (item 2.2.1.). Este, sob certa pressão, transmite a vibração à amostra, que passa a vibrar na frequência emitida. Um segundo transdutor acoplado em outro ponto da amostra (FIGURA 1.11) é excitado por esta vibração. O sinal assim obtido é amplificado e visualizado por intermédio de um osciloscó-

pio. Quando a frequência gerada no oscilador coincide com a frequência fundamental de ressonância da amostra, a amplitude de vibração na amostra é máxima. A identificação do pico de amplitude é feita visualmente na tela do osciloscópio, (48,51).

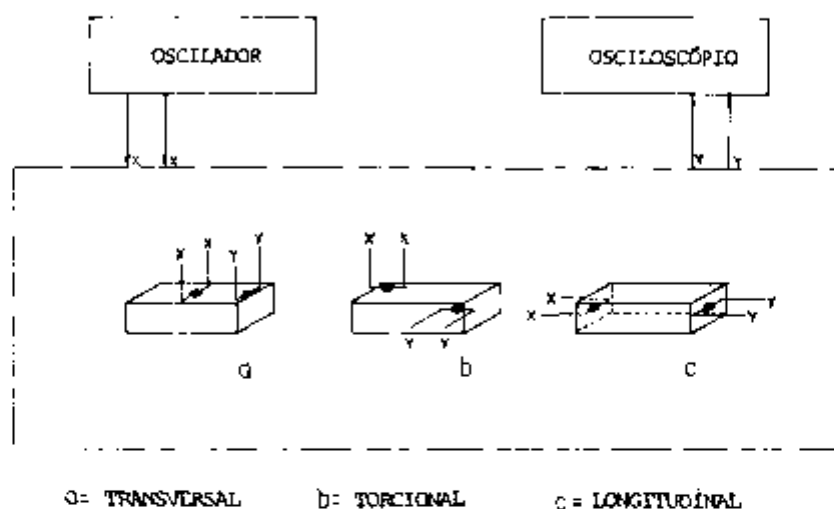


FIGURA 1.11 - Técnica de frequência de ressonância.

OBS.: A localização dos transdutores na amostra caracteriza o tipo de ressonância obtido:

- a) Transversal
- b) Torcional
- c) Longitudinal

Na frequência fundamental de ressonância longitudinal, o comprimento de onda é cerca de duas vezes o comprimento da amostra, quando a relação altura/diâmetro está em torno de dois, (48,51).

Além da frequência fundamental, existem outras frequências em que ocorre ressonância: são os chamados harmônicos de ordem superior. A ordem do harmônico é dada pelo número de meias ondas contidos na extensão da amostra (FIGURA 1.12), (44):

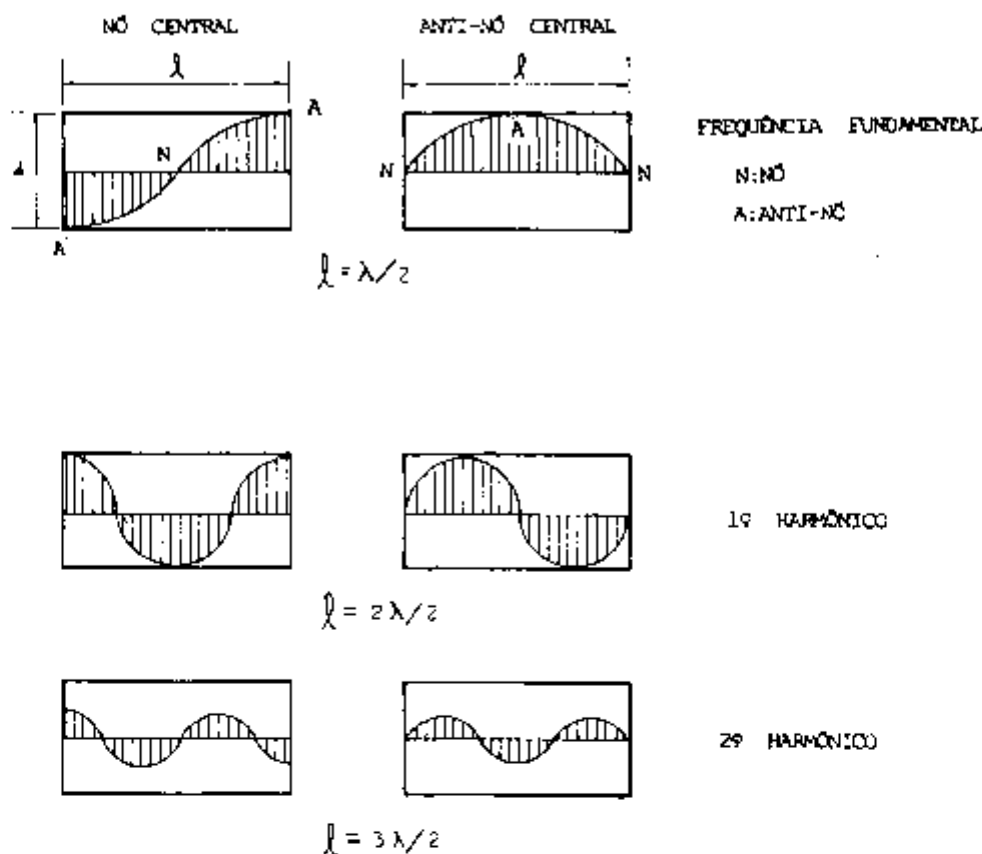


FIGURA 1.12 - Amplitude de vibração na amostra na frequência de ressonância fundamental e primeiros harmônicos.

OBS.: NÓ CENTRAL: amostra fixada pelo centro.

ANTI-NÓ CENTRAL: amostra fixada pelas extremidades.

1.3.4. Técnicas de Propagação de Pulso

Consistem basicamente em um trem de pulsos de ondas ultra-sônicas de curta duração (~ MHz) que percorre o material a uma determinada velocidade, que é função das características do meio, (48, 51).

O modo de aplicação do teste é semelhante ao de ressonância: substituiu-se o gerador de onda senoidal por um gerador de pulso e observa-se a defasagem entre o pulso emitido e o pulso recebido. As principais técnicas são as de transmissão e re-

flexão de pulso (FIGURA 1.13).

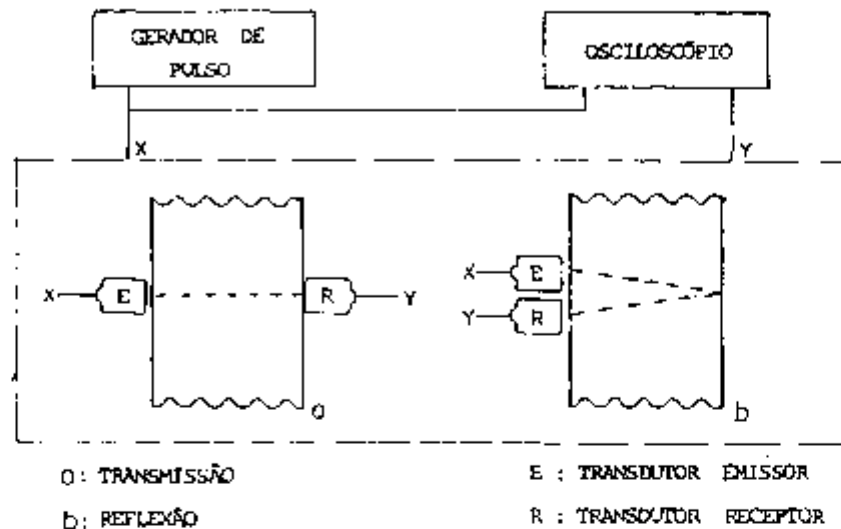
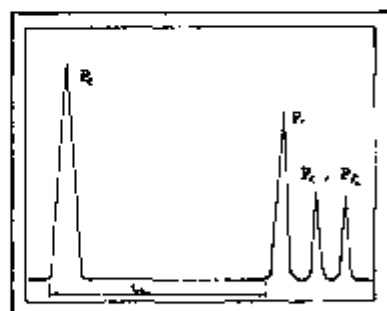


FIGURA 1.13 - Técnicas de propagação de pulso.

Conhecendo-se as características geométricas do meio (caminho percorrido pelo pulso) calcula-se a velocidade do som no material (FIGURA 1.14).



P_1 : PICO EMITIDO
 P_2 : PICO RECEBIDO
 P_3, P_4 : PICOS REFLETIDOS
 t_{tr} : TEMPO DE TRÂNSITO

$$V = \frac{L}{t_{tr}}$$

V = Velocidade de pulso.

L = Caminho percorrido.

t_{tr} = Tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.

FIGURA 1.14 - Tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.

Na frequência fundamental de ressonância o comprimento de onda corresponde a duas vezes o comprimento (altura) da amostra (item 1.3.3., FIGURA 1.12), (51). O tempo de trânsito

do pulso ultra-sônico na amostra corresponde, então, a meio período da frequência de ressonância, que pode assim ser estimada pela relação (FIGURA 1.15):

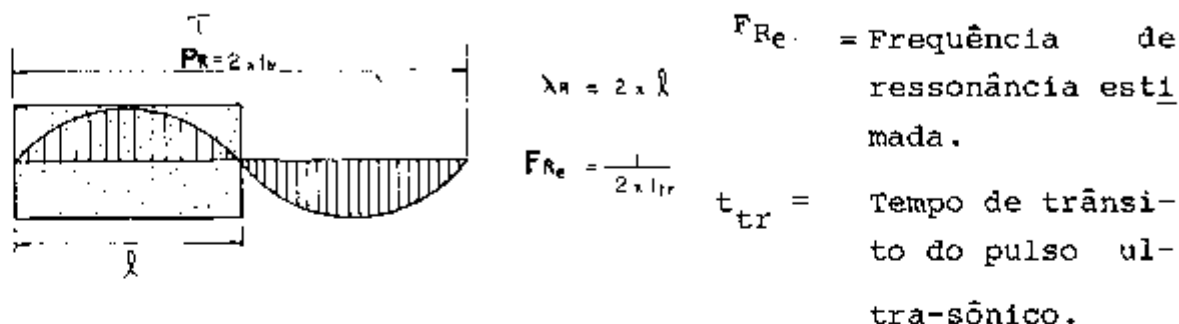


FIGURA 1.15 - Estimativa da frequência de ressonância a partir do tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.

1.3.5. Propriedades Dinâmicas

A partir dos valores de frequência de ressonância e velocidade de pulso é possível, por meio de correlações empíricas, avaliar-se o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do cimento e concreto. Estes resultados, contudo, tem sua validade restrita ao lote em estudo, visto que esta correlação depende de grande número de fatores, tais como: dosagem do concreto, relação água-cimento, tipo e granulometria do agregado, tipo de cimento, condições de cura, etc... (48,51).

"O módulo de elasticidade computado por meio de testes sônicos é diferente daquele determinado por testes de carga não devendo ser empregado em cálculos de dimensionamento, o que poderia levar a erros significativos..." (51, pag. 80). Contudo, quando se estuda a variação de propriedades de materiais, este método é o mais indicado devido a sua sensibilidade e precisão, além de possibilitar a observação direta das altera-

ções de propriedades em uma mesma amostra (emparelhamento de dados) permitindo um melhor controle estatístico dos resultados (menor dispersão), (48,51,54).

São muitas as adaptações empíricas das relações de Rayleigh para o cimento e concreto. Neste trabalho serão empregadas as seguintes (48):

a) RESSONÂNCIA LONGITUDINAL*

$$E_d = \frac{2(n_L)^2 \ell^2 \rho}{g} k$$

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico

n_L = Frequência fundamental de ressonância

ℓ = Comprimento da amostra

ρ = Densidade do material

g = Aceleração da gravidade

k = Constante de correlação

b) VELOCIDADE DE PULSO*

$$E_d = V_L^2 \rho \cdot k$$

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico

V_L = Velocidade da onda no material

ρ = Densidade do meio

k^* = Constante de correlação

* Estas relações devem ser adaptadas ao lote em estudo por meio de constantes obtidas por correlação com testes destrutivos.

2 - DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1. PREPARO DOS CORPOS DE PROVA (AMOSTRAS)

2.1.1. Cimento Utilizado

Para a confecção dos corpos de prova (amostras) empregou-se o cimento portland comum, cp-320 marca Santa Rita, utilizado em estruturas de concreto em geral. De acordo com o modo de armazenamento é denominado C_1 e C_2 (FIGURA 2.1.):

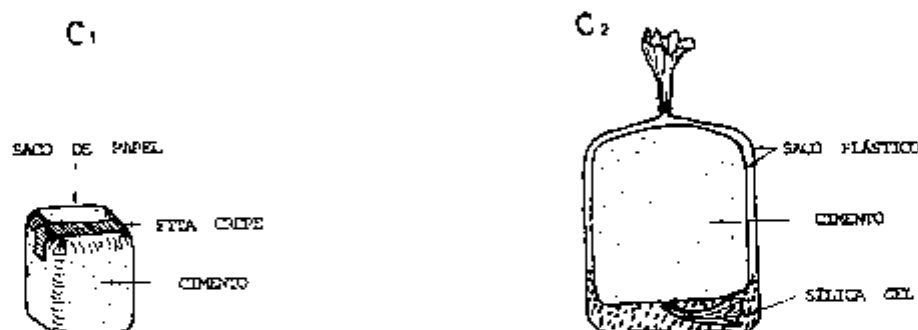


FIGURA 2.1. - Armazenagem do cimento

C_1 : Saco de papel (tipo supermercado).

C_2 : Saco plástico e sílica gel.

Seis sacos de papel contendo 750g de cimento cada e um saco plástico com 10.000g do mesmo cimento isolado do ar por meio de sílica gel, permanecem em atmosfera ambiente cerca de 60 dias.

O cimento C_1 absorve certa quantidade de umidade do ar hidratando-se parcialmente enquanto C_2 permanece isolado da umidade ambiente.

Observou-se que, na operação de moldagem das amostras, o cimento C_1 apresentava pequenos grânulos ($d < 1\text{mm}$) que com dificuldade se dissolviam na água de amassamento enquanto

C_2 , ainda finamente pulverizado, misturava-se facilmente.

2.1.2. Moldagem e Cura das Amostras

A moldagem é feita misturando-se manualmente 750g de cimento com 300g de água ($a/c = 0,40$). A pasta assim obtida é lançada em 10 moldes cilíndricos de aço, previamente umedecidos com desmoldante de concreto (DESMOL). A cura se processa em câmara saturada (FIGURA 2.2.). Após a pega e endurecimento inicial (24 horas), (FIGURA 1.7; item 1.2.3), efetua-se a desmoldagem, as amostras são identificadas por um código apropriado e então retornam à câmara saturada onde permanecem até o início do programa de ensaios (item 2.3.2.) quando sua altura, em cada lote, é regularizada com precisão de ± 1 mm e as superfícies inferior e superior polidas com lixa nº 300.

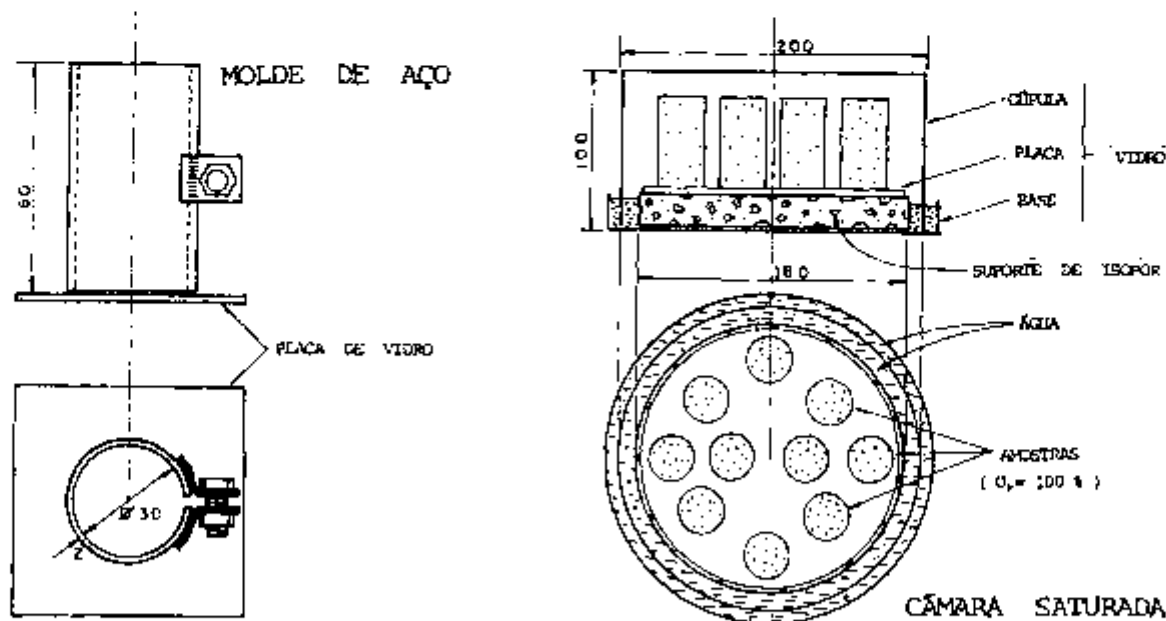


FIGURA 2.2. - Molde de aço e câmara saturada.

São moldados 12 lotes de 10 amostras cada (6 C_1 e 6 C_2) utilizados no experimento, testes preliminares (APÊNDICE 1) e irradiações protótipo (APÊNDICE 2).

2.1.3. Representatividade dos Lotes

"Nos ensaios destrutivos convencionais os testes de avaliação de resistência mecânica e módulo de elasticidade não são feitos diretamente na pasta de cimento em virtude das dificuldades de moldagem e ensaios e a conseqüente amplitude de variação dos resultados. Estuda-se o comportamento de argamassas ou concretos com agregados e granulometria padronizados sob condições estritamente controladas. Nestas condições a resistência final do concreto (ou argamassa), que depende da coesão do cimento, da adesão entre o cimento e o agregado e, em menor grau, da resistência do agregado em si, avalia de maneira mais próxima da realidade a resistência do cimento em estruturas de concreto" (36 - pag. 52). Os ensaios não destrutivos, por outro lado, permitem a observação de alterações de propriedades físicas da pasta em si sem vincular seu comportamento à estruturas de concreto, além de propiciar menor dispersão nos resultados, (51).

As características físicas da pasta de cimento endurecida dependem de fatores como composição química, condições de cura, idade, etc... (item 1.2.3.). De grande importância são as condições de temperatura e umidade de cura (FIGURA 2.3), (37).

A cura em câmara saturada mantém a mesma condição de umidade ($U_R = 100\%$) em todas as amostras enquanto a variação da temperatura ambiente afeta igualmente a todos os lotes. O período de cura do cimento estudado é cerca de 16,3 meses.

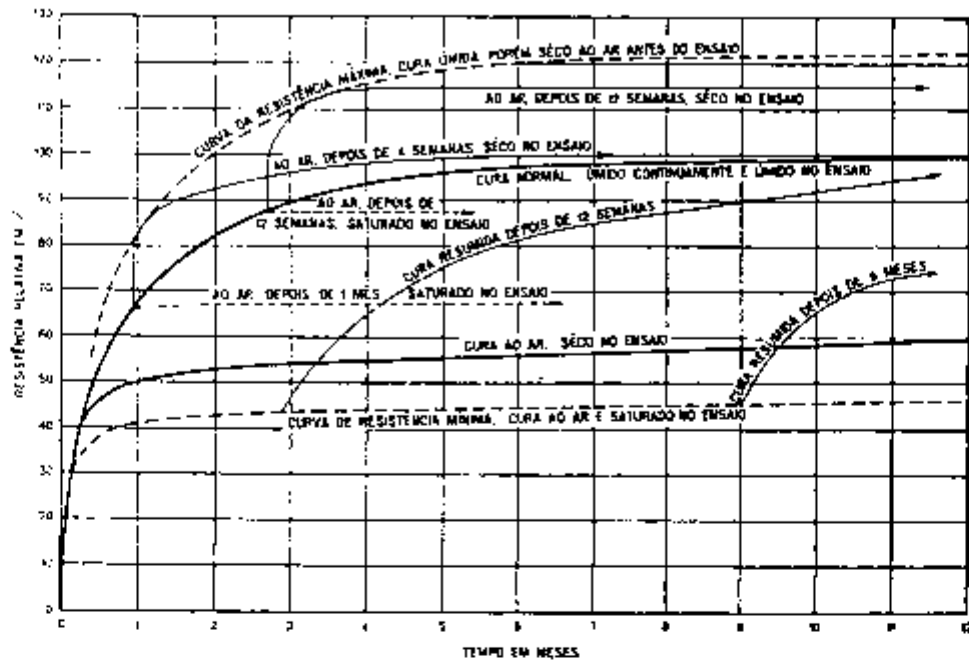
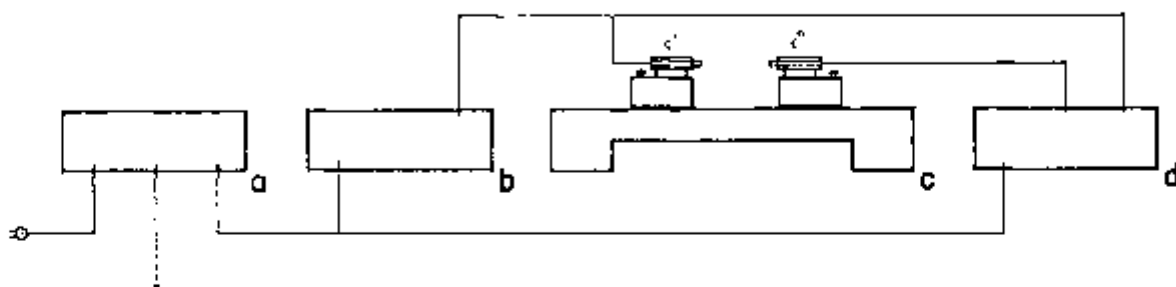


FIGURA 2.3 - Influência das condições de umidade de cura na resistência mecânica da pasta.

2.2. MONTAGEM UTILIZADA NOS ENSAIOS

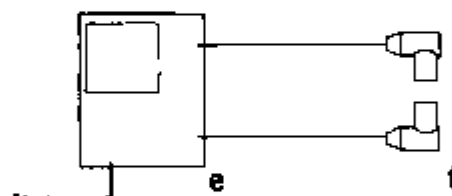
2.2.1. Descrição da Aparelhagem

A montagem utilizada nos ensaios de ultra-som segue o esquema descrito nos itens 1.3.2. e 1.3.3., (FIGURA 2.4.).



ENSAIO DE RESSONÂNCIA

- a) Estabilizador de tensão (SO-RENSEN - 115 V - 30A).
- b) Gerador de funções HEWLET PACKARD (50-AB).
- c) Mesa com transdutores (IFUSP).
- d) Osciloscópio Tectrônicos 561A.



ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO

- e) Aparelho de ultra-som KRAUTKRAMER -U.S. FLAW DETECTOR - USIP 10 W.
- f) Transdutores KRAUTKRAMER - 0,05 MHz.

FIGURA 2.4 - Montagem utilizada nos ensaios de ultra-som.

EQUIPAMENTO ADICIONAIS

- | | |
|-------------------------------|----------|
| - Balança Mettler | Pinças |
| - Estufa Retilínea | Luvas |
| - Detetores Victoreen 440-444 | Máscaras |

O arranjo físico dos aparelhos é planejado em função

da simplicidade e segurança de operação (FIGURA A.3.12, APÊNDICE 3).

2.2.2. Testes de Reprodutibilidade

Com objetivo de se avaliar quantitativamente as características operacionais dos aparelhos e otimizar os resultados dos ensaios foi realizada uma série de testes com amostras de cimento de 3 a 8 meses de idade. Estes testes e seus resultados são descritos no APÊNDICE I .

2.2.3. Sistemas de Segurança

Os ensaios de amostras irradiadas requerem precauções especiais devido à ativação de elementos e impurezas presentes no cimento. Duas irradiações protótipo foram realizadas para teste do dispositivo de irradiação, desenvolvimento e teste dos procedimentos de irradiação, levantamento das características nucleares das amostras e grau de aquecimento devido à radiação gama (APÊNDICE 2). A partir das informações obtidas definiu-se os sistemas e procedimentos de segurança necessários (APÊNDICE 3).

2.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

2.3.1. Descrição do ENSAIO

Cada lote (10 amostras) é estudado individualmente . Este procedimento é repetido em todos os lotes:

ENSAIO PADRÃO DE UMA AMOSTRA

a) DIMENSÕES (h e d)

h: altura (ou ℓ : comprimento) - média dos valores medidos em duas direções perpendiculares entre si (FIGURA 2.5.a).

d: Diâmetro - média dos valores máximo e mínimo (FIGURA 2.5.b).

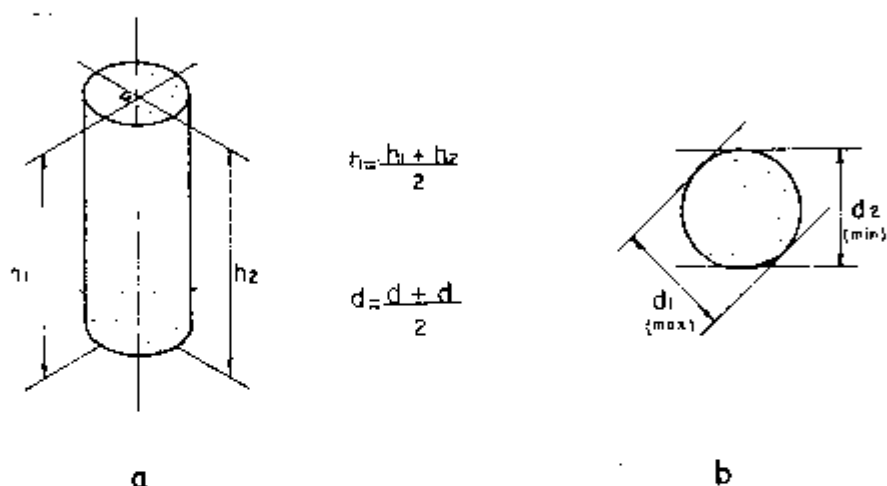


FIGURA 2.5 - Medida de dimensões da amostra.

b) PESO - (P)

Medida em balança de precisão (0,0005g). As variações de peso são atribuídas à variação do teor de umidade (água evaporável) do cimento.

c) FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA (FR)

A amostra é posicionada entre os transdutores (FIGURA 2.4) sob pressão produzida pelo deslocamento de uma mola (FIGURA 2.6). Variando-se a frequência gerada observa-se, na tela do osciloscópio, a amplitude da onda captada pelo transdu

tor receptor: quando esta é máxima a frequência no gerador corresponde à ressonância da amostra. O período da onda nesta frequência é lido diretamente na tela do osciloscópio.

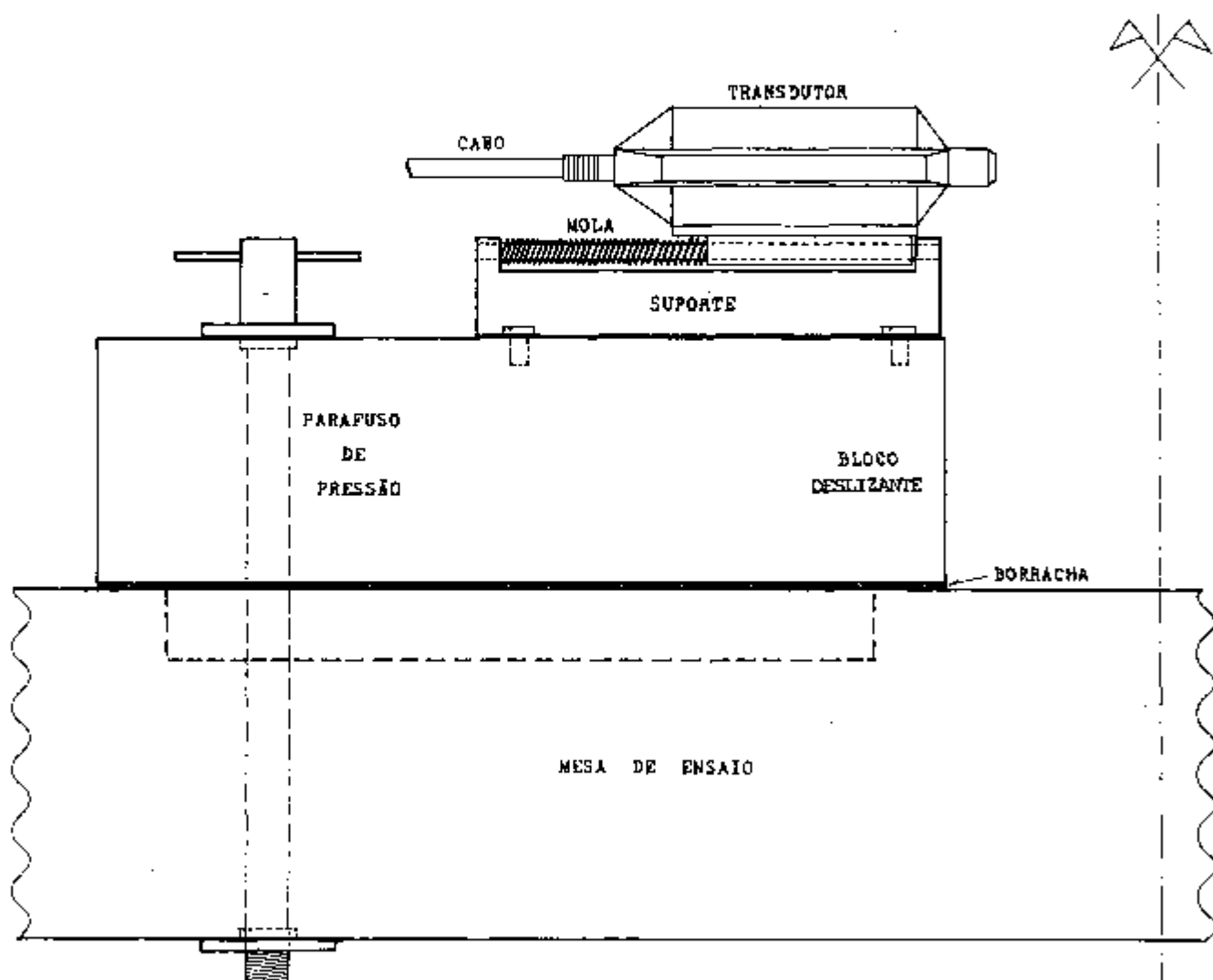


FIGURA 2.6 - Ensaio de ressonância: fixação do transdutor e bloco deslizante.

Este procedimento é repetido cinco vezes reposicionando-se a amostra entre cada leitura (APÊNDICE 1). Toma-se a média das cinco leituras e calcula-se a frequência de ressonância pela relação:

$$F_R = \frac{1}{\bar{P}}$$

FR = Frequência de ressonância
 \bar{P} = Média dos períodos de onda

d) VELOCIDADE DE PULSO (V_p)

A amostra é posicionada sobre o transdutor emissor convenientemente fixado e pressiona-se o transdutor receptor sobre a amostra (FIGURA 2.7). A defasagem entre os pulsos emitido e recebido é lida diretamente em microsegundos na tela do aparelho. A velocidade de pulso é calculada pela relação:

$$V_p = \frac{\ell i}{t_{tr}}$$

V_p = Velocidade de pulso
 ℓi = Comprimento (altura) da amostra
 t_{tr} = Tempo de trânsito do pulso ultra-sônico na amostra.

Antes e após o ensaio de cada lote verifica-se a calibração do aparelho pelo ensaio de um corpo de prova padrão de acrílico com dimensões e t_{tr} conhecidos (FIGURA 2.8).

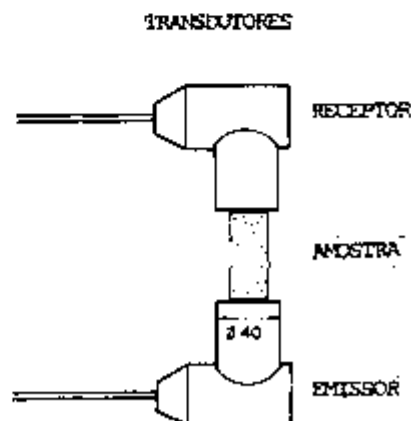


FIGURA 2.7 - Ensaio de velocidade de pulso.

CORPO DE PROVA PADRÃO

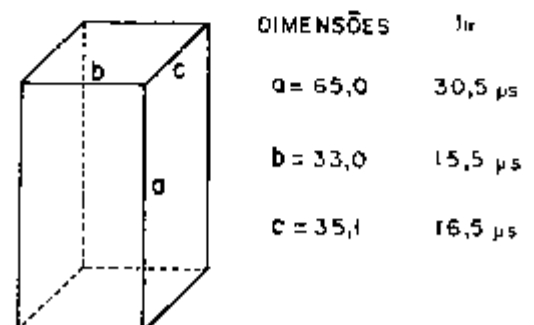


FIGURA 2.8 - Corpo de prova padrão.

O lote é ensaiado duas vezes consecutivas para confirmação da leitura. A frequência de ressonância pode então ser estimada pela relação (item 1.3.4.):

$$F_{Re} = \frac{1}{2t_{tr}}$$

F_{Re} = Frequência de ressonância calculada.
 t_{tr} = Tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.

2.3.2. Programa de ENSAIOS

A história de temperatura e o teor de umidade da amostra no momento do ensaio afetam significativamente os resultados obtidos (APÊNDICE 1). Com objetivo de distinguir o efeito de irradiação do efeito de temperatura (APÊNDICE 3) e contornar a influência do teor de umidade nos ensaios, foi desenvolvido um programa de "ENSAIOS" onde são definidos cinco "TIPOS" de procedimentos com as amostras. Em cada TIPO são realizados seis ENSAIOS de caracterização em etapas sucessivas do programa. O esquema apresentado na FIGURA 2.9 corresponde ao estudo de 1 lote (10 amostras).

OBS.: T: TIPO $\rightarrow T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$

E: ENSAIO $\rightarrow E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6$

O efeito de cada TIPO de procedimento é avaliado em um estudo comparativo final considerando os resultados horizontais e verticais do programa de ENSAIOS:

HORIZONTALS: 5 tipos em cada ENSAIO.

VERTICAIS : 6 ensaios em cada TIPO.

TIPOS de procedimentos com as amostras: (cada TIPO corresponde ao estudo de duas amostras do lote):

TIPO 1 - CONTROLE: permanecem em atmosfera ambiente.

TIPO 2 - IRRADIAÇÃO: irradiadas sem secagem prévia em estufa.

TIPO 3 - IRRADIAÇÃO: irradiadas após secagem prévia em estufa a 170°C durante 8 horas.

TIPO 4 - SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA: secagem prévia em estufa (170°C - 8h). Submetidas a ciclos de temperatura semelhantes aos que ocorrem com amostras no caroço do reator.

TIPO 5 - CONTROLE - TEMPERATURA: submetidas à secagem prévia, permanecem em atmosfera ambiente.

Sequência de ENSAIOS:

ENSAIO 1: imediatamente após retirada da câmara saturada.

ENSAIO 2: após secagem em estufa.

ENSAIO 3: após cerca de 2 dias em atmosfera ambiente.

ENSAIO 4: após período de decaimento*

ENSAIO 5: após segunda secagem em estufa.

ENSAIO 6: após saturação final.

*OBS.: O intervalo de tempo entre os ENSAIOS em cada lote é apresentado no APÊNDICE 6, (TABELA A6.1).

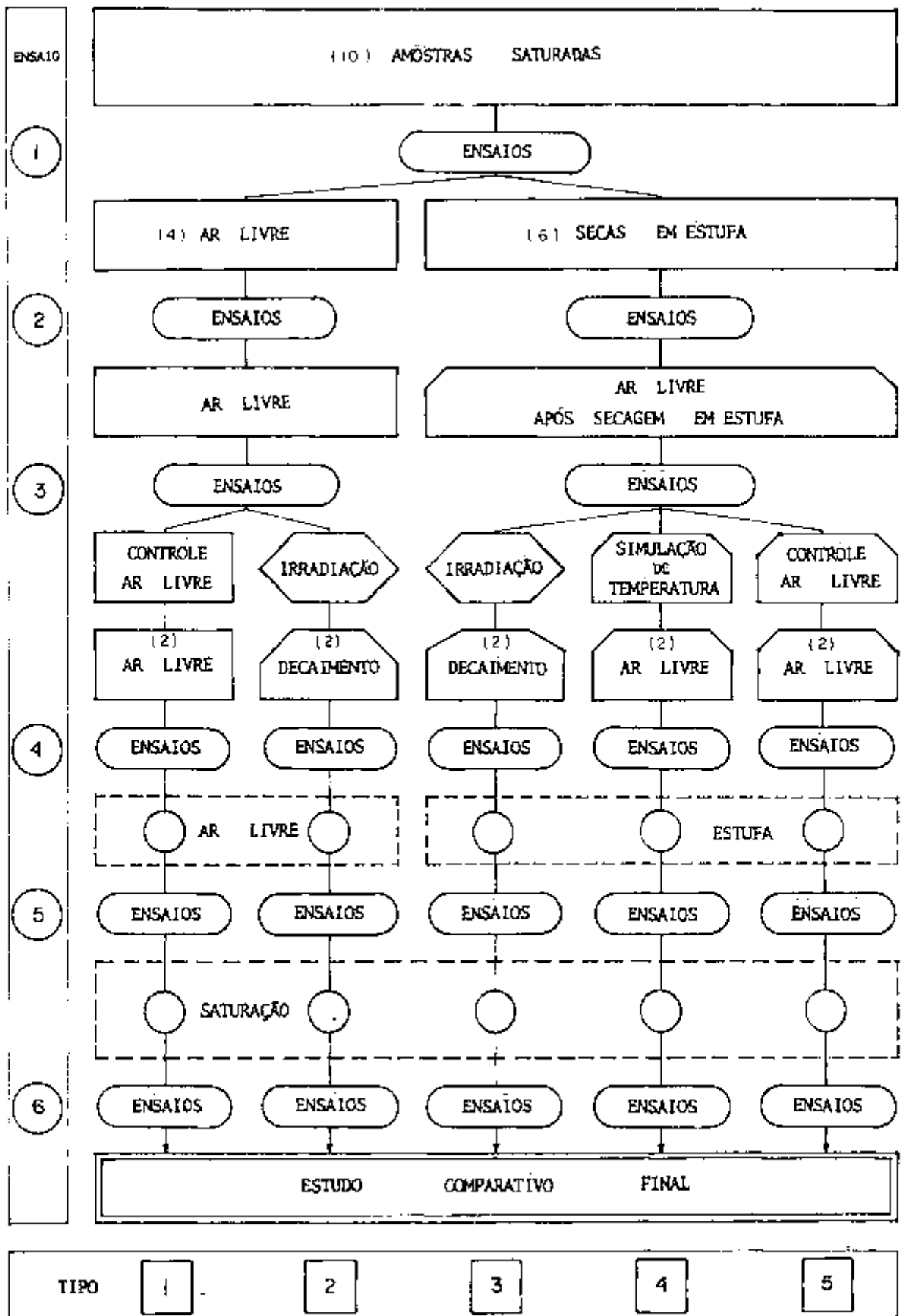


FIGURA 2.9 - Programa de Ensaios.

2.3.3. Tabela de Resultados

A cada amostra é associada uma tabela de anotação de medidas e cálculo de resultados (FIGURA 2.10). Após o ENSAIO de um lote é feito um cálculo de resultados preliminar que permite a observação do comportamento das características e propriedades de cada amostra à medida que se desenvolve o programa de ENSAIOS:

<u>VALORES MEDIDOS</u>		<u>VALORES CALCULADOS</u>	
Altura	h	Volume	$V = \frac{\pi d^2}{4}$
Diâmetro	d	Peso específico	$\rho = P/V$
Peso	P	Velocidade de pulso	$V_p = h/t_{tr}$
Tempo de Trans.	t_{tr}	Freq. Ress. Est.	$F_{RE} = 1/(2xt_{tr})$
Período na F. Ress.	P_R	Vel./Peso Esp.	$V = V_p/\rho$
		Freq. Ress. observ.	$F_{RO} = 1/P_R$
		% H ₂ O evaporada	$\% H_2O = \frac{P_0 - P_1}{P_0}$

As medidas e resultados de cada lote são assim resumidas em 10 tabelas somando um total de 60 tabelas (6 lotes) que registram os resultados de 360 ENSAIOS-AMOSTRA (1800 valores medidos e 2480 valores calculados).

AMOSTRA 3-3-3

ENSAIO	f	3-1	4-2	5-2	6-2
DATA	220581	280281	171181	201181	261181
COMPRESSÃO	5,73	5,72	5,71	5,71	5,72
DIAMETRO	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99
VOLUME	40,233	40,163	40,093	40,093	40,163
PESO	81,386	80,761	77,542	77,126	81,032
PESO ESPECÍFICO	21,023	20,113	19,322	19,225	20,017
Δt Inicial	16,5	16,5	17,5	18,0	18,0
Velocidade Pulso	3456	3456	3256	3156	3200
F ₀ (PRIMA) Hz	30300	30306	28600	27800	27800
V ₀ / ρ	1,71	1,72	1,68	1,64	1,59
Período na FREQÜÊNCIA DE RESONÂNCIA	33,5	34,5	35,0	34,5	36,0
	33,8	34,7	34,5	34,2	36,25
	33,5	34,2	34,7	34,3	35,5
	33,5	35,0	34,2	34,5	35,8
	33,1	34,7	34,5	35,0	35,5
Módulo	33,6	34,75	34,7	34,5	35,2
	25200	28200	28200	25000	27500
	0,98	0,95	1,01	1,04	1,00
ERR. RELAT.	—	0,76	1,83	5,15	0,43

FIGURA 2.10 - Tabela de anotação de medidas e resultados.

2.4. DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO

2.4.1. Descrição dos Elementos

O dispositivo é projetado para irradiação de amostras em condições controladas de atmosfera, temperatura e pressão. É basicamente composto por três partes (FIGURA 2-11):

- a) TUBO DE IRRADIAÇÃO
- b) TUBO FLEXIVEL
- c) TUBO SUPORTE

a) TUBO DE IRRADIAÇÃO: É constituído por duas partes: tubo de irradiação propriamente dito e "Cabeça" do tubo (FIGURA 2.12):

TUBO PROPRIAMENTE DITO: Tubo de alumínio que aloja as amostras nas condições pré-estabelecidas de atmosfera, pressão e temperatura e as conduz ao caroço do reator;

CABEÇA DO TUBO: Peça de aço inox acoplada ao tubo propriamente dito, que simplifica a instalação e posicionamento das amostras no interior do tubo e possibilita a troca de tubos em irradiações sucessivas sem a remoção das amostras (tubo submerso).

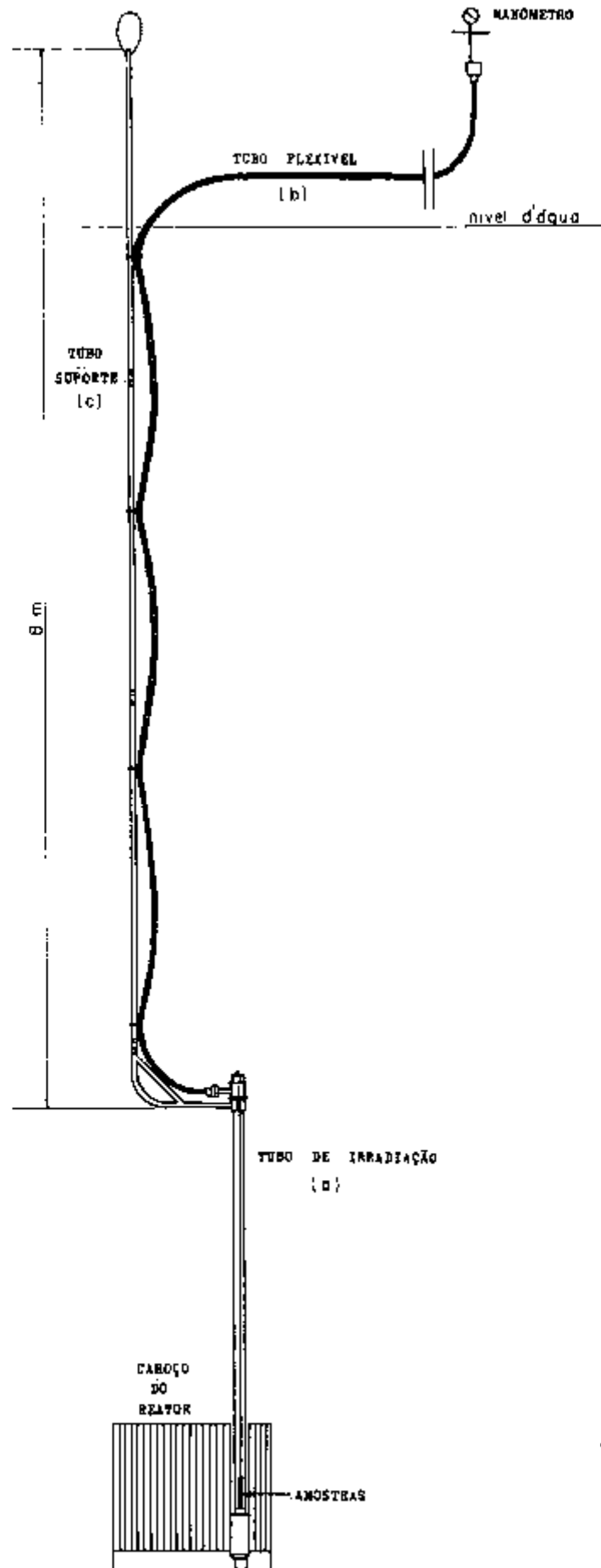


FIGURA 2.11 - Dispositivo de irradiação.

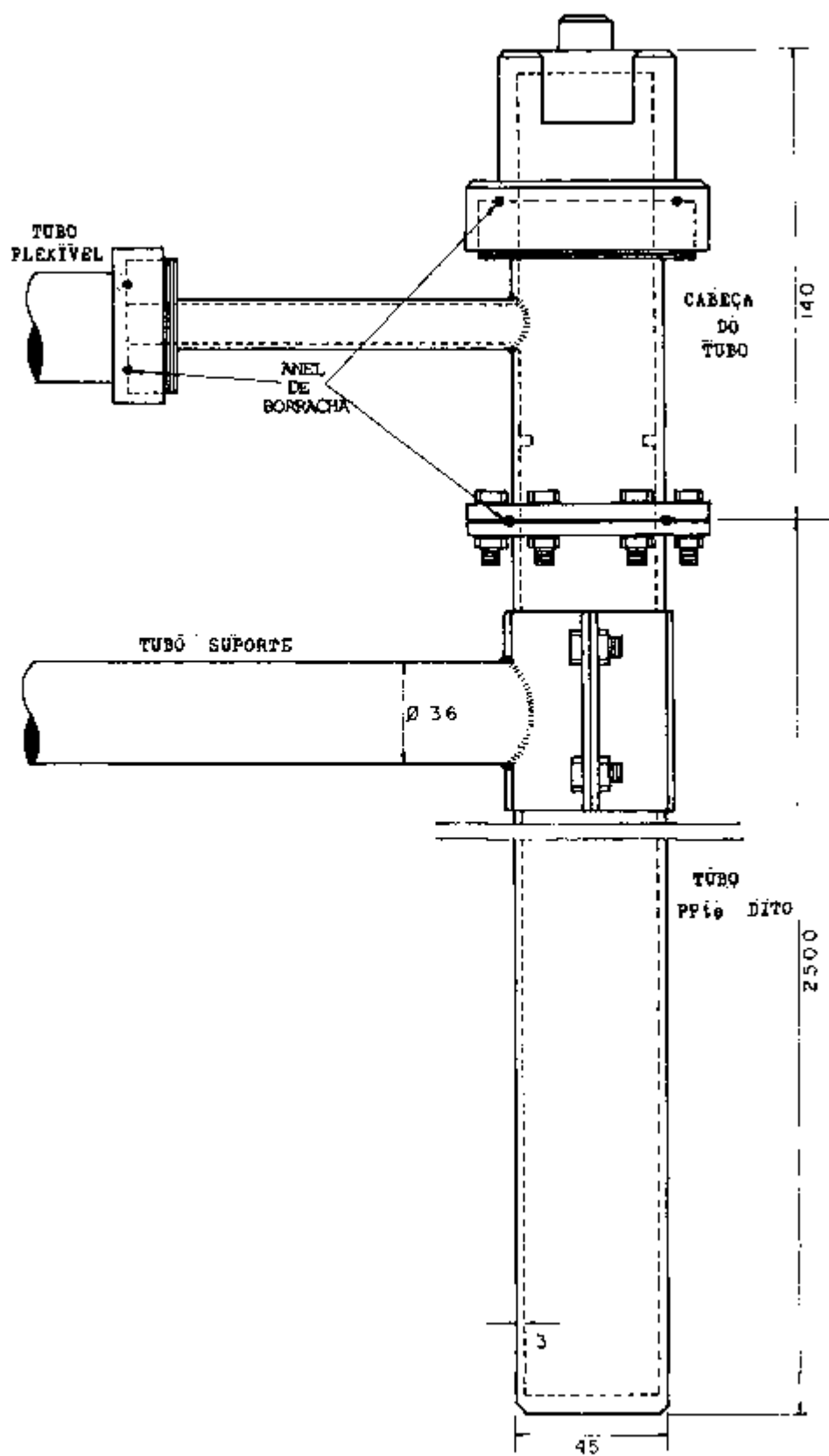


FIGURA 2.12 - Tubo de irradiação.

- b) TUBO FLEXÍVEL: Tubo de borracha com 10m de comprimento e 4 cm de diâmetro (FIGURA 2.13). Em sua extremidade inferior possui rosca estanque para acoplamento à "cabeça" do tubo de irradiação; na extremidade superior dispõe de um sistema de injeção e controle de pressão além de conexões elétricas para dois termopares e um cabo de alimentação do forno para aquecimento de amostras.

OBS.: o forno não foi utilizado neste trabalho.

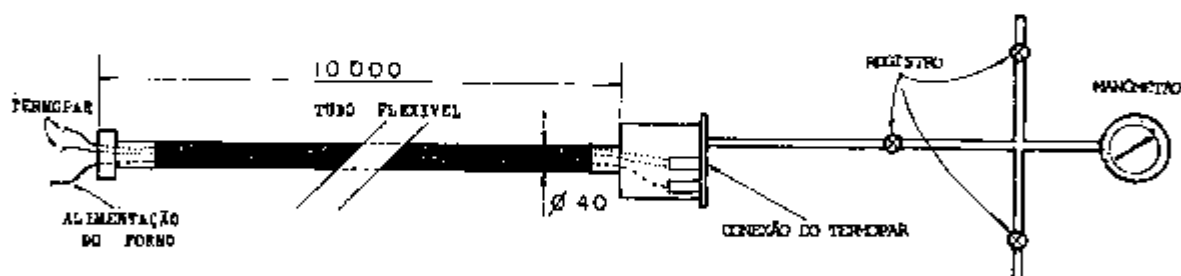


FIGURA 2.13 - Tubo flexível.

- c) TUBO SUPORTE: Composto por três tubos de alumínio dispostos em série (comprimento total 8 m) onde são fixados o tubo de irradiação e o tubo flexível. Tem por função conduzir o tubo de irradiação à posição desejada no caroço do reator.

2.4.2. Instalação das Amostras no Dispositivo

Quatro amostras ($2T_2$ e $2T_3$) sobrepostas alternadamente são alojadas em uma "gaiola" de arame de alumínio recoberto que, por sua vez, é conectada a uma haste de alumínio (L-220 cm, d-0,7 cm). A ponta quente do termo-par inserida entre duas amostras e o conjunto é introduzido no tubo de irradiação. A posição das amostras é regulada pelo posicionamento de um "estrêla" de lucite na extremidade superior da haste (FIGURA 2.14). A solda do termo-par (amostras x tubo flexível) é feita pela abertura no topo da "cabeça do tubo".

Terminada a instalação o tubo é herméticamente fechado e, pelo tubo flexível, injeta-se argônio à pressão de 1,5 atm. Estanqueidade é verificada submergindo-se o tubo de irradiação na piscina do reator; observa-se a formação de bolhas de ar nas conexões e a estabilidade da pressão indicada pelo manômetro em um período de pelo menos 18 horas.

O sistema de referência do termo-par associado a um registrador (APÊNDICE 4) é conectado à extremidade superior do tubo flexível e efetua-se um teste geral de funcionamento.

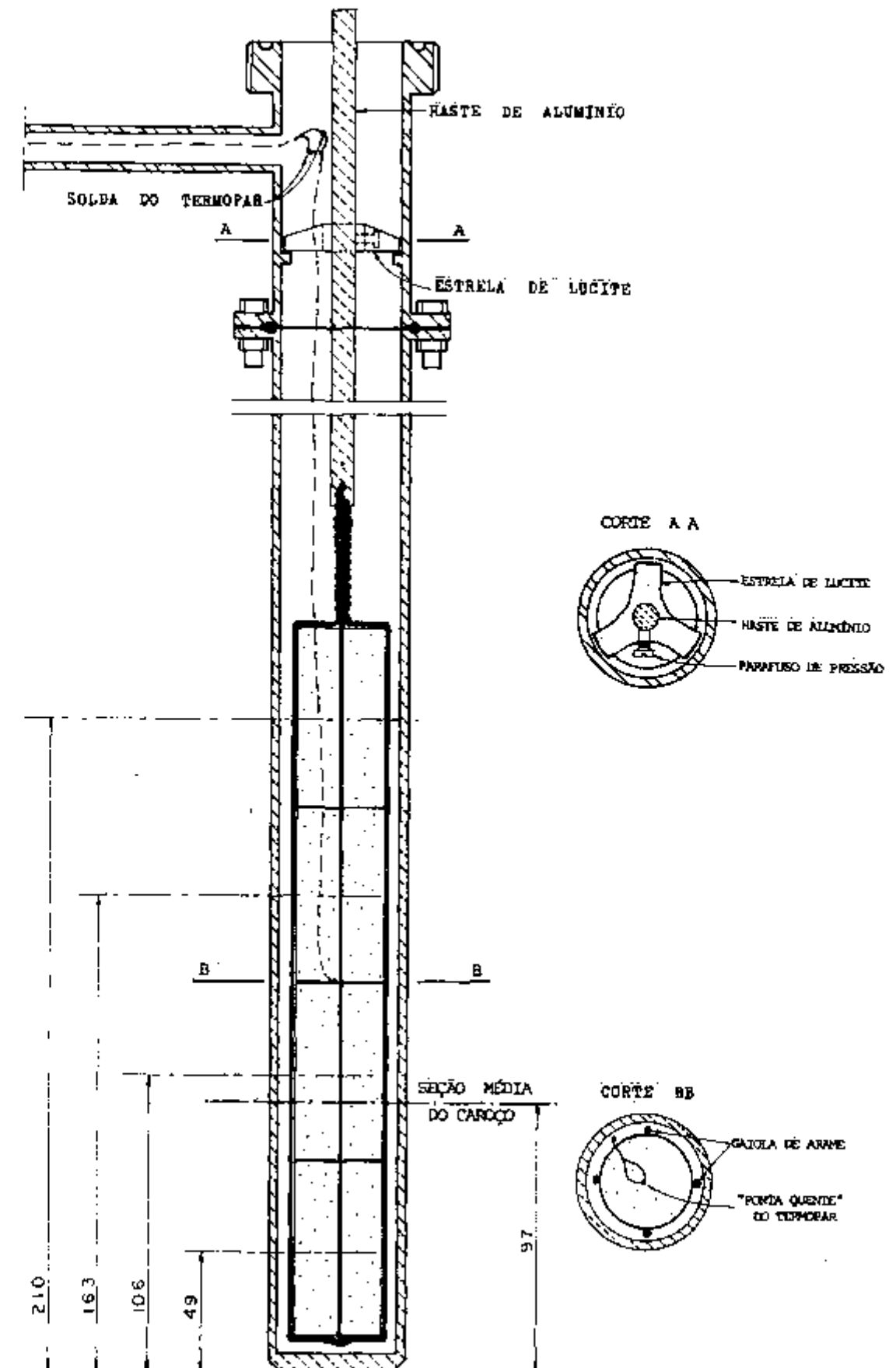


FIGURA 2.14 - Instalação das amostras no dispositivo de irradiação.

2.4.3. Posicionamento das Amostras no Caroço

A irradiação é feita no IEA-R1, reator de pesquisas tipo piscina, de 2 MW de potência.

Com auxílio de uma ponte rolante, o dispositivo é transportado e inserido no GRESIL II, PLUG A-20, posição 42 do caroço do reator (FIGURA 2.15).

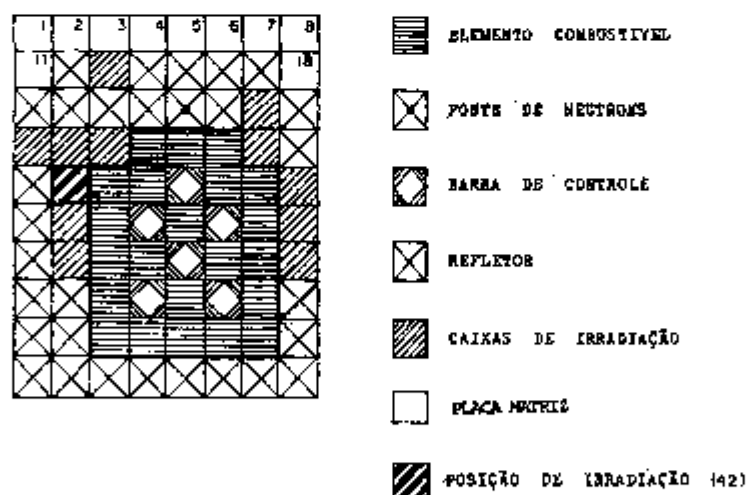


FIGURA 2.15 - Mapa do caroço: localização do dispositivo de irradiação no caroço do reator (posição de irradiação) IEA-R1.

O fluxo de neutrons no caroço varia em função de diversos fatores como posição do GRESIL, cota do ponto considerado, posição das barras de controle, estado e configuração dos elementos combustíveis e configuração*. As amostras de cimento são posicionadas no tubo de irradiação de modo a se localizarem na seção média vertical do caroço, onde o fluxo de neutrons é máximo (FIGURA 2.16).

* do caroço em geral.

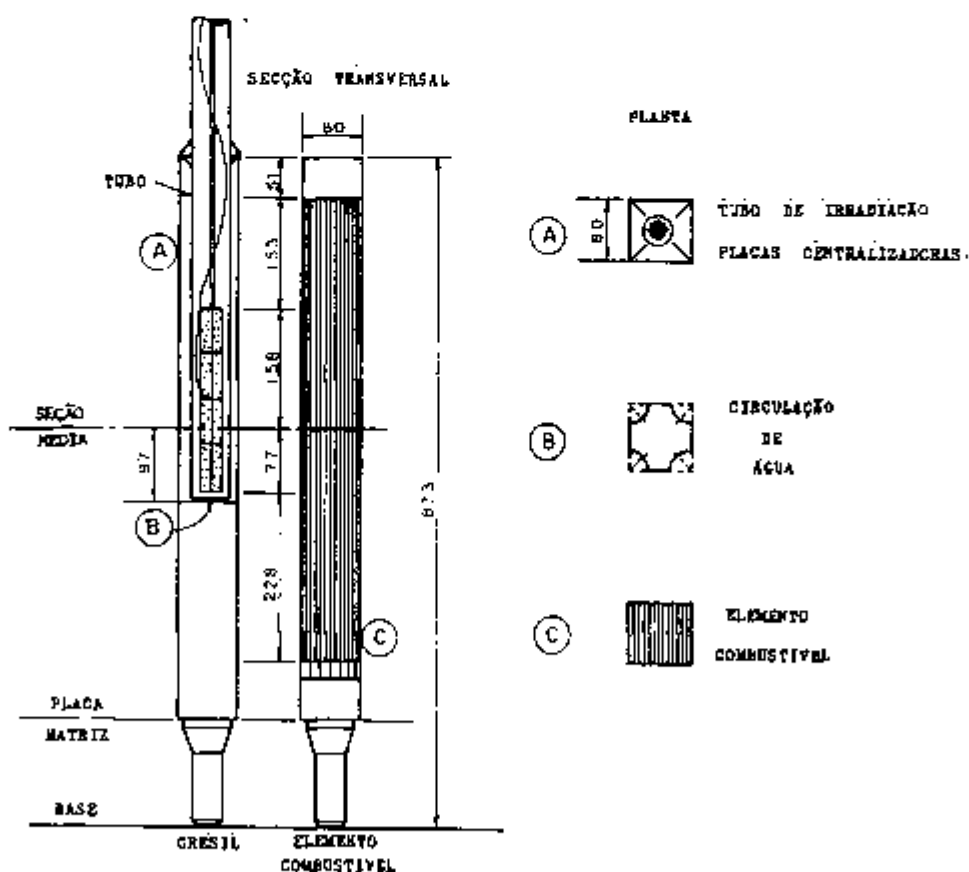


FIGURA 2-16 - Posição das amostras no caroço do reator

O fluxo em cada amostra é tomado como a média de fluxos a cada centímetro, calculado a partir do fluxo instantâneo médio em um período de 2 horas de irradiação (FIGURA 2.17).

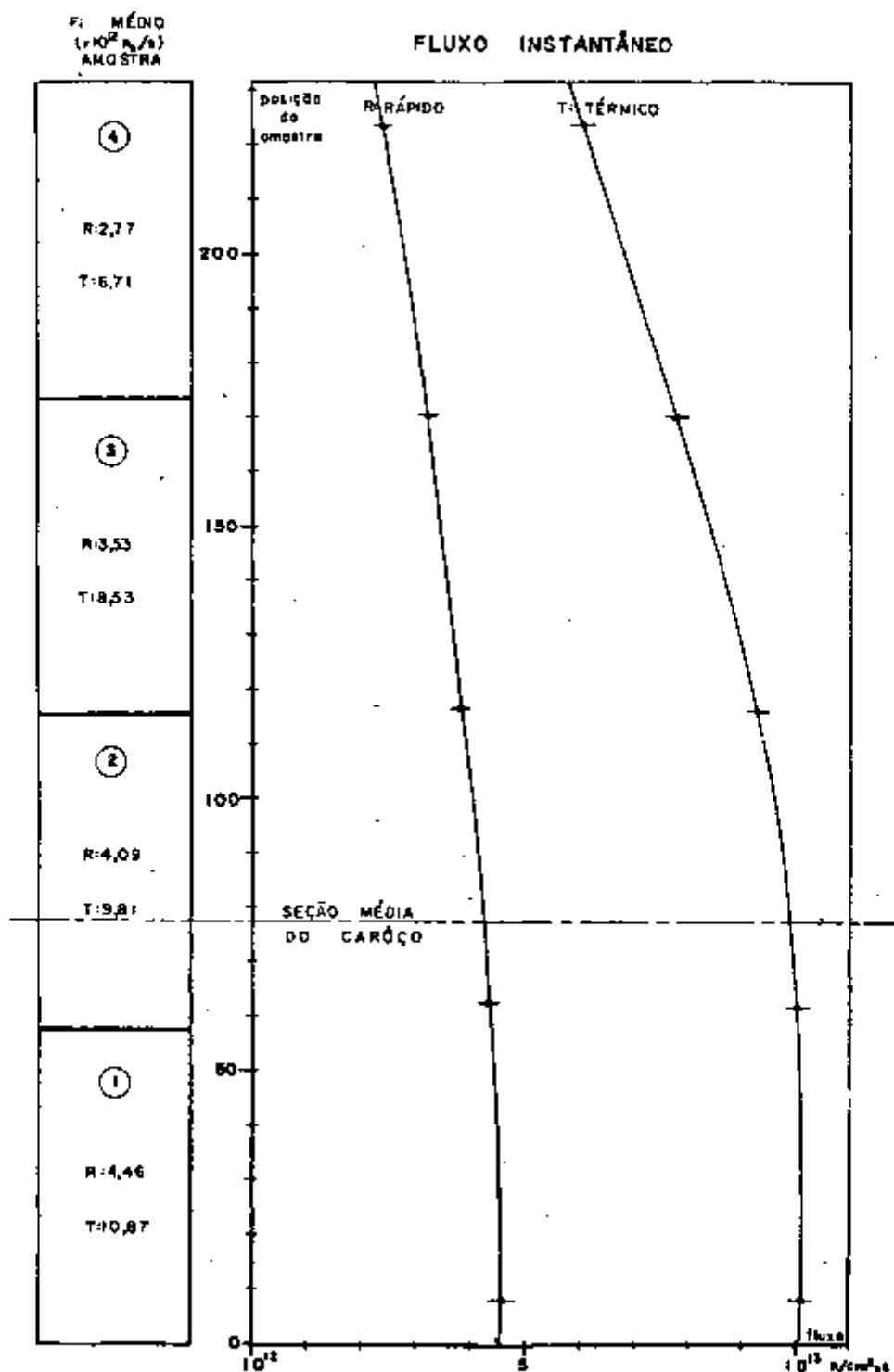


FIGURA 2.17 - Fluxo instantâneo médio em cada amostra no cargo do reator IEA-R1
 R = fluxo rápido.
 T = fluxo Térmico.

2.5. IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS

2.5.1. Tempo de Irradiação

É estabelecido em função da ordem de grandeza da dose desejada, do fluxo de neutrons rápidos na posição de irradiação, do tempo disponível para irradiação e, em parte, do grau de ativação das amostras e o conseqüente período de decaimento necessário (APÊNDICE 2):

<u>TEMPO DE IRRADIAÇÃO</u>	<u>FLUXO INTEGRADO OBTIDO</u>	
	Térmico (nvt)	Rápido (nvt)
1 segundo	$9,00 \times 10^{12}$	$3,70 \times 10^{12}$
1 semana	$1,20 \times 10^{18}$	$4,80 \times 10^{17}$
2 meses	$1,02 \times 10^{19}$	$4,17 \times 10^{18}$

O tempo de irradiação no presente trabalho foi limitado à 1 semana (40 horas). A simulação de fluxos de reatores operacionais implica em períodos de irradiação: entre 2 meses e 2 anos no IEA-R1.

Em virtude de o tempo de operação do reator não ser igual a cada ciclo de operação (1 dia), o tempo total de irradiação (5 ciclos) não é o mesmo para todos os lotes. Esta variação reflete-se no fluxo integrado em cada amostra (FIGURA 4.1, item 4.1.1):

<u>FI</u>	<u>TÉRMICO</u>	<u>RÁPIDO</u>
	$\times 10^{18}$ nvt	$\times 10^{17}$ nvt
MAX	1,53	8,52
MIN	0,81	3,34

2.5.2. Irradiação das Amostras

As amostras são irradiadas nas seguintes condições-padrão:

ATMOSFERA: ar + argônio

TEMPERATURA: -170°C

PRESSÃO: 1,5 atm

OBS.: A irradiação em atmosfera seca, de gás inerte, exagera a perda de umidade do cimento causando elevada taxa de retração e fissuras,(51).

A operação de irradiação é descrita no APÊNDICE 2 .

2.5.3. Temperatura de Irradiação

A atenuação da radiação gama no cimento gera calor que causa elevação de temperatura na amostra. Esta temperatura, segundo indicado pelo sistema do termo-par, oscila entre 150 e 170°C durante a irradiação.

O estudo da temperatura é de grande importância no caso do cimento, visto ser este um material de grande sensibilidade à ação do calor, que expulsa a água livre e água intersticial e, em alguns casos, a água combinada nos compostos hidratados causando distorções na micro-estrutura e criando tensões térmicas, micro-fissuras e fissuras na pasta de cimento. Estes efeitos são considerados no APÊNDICE 4 .

3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. CÁLCULO DOS RESULTADOS

O cálculo final de resultados, incluindo médias e desvio padrão, é feito em computador (IBM 370/ IPEN) com precisão dupla (8 dígitos) utilizando-se o programa S.A.S. (Statistical Analysis System). A precisão real dos valores calculados é fornecida pela análise de propagação de erros (APÊNDICE 5). As médias assim calculadas são dispostas em gráficos para análise comparativa (cap. IV). Uma descrição sumária do programa é apresentada a seguir.

3.1.1. Entrada de Dados

As medidas tomadas nos ENSAIOS são codificadas sob formato apropriado simplificando as operações a serem efetuadas pelo computador: uma matriz - tabela com 360 linhas e 10 colunas resume os resultados experimentais obtidos.

3.1.2. Operações

Os resultados são calculados por operações entre colunas de dados (Exemplo):

$$\text{VOLUME} = \left| \text{ALTURA} \times \text{DIÂMETRO} \times \text{DIÂMETRO} \times \pi \right| \div 4$$

O programa calcula também a média, desvio padrão e outros, em cada etapa de ENSAIO de cada TIPO de procedimento.

3.1.3. Tabela de Resultados

Os valores calculados (resultados e médias) são impressos pelo computador sob forma de tabelas:

1 tabela de resultados: 360 linhas - 9 colunas.

60 tabelas de médias*: 16 linhas - 9 colunas.

A partir dessas tabelas elabora-se quadros de médias por características desejadas: volume, velocidade de pulso, etc...

3.2. DIAGRAMAS DE COMPORTAMENTO

Os diagramas de comportamento (gráficos) utilizados para análise comparativa são elaborados a partir dos quadros de médias por características. O comportamento de cada característica no desenvolvimento do programa de ENSAIOS é, assim, visualizado em um ou mais dos seguintes tipos de gráficos, construídos para cada característica:

OBS.: os pontos representando as médias são ligados por traços a fim de facilitar a visualização do comportamento, não im

* (5 TIPOS - 6 ENSAIOS - 2 QUALIDADES DE CIMENTO)

plicando em variação linear de características entre os ENSAIOS.

3.2.1. Médias e Desvio Padrão

Visualiza-se o comportamento das médias em cada TIPO de procedimento, incluindo o desvio padrão de cada média (80 gráficos).

OBS.: não são apresentados neste trabalho.

3.2.2. Superposição dos TIPOS

Os 80 gráficos de médias e desvio padrão são resumidos em 16 gráficos de superposição dos TIPOS, facilitando a análise comparativa. O desvio padrão médio é indicado no canto superior direito do quadro (cap. 4).

3.2.3. Características Interdependentes

Acompanha-se, em cada TIPO de procedimento, o comportamento da relação entre características interdependentes como velocidade de pulso e Peso Esp., frequência de ressonância e Peso Esp., Velocidade de pulso e frequência de ressonância; observando-se a alteração predominante em cada ETAPA do programa de ENSAIOS (15 gráficos - não serão apresentados neste trabalho).

3.2.4. Superposição de Características Interdependentes

Permite a observação de correlações entre as características (tendência de variação).

3.2.5. Dados Emparelhados

Apenas as características fundamentais são analisadas (velocidade de pulso e frequência de ressonância). Resumem, em essência, os resultados obtidos.

OBS.: Emparelhamento de dados é a observação de alterações das características de uma mesma amostra no decorrer do processo estudado.

3.2.6. Convenção de Traços Empregadas

TIPO 1 - ar livre	_____
TIPO 2 - irradiação saturada
TIPO 3 - irradiação seca	-----
TIPO 4 - simulação de temperatura	_____
TIPO 5 - controle de temperatura ; influência da secagem prévia em estufa.	_____

3.3. ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE ERROS

Em virtude da precisão de leitura das medidas, surge um erro que é propagado aos valores calculados com estas medidas. A análise de erros aqui desenvolvida visa determinar a precisão real dos valores calculados e é apresentada no APÊNDICE 6.

O quadro abaixo resume os resultados da análise:

VALORES MEDIDOS	UNIDADE	PRECISÃO DE LEITURA
Altura	cm	$h, hh \pm 0,005$
Diâmetro	cm	$d, dd \pm 0,005$
Peso	gf	$pp, ppp \pm 0,0005$
Tempo de trânsito	μs	$tt, t \pm 0,2$
Período de Ressonância	μs	$tt, t \pm 0,2$

VALORES CALCULADOS	UNIDADE	PRECISÃO
Volume	cm^3	$VV, V \pm 0,04$
Peso específico	gf/cm^3	$pp, pp \pm 0,007$
Velocidade de pulso	km/s	$Vp, VpVp \pm 0,043$
Freq. Ress. Calculada	Hz	$FeFe, Fe \pm 0,04$
Velocidade/Peso Específico	$m/s/kg/m^3$	$r, rr \pm 0,026$
Freq. Ress. Medida	Hz	$FoFo, Fo \pm 0,2$
FRO/FRe	%	$f, ff \pm 0,02$
% H ₂ O	%	$i, ii \pm 0,07\%$
Módulo elásticidade di- nâmico	-	$E E E \pm 6$

3.4. INFLUÊNCIA DA DOSE ATINGIDA

Cada amostra irradiada é submetida a um fluxo integrado que depende de sua posição no caroço de reator e do tempo total de irradiação característico ao lote (item 2.5.1) . A

amplitude de variação do fluxo integrado nas amostras é cerca de uma ordem de grandeza (8x). Esta dispersão pode ser considerada desprezível frente à magnitude do fluxo integrado, da ordem de 10^{18} nvt.

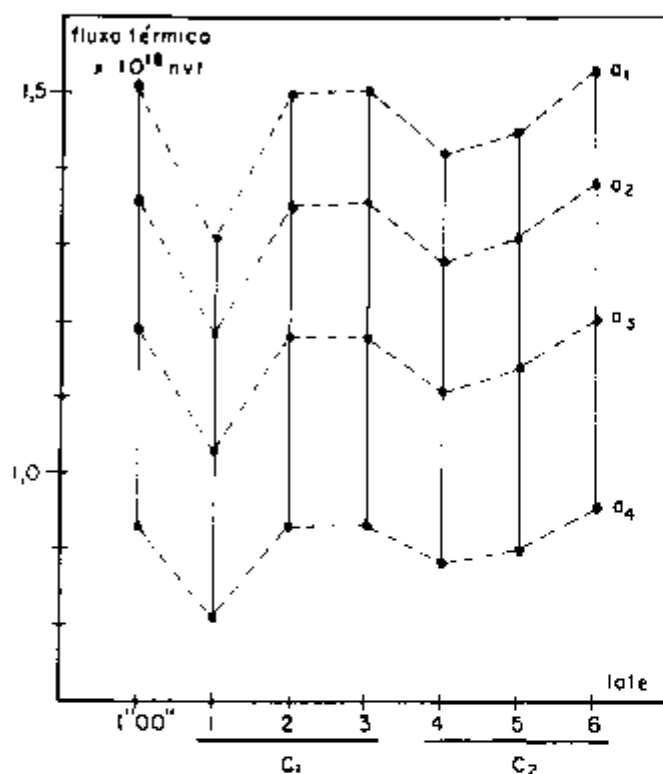


FIGURA 3.1 - Fluxo integrado térmico nas amostras irradiadas.

OBS.: o fluxo instantâneo varia no decorrer dos ciclos de operação do reator; o fluxo integrado é uma estimativa teórica feita a partir do fluxo instantâneo médio (em 2 horas de irradiação) em cada amostra; o fluxo integrado real aproxima-se do fluxo teórico, segundo indica a ativação das amostras (FIGURA A2.2).

OBS.: a₁ e a₃ → TIPO 2 → saturada

a₂ e a₄ → TIPO 3 → seca em estufa

O efeito desta dispersão na alteração de densidade e

velocidade de pulso das amostras em condição saturada (E_1-E_6) pode ser observada nas FIGURAS 3.2 e 3.3.

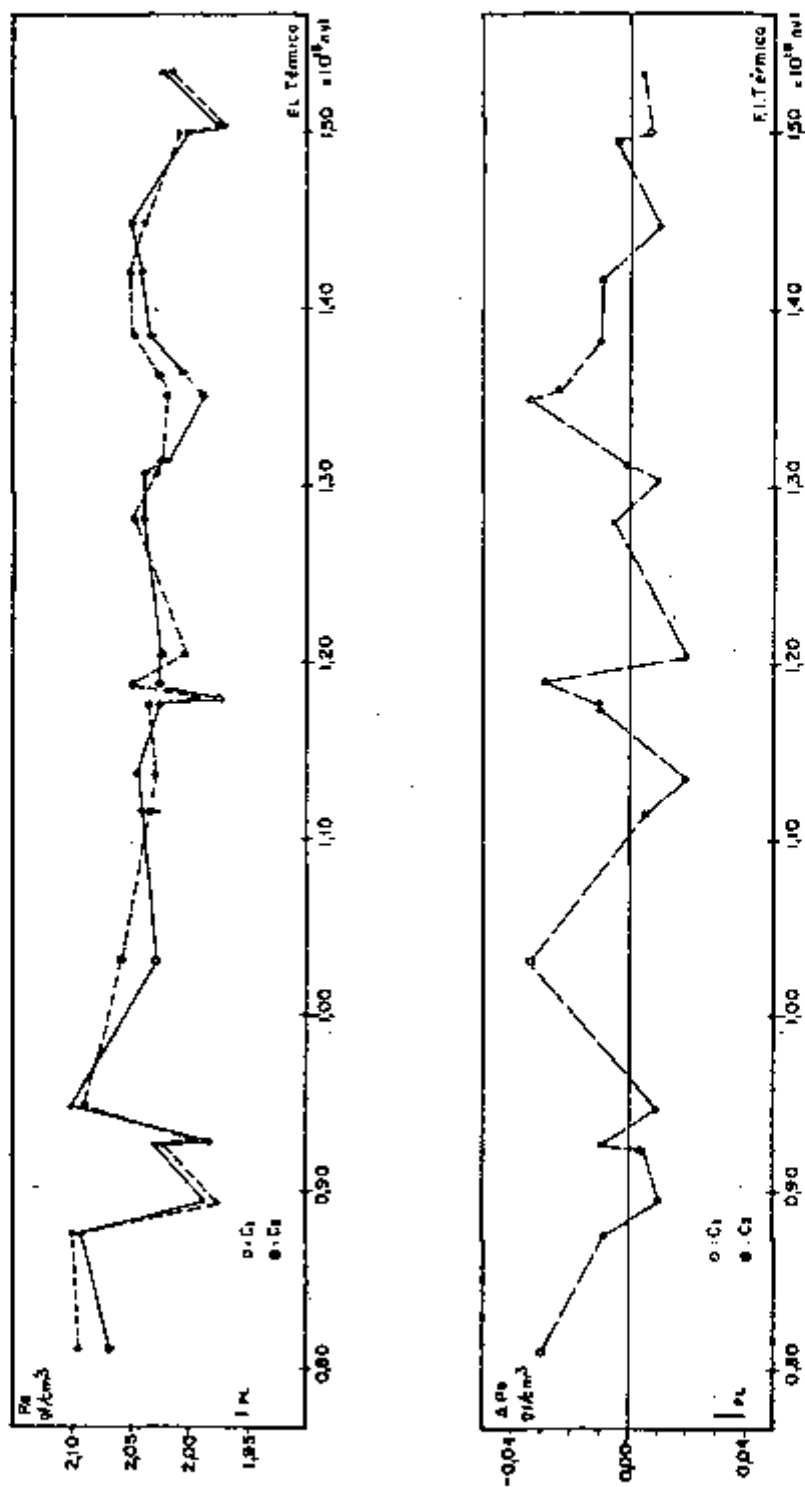


FIGURA 3.2 - Variação do peso específico nas amostras irradiadas .

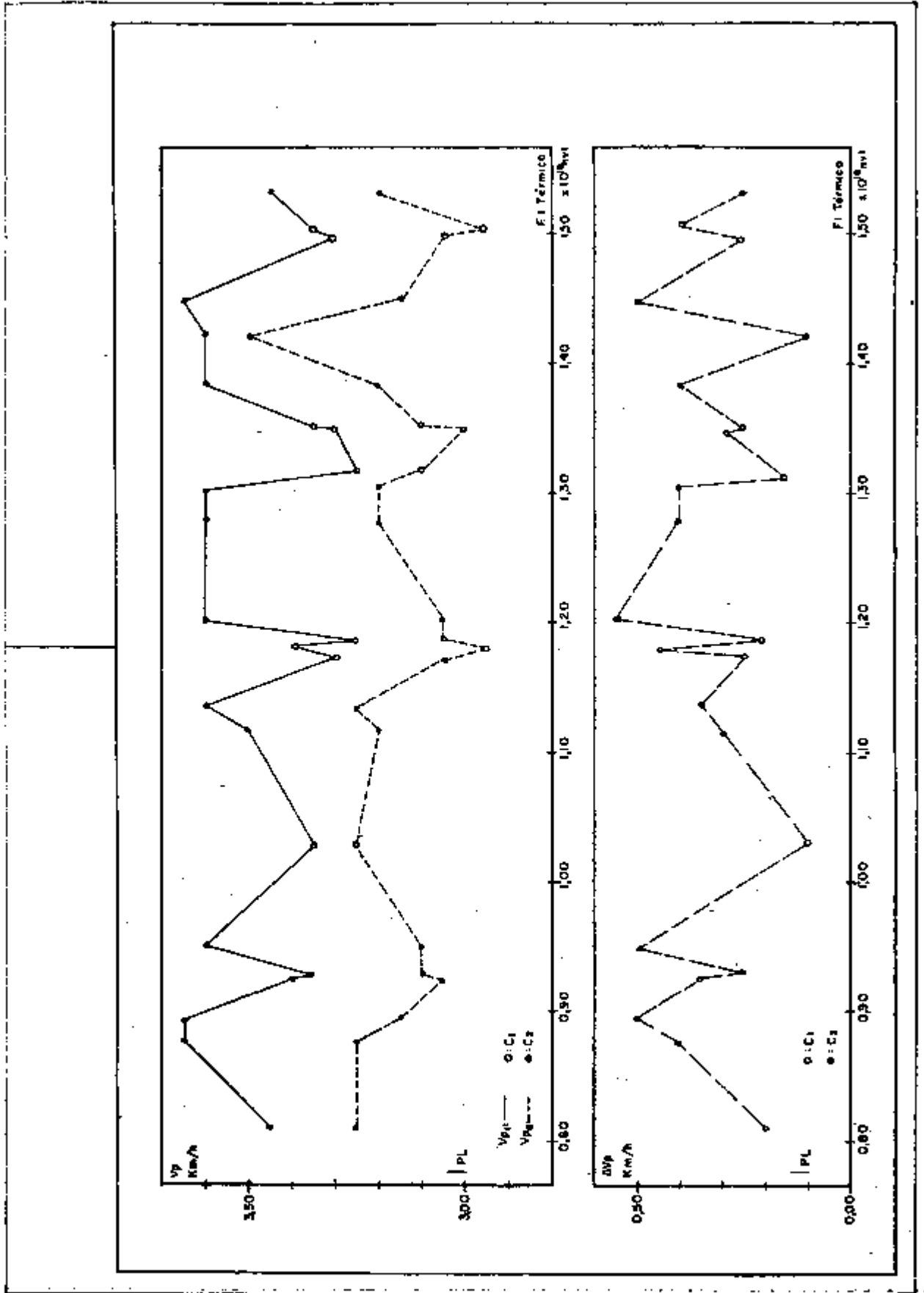


FIGURA 3.3 - Variação da velocidade de pulso nas amostras irradiadas.

As diferentes doses recebidas pelas amostras não causam tendência observável de alteração do peso específico ou velocidade de pulso.

A alteração do peso específico é menor que $0,03\text{gf/cm}^3$ sendo, portanto, da magnitude da precisão de leitura. A alteração na velocidade de pulso varia entre 0,10 e 0,55 Km/s não apresentando tendência de variação com o fluxo integrado.

4 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. DADOS EMPARELHADOS

4.1.1. Frequência de Ressonância

A dispersão dos resultados indicada pela distribuição das médias e amplitude do desvio padrão torna o teste inconclusivo (FIGURA 4.1 - TABELA 4.1). De maneira geral, pode-se dizer que a perda de umidade devido à radiação (T_2) ou secagem em estufa ($T_{3,4,5}$) afeta mais sensivelmente o resultado que a secagem ao ar livre.

TABELA 4.1 - Redução da frequência de Ressonância entre E_1 e E_6 .

OBS.: PL = 0,2 KHz.

CIMENTO 1		
TIPO	FR (KHz)	S (KHz)
1	1,0	0,8
2	2,5	0,4
3	3,5	1,4
4	4,0	0,9
5	3,7	1,1

CIMENTO 2		
TIPO	FR (KHz)	S (KHz)
1	1,2	0,6
2	2,1	0,9
3	2,9	0,3
4	3,2	0,9
5	3,7	0,7

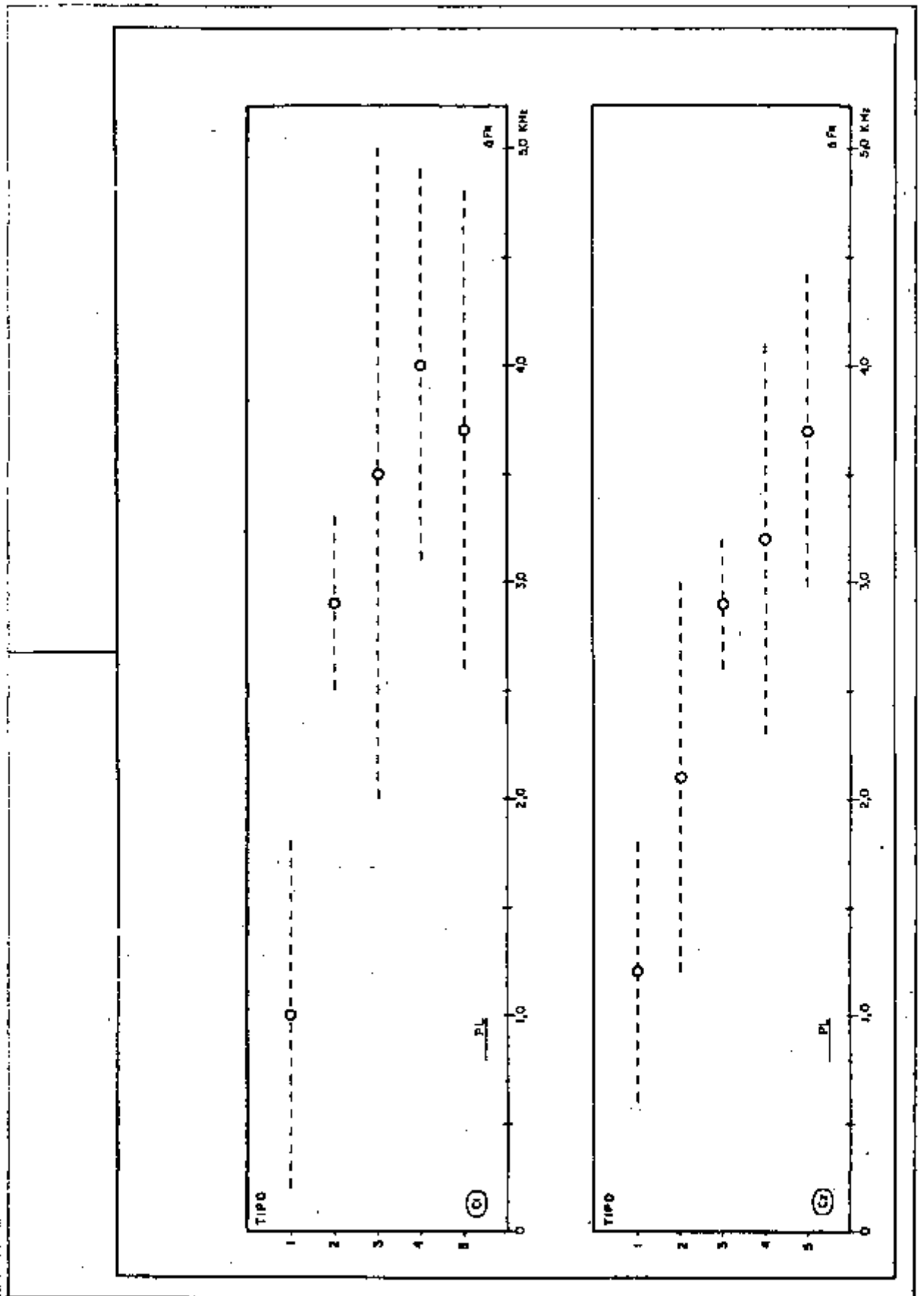


FIGURA 4.1 - Redução na frequência de ressonância das amostras entre E_1 e E_6 .

4.1.2. Velocidade de Pulso

A alteração da velocidade de pulso é aproximadamente a mesma para todos os tipos de procedimento (exceto tipo 1 - controle) tomando-se cada cimento separadamente. (TABELA 4.2 - FIGURA 4.2).

É provável que esta alteração (redução da V_p) seja causada pela modificação na estrutura da pasta devido à perda de água por ocasião do tratamento térmico ($T_{3,4,5}$) ou irradiação (T_2).

TABELA 4.2 - Redução da velocidade de pulso entre E_1 e E_6 .
OBS.: PL = 40 m/s.

CIMENTO 1		
TIPO	V (m/s)	S (m/s)
1	0	50
2	300	120
3	240	90
4	260	60
5	250	70

CIMENTO 2		
TIPO	V (m/s)	S (m/s)
1	70	30
2	360	120
3	430	50
4	360	50
5	430	80

Observa-se uma maior redução na V_p em todos os TIPOS de procedimentos com o cimento C_2 . Este fato pode estar ligado a duas causas:

a) O cimento C_1 , já no ENSAIO E_1 , apresenta velocidade de pulso reduzida (item 4.2.4) devido à presença de grãos não hidratados em maior quantidade e provavelmente de maiores dimensões;

b) A massa de cimento mais severamente afetada pela temperatura ($T_{2,3,4,5}$) e/ou secagem ao ar livre (T_1 , T_2), (massa hidratada) é maior em C_2 .

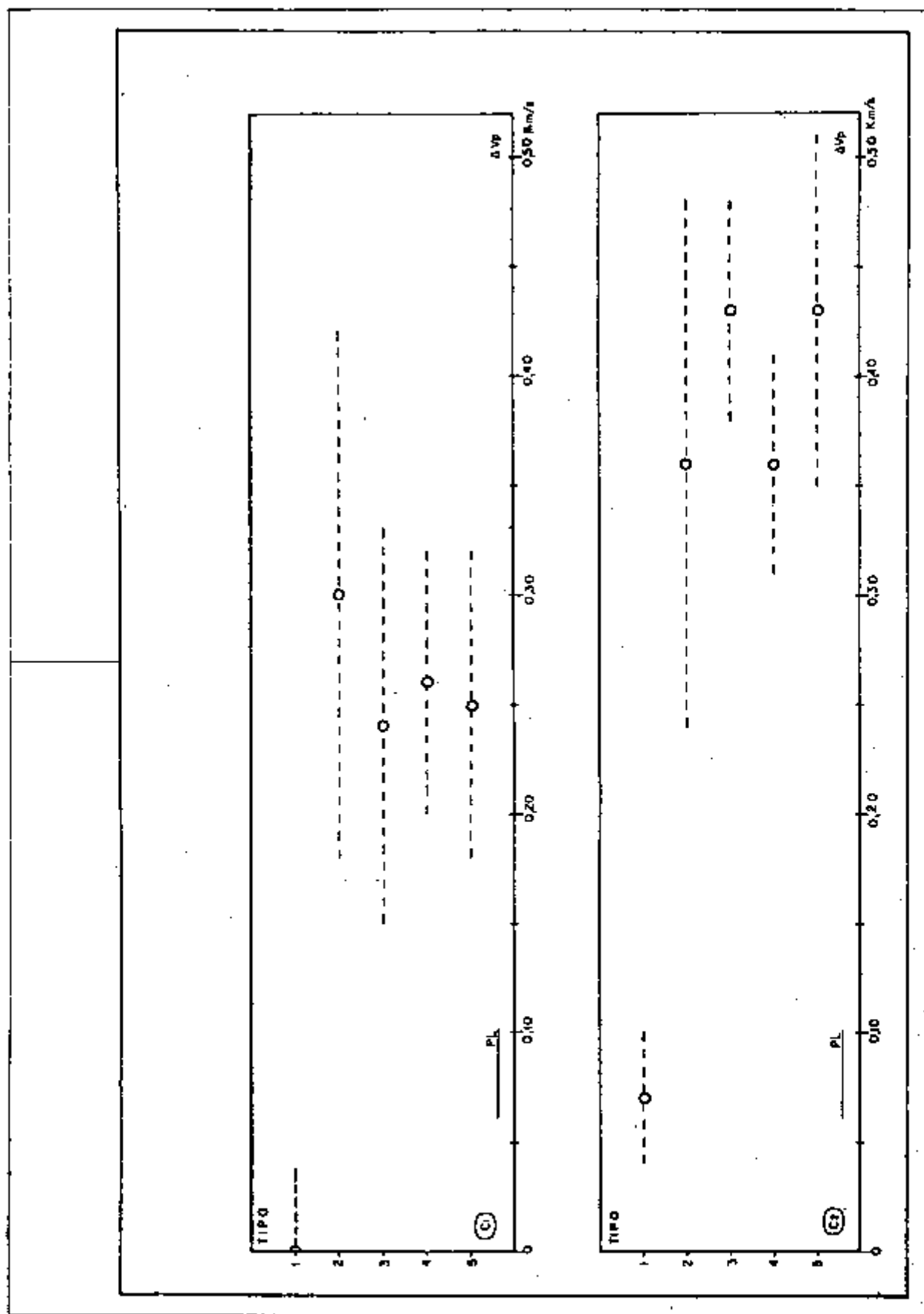


FIGURA 4.2 - Redução da velocidade de pulso das amostras entre E_1 e E_2 .

4.2. DADOS NÃO EMPARELHADOS

OBS.: Para correta interpretação dos gráficos apresentados a seguir, consultar item 4.3.2, FIGURA 2.9.

4.2.1. Volume

O menor volume das amostras moldadas com C_1 pode ser atribuído à maior exudação (perda de água) causada pelo menor grau de hidratação da pasta devido ao maior volume de grãos não hidratados.

A dispersão dos resultados entretanto leva a um volume médio para todas as amostras em torno de 40 cm^3 (TABELA 4.3).

TABELA 4.3 - Variação de volume das amostras de cimento.
 $PL \pm 0,2 \text{ cm}^3$.

CIMENTO 1			CIMENTO 2		
TIPO	VOLUME (cm^3)	S (cm^3)	TIPO	VOLUME (cm^3)	S (cm^3)
1	39,8	2,0	1	40,6	1,5
2	39,4	2,0	2	41,0	0,8
3	38,6	1,7	3	40,6	1,4
4	39,6	0,8	4	40,3	1,6
5	39,1	1,8	5	39,5	1,0
MÉDIA	39,3	1,7	MÉDIA	40,4	1,3

Observa-se que o volume médio mantém-se constante no desenvolvimento dos ENSAIOS em todos os TIPOS de procedimentos. Considera-se que, dentro da precisão das medidas, não há alteração de volume em cada amostra em particular (FIGURA 4.3).

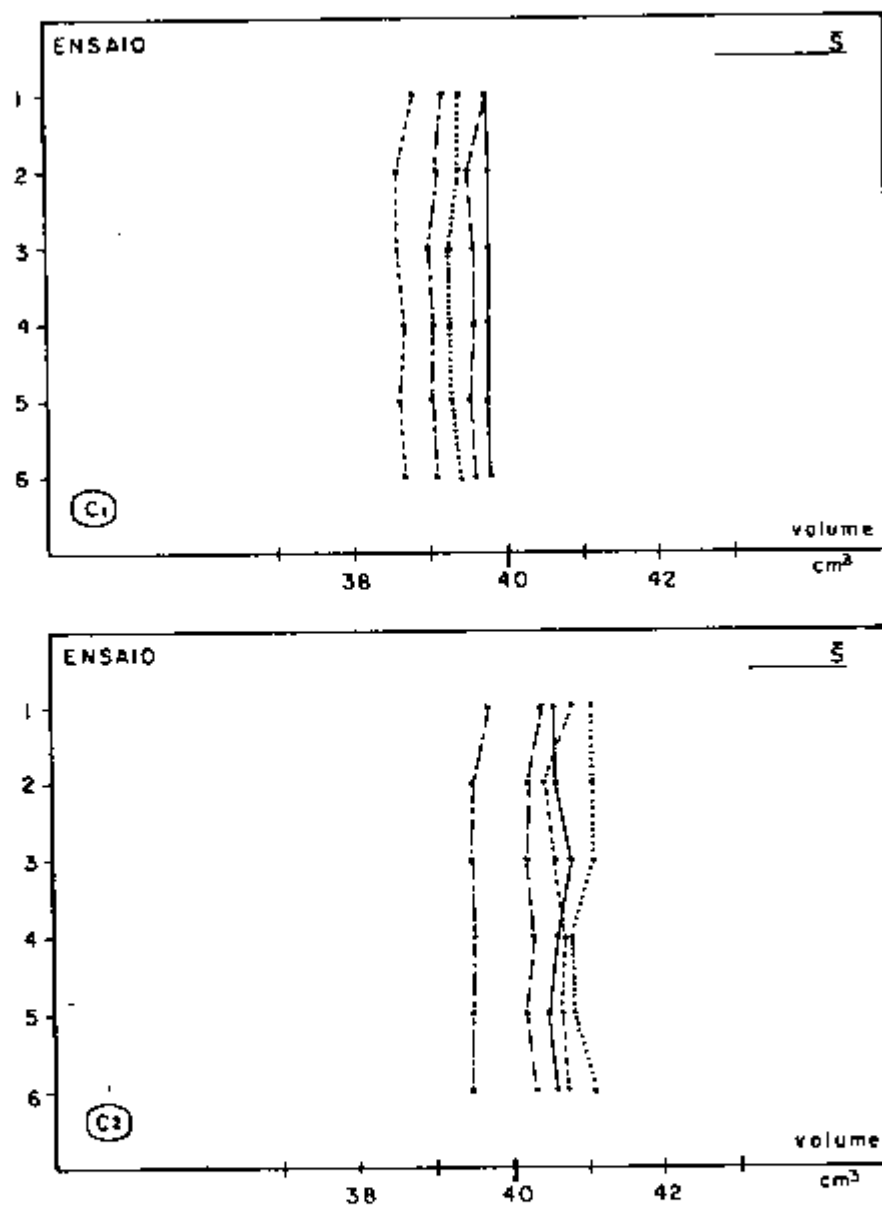


FIGURA 4.3 - Variação de volume das amostras de cimento -
 desvio padrão: $C_1: \pm 1,7 \text{ cm}^3$
 $C_2: \pm 1,3 \text{ cm}^3$

4.2.2. Porcentagem de Água Evaporada

A porcentagem de água livre, em peso, perdida pela amostra em cada etapa do programa de ENSAIOS é indicada neste diagrama. Toma-se como referência a amostra saturada: 0,00% H₂O.

OBS.: Neste caso há emparelhamento de dados, (FIGURA 4.4).

A perda de água em C₁ após secagem em estufa é ligeiramente maior que em C₂ possivelmente devido à maior quantidade de água não combinada (maior massa de grãos não hidratados).

A porcentagem de água é aproximadamente a mesma nos ENSAIOS 1 e 6 (T_{1,2,3,4,5}) e 2 e 5 (T_{3,4,5}) respectivamente.

TABELA 4.4 - Variação da porcentagem de água evaporada nas amostras de cimento.

$$PL = \pm 0,0002.$$

CIMENTO 1			CIMENTO 2		
ENSAIO	% H ₂ O	S	ENSAIO	% H ₂ O	S
1	0,0	-	1	0,0	-
2	19,0	0,5	2	17,2	0,3
3	17,5	1,0	3	15,2	0,8
4	-	-	4	-	-
5	18,5	0,5	5	16,8	0,5
6	0,5	0,2	6	0,3	0,2

Considera-se reprodutíveis as condições de umidade nos ENSAIOS 1 e 6 (saturado) e 2 e 5 (seca em estufa). O ENSAIO 3 é feito após certa permanência em atmosfera ambien-

te (APÊNDICE 6) e não será considerado na análise comparativa ; indica apenas a absorção de umidade do ar pelas amostras. O ENSAIO 4 é feito após permanência de 45-70 dias em atmosfera ambiente (decaimento na sala do reator).

A porcentagem de água neste ENSAIO (E-4) estabiliza-se segundo o quadro abaixo:

TABELA 4.5 - Porcentagem de água evaporada nas amostras de cimento no ENSAIO 4.

$$PL = \pm 0,0002.$$

CIMENTO 1		
TIPO	% H ₂ O	S
1	7,0	0,5
2	9,3	3,2
3	13,5	4,2
4	13,5	0,5
5	13,5	0,5

CIMENTO 2		
TIPO	% H ₂ O	S
1	5,0	0,3
2	8,0	4,4
3	9,3	3,0
4	12,6	0,4
5	12,9	1,8

A comparação dos resultados é feita então nos ENSAIOS 1 e 6 ; e 2 e 5, respectivamente saturado e seco em estufa . No ENSAIO 4 a dispersão dos resultados não permite um estudo comparativo confiável.

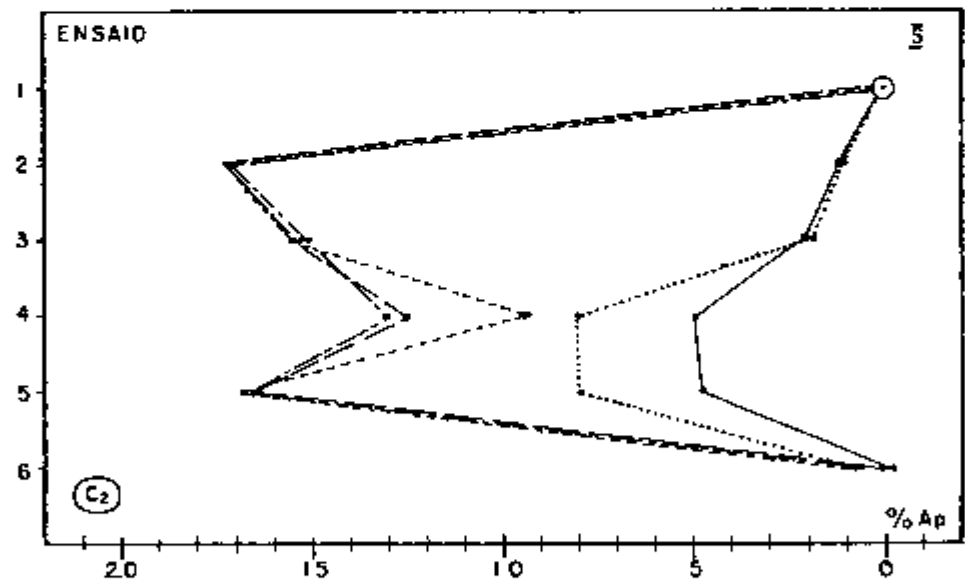
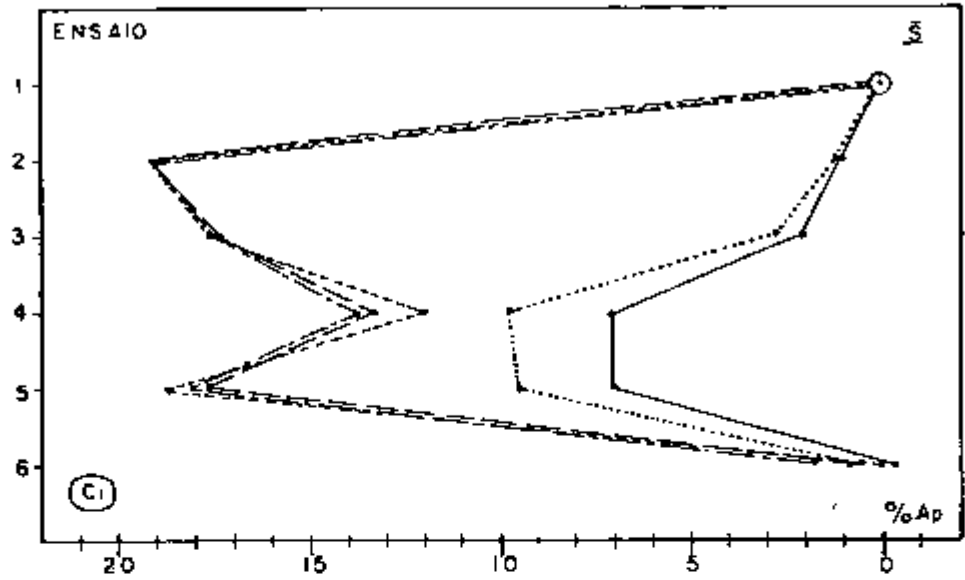


FIGURA 4.4 - Porcentagem de água evaporada nas amostras de cimento - desvio padrão médio: $C_1 = 0,55$
 $C_2 = 0,36$

4.2.3. Peso Específico

Esta característica afeta particularmente os resultados do teste de velocidade de pulso. Nos ENSAIOS 1 e 6 (amostras saturadas) de todos os TIPOS de procedimento apresenta resultados aproximadamente iguais em C_1 e C_2 (diferença da ordem do desvio padrão), enquanto nos ENSAIOS 2 e 5 (secas em estufa) os resultados encontrados em C_2 são ligeiramente maiores (2 x desvio padrão), (TABELA 4.6).

Considera-se perfeitamente reproduzíveis as condições de peso específico das amostras nos ENSAIOS 1 e 6 ($T_{1,2,3,4,5}$) em C_1 e C_2 simultaneamente e nos ENSAIOS 2 e 5 ($T_{3,4,5}$) em C_1 e C_2 individualmente (FIGURA 4.5).

TABELA 4.6 - Variação do peso específico das amostras de cimento.

$$PL = \pm 0,01$$

CIMENTO 1			CIMENTO 2		
ENSAIO	p (gf/cm ³)	S(gf/cm ³)	ENSAIO	p(gf/cm ³)	S(gf/cm ³)
1	2,03	0,03	1	2,05	0,02
2	1,66	0,03	2	1,71	0,02
3	1,68	0,04	3	1,74	0,03
4	*	*	4	*	*
5	1,67	0,03	5	1,72	0,02
6	2,03	0,03	6	2,04	0,02

* A dispersão das médias no ENSAIO 4 não permite comparação de resultados (TABELA 4.7).

Os resultados dos ENSAIO 3 são considerados apenas para indicação de absorção de umidade do ar.

TABELA 4.7. - Peso específico no ENSAIO 4.

CIMENTO 1		
TIPO	p(gf/cm ³)	S(gf/cm ³)
1	1,88	0,05
2	1,81	0,07
3	1,82	0,07
4	1,77	0,03
5	1,75	0,03

CIMENTO 2		
TIPO	p(gf/cm ³)	S(gf/cm ³)
1	1,94	0,01
2	1,89	0,10
3	1,86	0,08
4	1,81	0,03
5	1,82	0,02

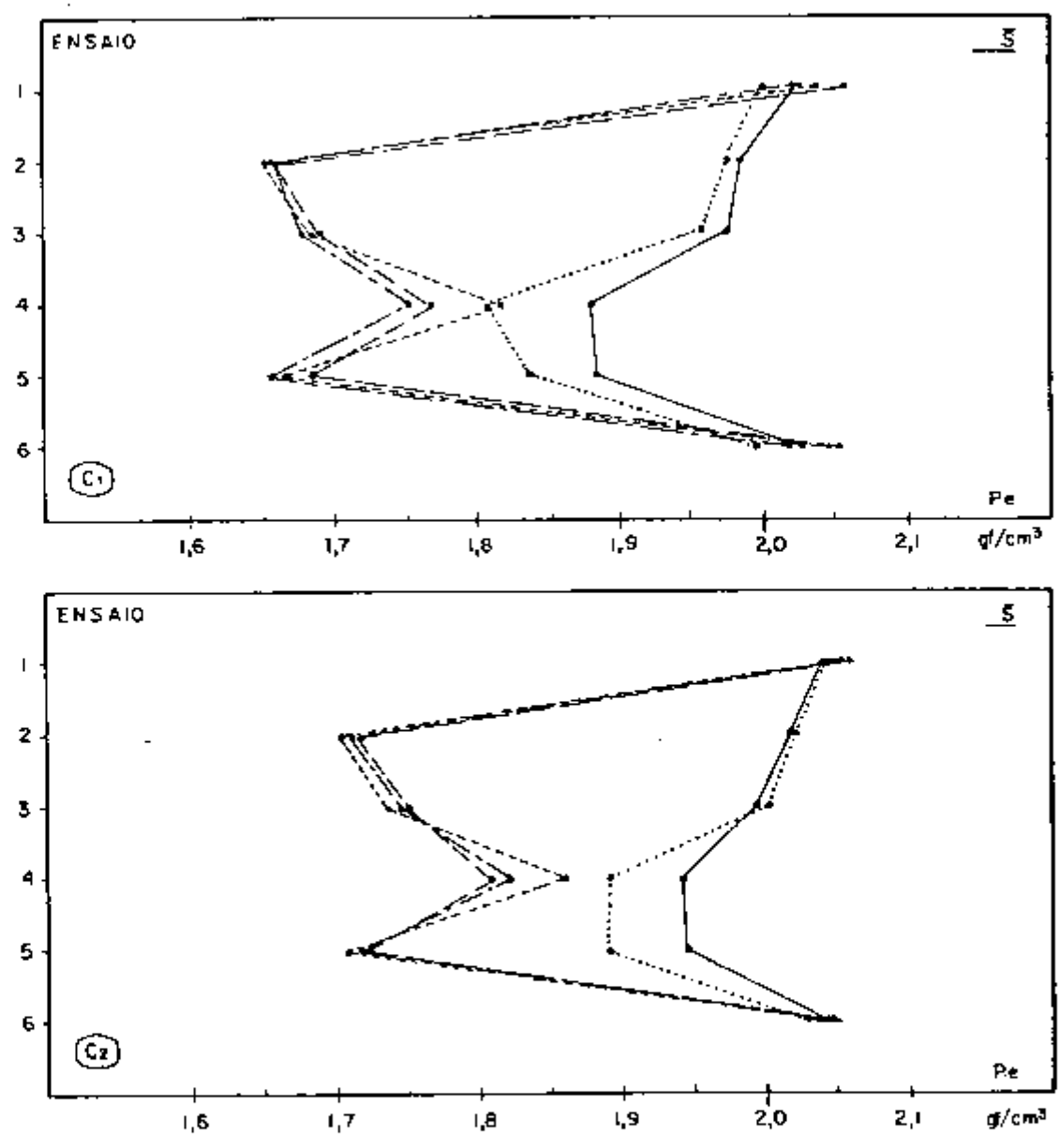


FIGURA 4.5 - Comportamento do peso específico das amostras de cimento - desvio padrão:

$$\bar{s} = \begin{matrix} C_1: \pm 0,03 \\ C_2: \pm 0,02 \end{matrix}$$

4.2.4. Frequência de Ressonância

A dispersão das médias não permite conclusões a respeito de alterações causadas pela irradiação ou temperatura em estufa. Nos ENSAIOS 4 e 5 das amostras TIPO 3,4 e 5 houve dificuldade de se identificar o pico de ressonância fundamental (cerca de 60% de perda de resultados).

As médias obtidas no ENSAIO 1 ($T_{1,2,3,4,5}$) agrupam-se em torno de 28,0 KHz (C_1) e 29,2 KHz (C_2).

Os valores obtidos no ENSAIO 6 apresentam larga variação não havendo separação nítida entre as médias de cada TIPO de procedimento (FIGURA 4.6).

A fissuração causada nas amostras $T_{3,4,5}$ pela ação da secagem em estufa pode ser responsável pela série de ressonâncias expúrias que dificultam a identificação do modo fundamental de vibração.

Em amostras secas ao ar livre ocorre redução na amplitude da ressonância fundamental dificultando, em alguns casos, sua identificação.

Os ENSAIOS em condição saturada (E_1-E_2) com amostras que não sofreram secagem em estufa (T_1, T_2) apresentaram melhores resultados (TABELA 4.8):

TABELA 4.8 - Variação da frequência de ressonância nas amostras de cimento. PL = $\pm 0,2$ KHz

TIPO 1					TIPO 2				
CIMENTO	ENSAIO	FR(KHz)	S(KHz)	Δ FR	CIMENTO	ENSAIO	FR(KHz)	S(KHz)	Δ FR
1	1	28,0	0,6	1,0	1	1	28,2	0,5	2,9
	6	27,0	1,0			6	25,3	0,9	
2	1	29,2	0,5	1,4	2	1	25,3	0,4	2,1
	6	27,8	0,7			6	27,2	0,8	

Observa-se que a alteração das médias é da magnitude do desvio padrão encontrado, indicando menor sensibilidade do método ou maior dispersão dos resultados obtidos com os aparelhos disponíveis.

$$\Delta FR = \Delta FR(T_2) - \Delta FR(T_1)$$

$$C_1 : \Delta FR_{C_1} = 2,9 - 1,0 = 1,9 : \sigma \sim 1,0$$

$$C_2 : \Delta FR_{C_2} = 2,1 - 1,4 = 0,7 : \sigma \sim 0,8$$

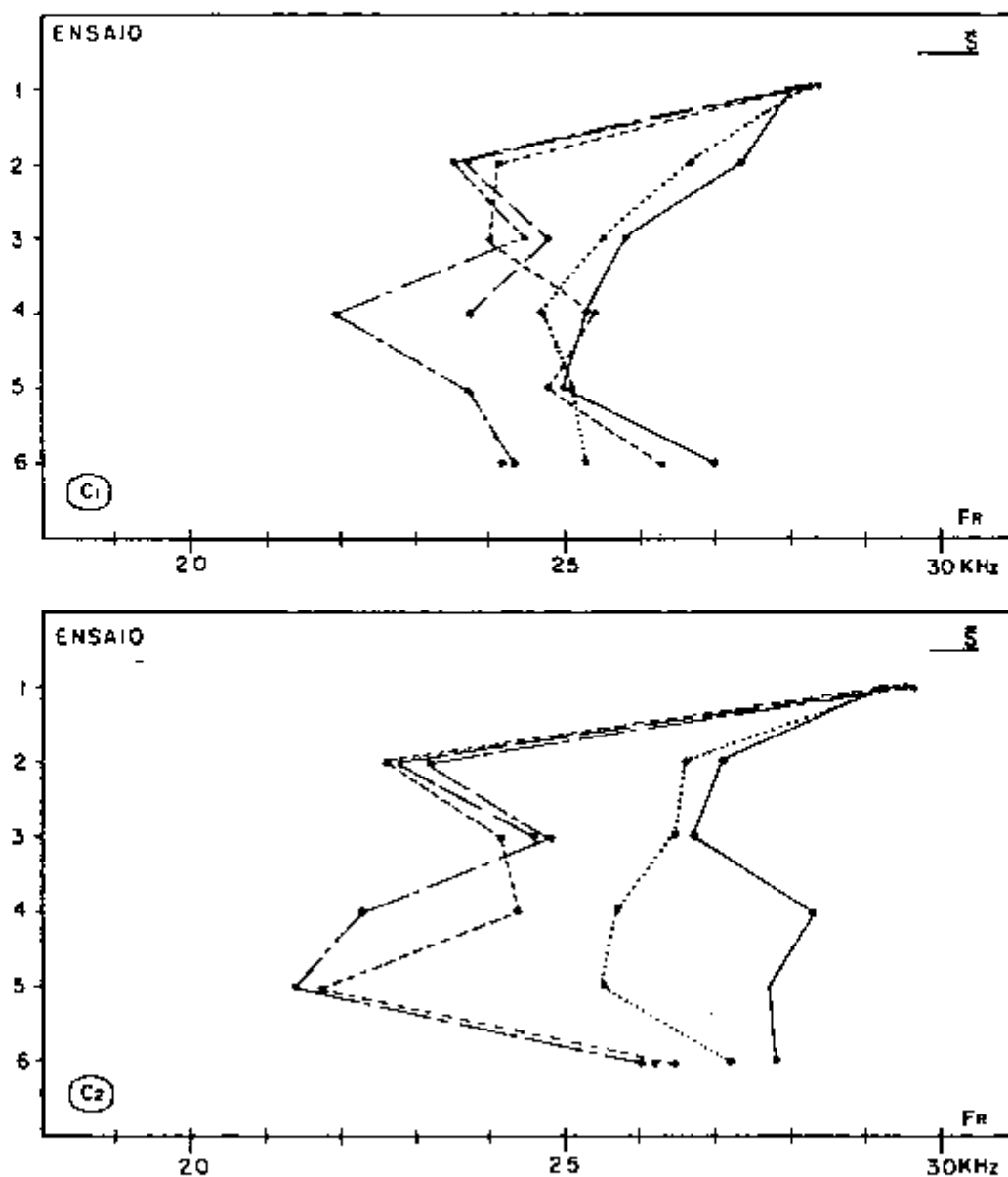


FIGURA 4.6 - Comportamento da frequência de ressonância das amostras de cimento .

desvio padrão médio*

$$C_1 : \pm 0,80$$

$$C_2 : \pm 0,60$$

*OBS.: considerando apenas (E₁ e E₆)

4.2.5. Velocidade de Pulso

Comportamento (FIGURA 4.7)

- TIPO 1 : Velocidade varia coerentemente com a densidade (teor de água) retomando o valor inicial após a saturação final (E_6).
- TIPO 2 : Velocidade coincidente com TIPO 2 até irradiação (E_1, E_2, E_3) a partir de então, assemelha-se as do TIPO 3, 4, 5 (E_4 e 6).
- TIPO 3 : Redução de velocidade após primeira secagem; sem variação significativa até ENSAIOS 5, recuperando parcialmente a velocidade após saturação final.
- TIPO 4 : Redução de velocidade após primeira secagem; redução residual até segunda secagem, recuperando parcialmente a velocidade após saturação final.
- TIPO 5 : Comportamento semelhante ao TIPO 4; recuperação de velocidade após saturação final.

Cimento C_1 e C_2

Observa-se uma velocidade de pulso sempre maior em C_2 em todos os ENSAIOS correspondentes. A redução final de velocidade, entretanto, é de mesma magnitude em C_1 e C_2 , tomando-se como referência a velocidade final da amostra de controle (T_1, E_6) e ligeiramente maior em C_2 , tomando-se como referência a velocidade inicial da mesma amostra de con-

trole (T_1, E_1), (TABELA 4.9).

TABELA 4.9 - Variação da velocidade de pulso nas amostras de cimento.

PL = 0,04 Km/s.

$T_{2,3,4,5}$					$T_{2,3,4,5}$				
CIMENTO	ENSAIO	Vp(Km/s)	S	ΔVp	CIMENTO	ENSAIO	Vp(Km/s)	S	ΔVp
C ₁	1	3,36	0,05	0,28	C ₁	2	2,92	0,06	0,12
	6	3,08	0,07			5	2,80	0,15	
C ₂	1	3,50	0,05	0,28	C ₂	2	3,20	0,05	0,16
	6	3,22	0,06			5	3,04	0,12	

A alteração de velocidade é maior na condição saturada (E_1, E_6) e tem a magnitude do desvio padrão em amostras secas (E_2, E_5). Os diagramas de comportamento indicam uma alteração de estrutura na primeira secagem ($T_{3,4,5}$) da mesma magnitude da alteração em T_2 devido à irradiação.

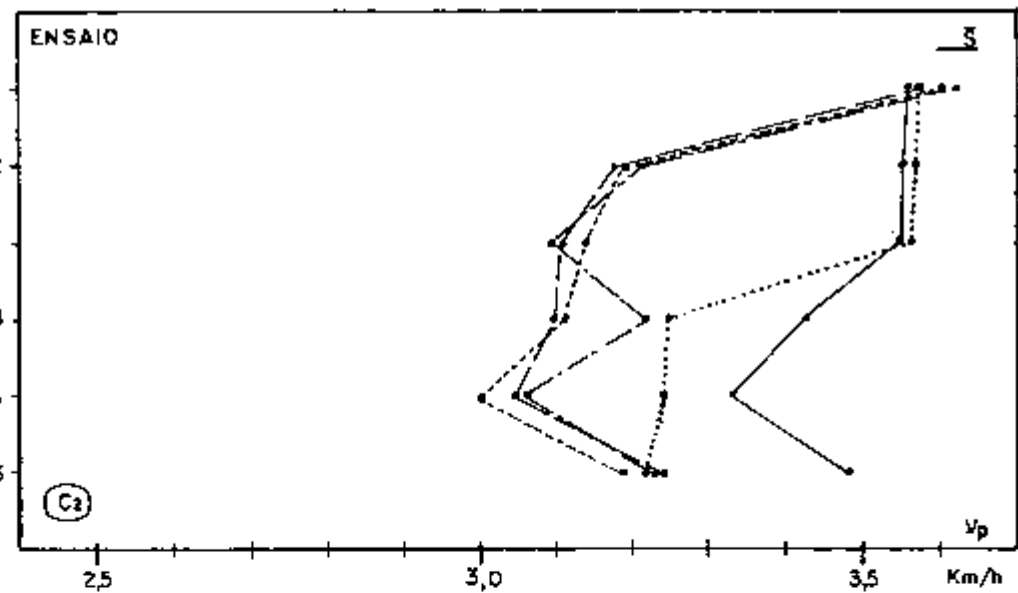
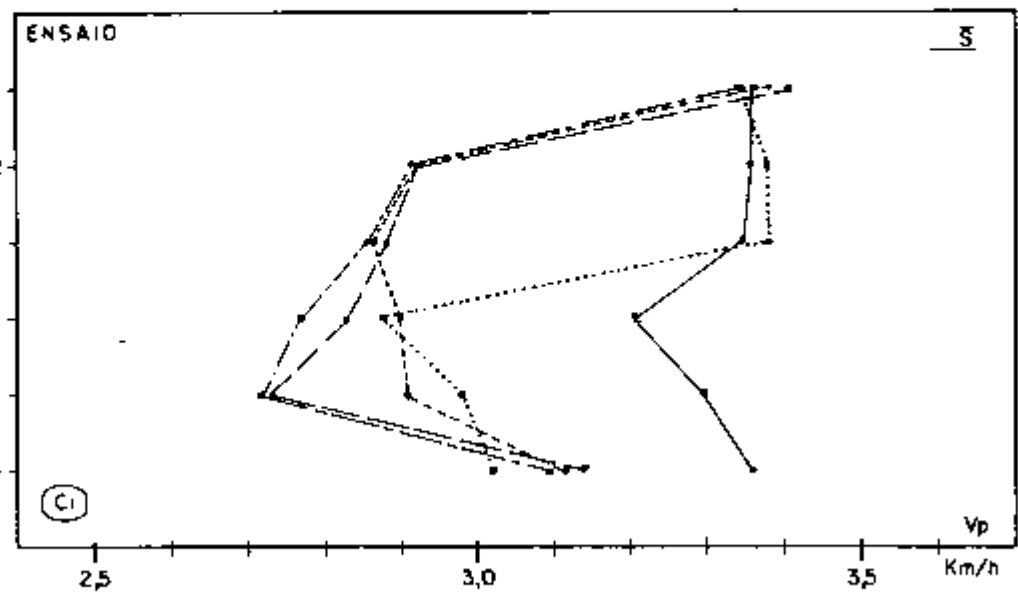


FIGURA 4.7 - Comportamento da velocidade de pulso nas amostras de cimento - desvio padrão médio: $C_1: \pm 0,60$
 $C_2: \pm 0,55$

*OBS.: considerando apenas E_1 e E_6 - E_2 e E_5 .

4.2.6. Relação entre Velocidade de Pulso e Peso Específico

O peso específico do cimento afeta diretamente o valor da velocidade de pulso. O cálculo da relação V_p/ρ é feito a partir dos resultados de cada amostra (FIGURA 4.8).

A relação cresce inicialmente, reduzindo-se a um valor menor que o inicial no decorrer do tempo, o que sugere uma elevação inicial, seguida de redução progressiva da resistência mecânica.

Este fenômeno pode estar relacionado a um aumento inicial das tensões internas da pasta devido à deformação provocada pelo aquecimento e secagem, seguida de redução progressiva causada pela acomodação de tensões e surgimento de micro fissuras (APÊNDICE 6).

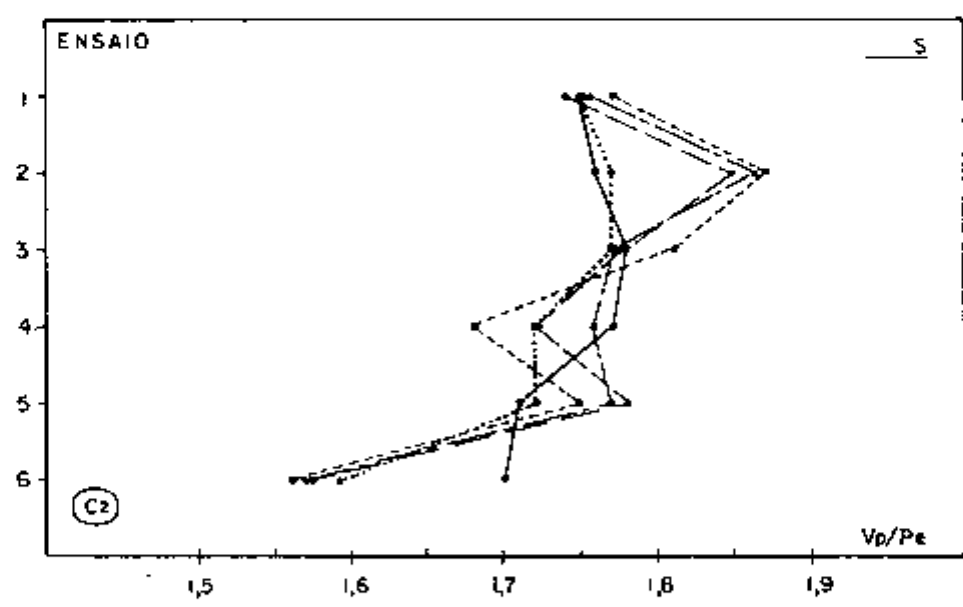
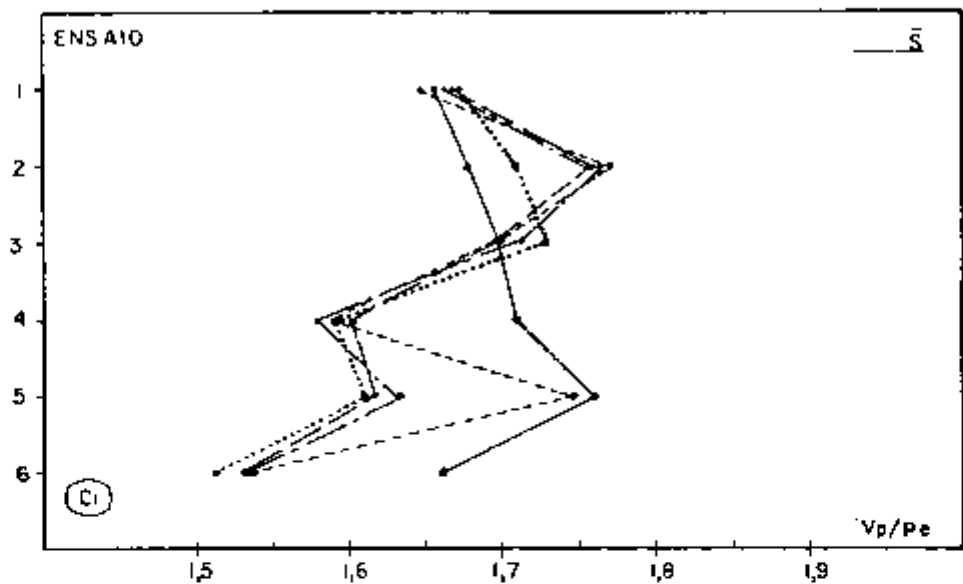


FIGURA 4.8 - Relação entre velocidade de pulso e peso específico das amostras de cimento.

4.2.7. Relação entre Frequência de Ressonância Medida e Frequência de Ressonância Calculada.

A frequência de ressonância de um espécime pode ser estimada a partir dos resultados dos testes de velocidade de pulso (item 1.3.2). A consistência do valor de F_R estimado é avaliada pela relação F_{R0} / F_{Re} e é calculada para cada amostra em cada ensaio (dados emparelhados).

Esta relação apresenta-se estável apenas no ENSAIO 1 ($T_{1,2,3,4,5}$), (TABELA 4.10); nos demais a dispersão encontrada é da ordem de 20%. Esta dispersão é causada principalmente pela dispersão encontrada nos ensaios de ressonância (FIGURA 4.9).

TABELA 4.10 - Relação entre F_{R0} e F_{Re} .

ENSAIO 1			ENSAIO 2,3,4,5,6		
CIMENTO	F_{R0}/F_{Re}	S	CIMENTO	F_{R0}/F_{Re}	S
1	0,98	0,02	1	0,88-1,00	0,08
2	0,96	0,02	2	0,81-0,99	0,08

OBS.: a relação F_{R0}/F_{Re} deve aproximar-se de 1,0 quando a relação altura/diâmetro da amostra aproxima-se de 2 (FIGURA A1.6 - APÊNDICE 1).

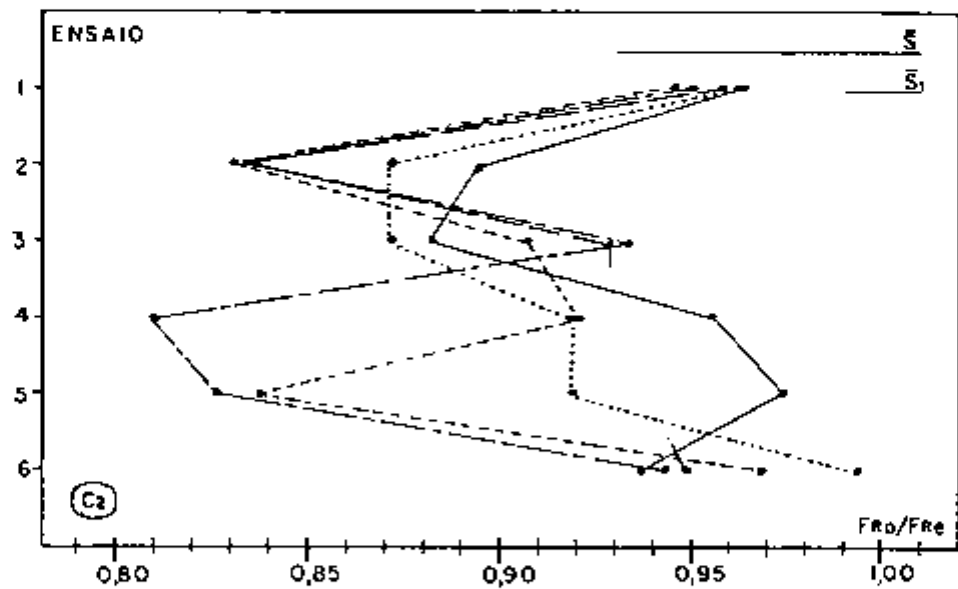
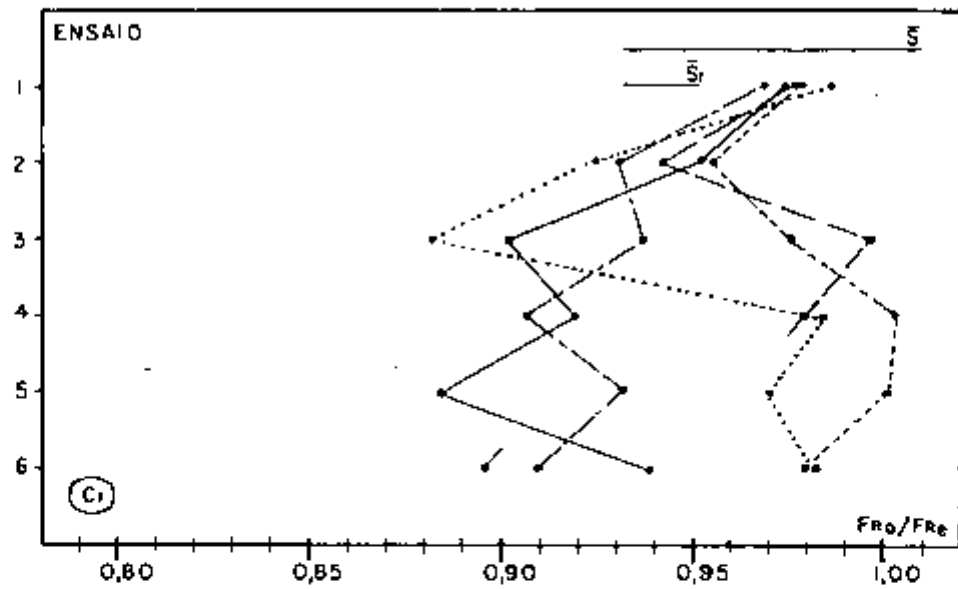


FIGURA 4.9 - Relação entre frequência de ressonância medida e frequência de ressonância calculada - desvio padrão médio C_1 e C_2

$E_1: \pm 0,02$

$E_{2,3,4,5,6}: \pm 0,08$

4.2.6. Correlação Entre Velocidade de Pulso e Peso Específico

A redução permanente da V_p acontece entre os ENSAIOS 3 e 4 para amostras T_2 e ENSAIOS 2 e 5 para amostras $T_{3,4,5}$, indicando que enquanto amostras T_2 sofrem alteração devido à irradiação, amostras T_3 são submetidas à irradiação já com a estrutura alterada pela secagem em estufa . A variação encontrada entre os ensaios 3 e 4 é desprezível.

OBS.: os gráficos de comportamento de cada TIPO não serão apresentados.

No gráfico de agrupamento dos pontos observa-se relação linear entre V_p e Peso Específico (FIGURA 4.10).

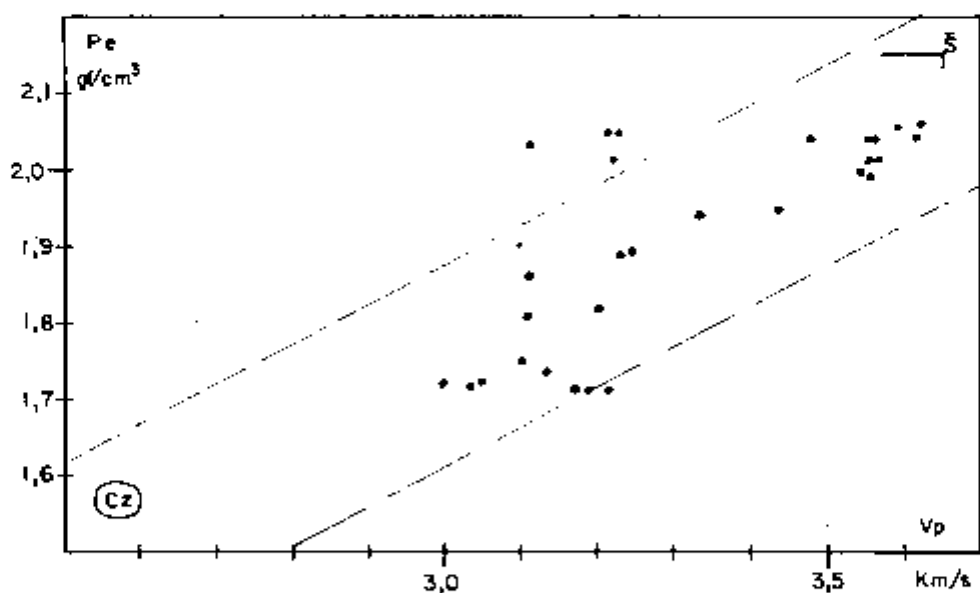
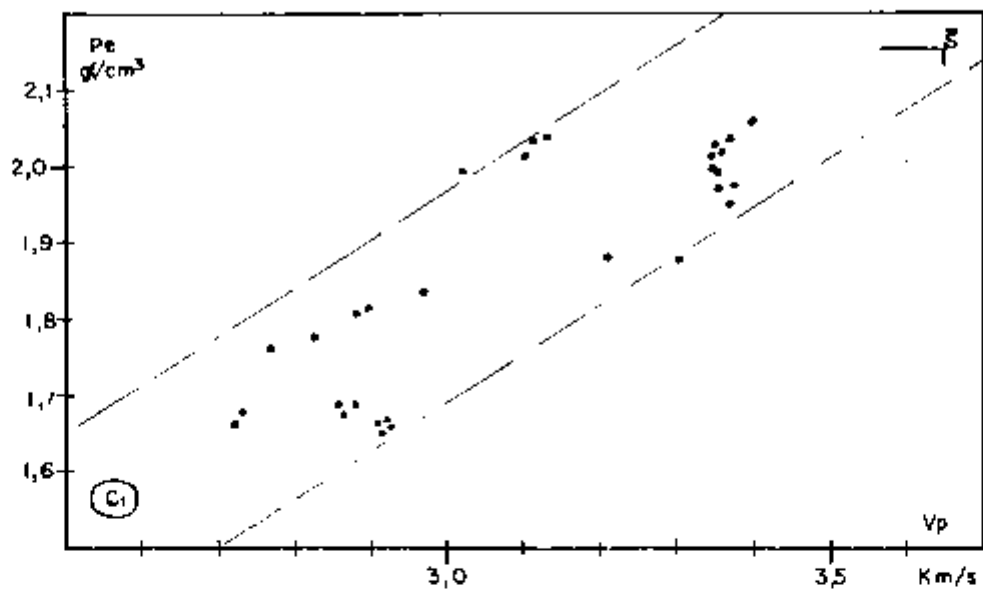


FIGURA 4.10 - Correlação entre velocidade de pulso e peso específico - desvio padrão médio

C_1 : V_p : 0,80
 Pe : \pm 0,03
 C_2 : V_p : \pm 0,70
 Pe : \pm 0,02

*OBS.: considerando todos os ensaios.

4.2.9. Correlação Entre Frequência de Ressonância e Peso Específico.

Comportamento semelhante à $V_p \times \rho$ com maior dispersão nos resultados.

O agrupamento dos pontos indica também tendência de correlação linear, embora a dispersão comprometa esta conclusão (FIGURA 4.11).

4.2.10. Correlação Entre Frequência de Ressonância e Velocidade de Pulso.

Observa-se uma tendência de correlação linear entre os resultados dos testes de FR e V_p . A grande dispersão encontrada nos valores de ressonância compromete a confiabilidade desta afirmação.

Verifica-se uma alteração maior da velocidade de pulso no cimento 1 no decorrer dos ensaios embora a alteração final seja de mesma magnitude que em C_2 , (FIGURA 4.12).

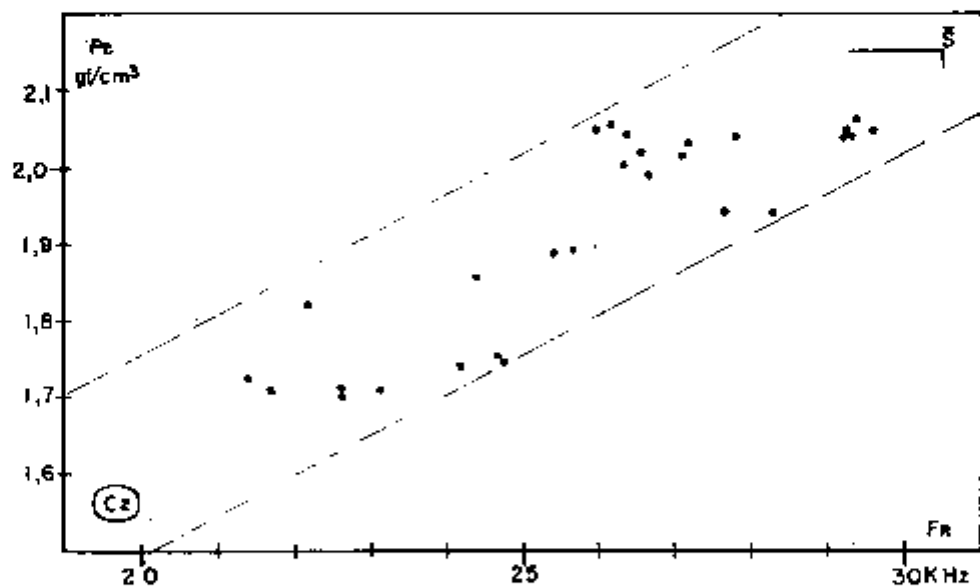
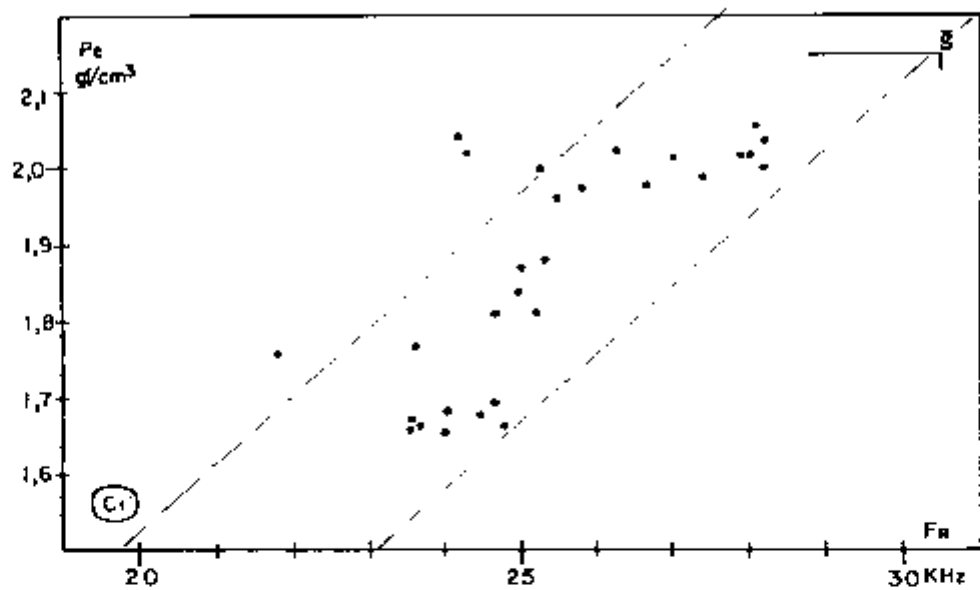


FIGURA 4.11 - Correlação entre frequência de ressonância e Peso específico.

Desvio padrão médio C₁: FR = ± 1,7 KHz

Pe = ± 0,03 g/cm³

C2 FR = ± 1,2 KHz

Pe = ± 0,02 g/cm³

OBS.: considerando todos os ensaios.

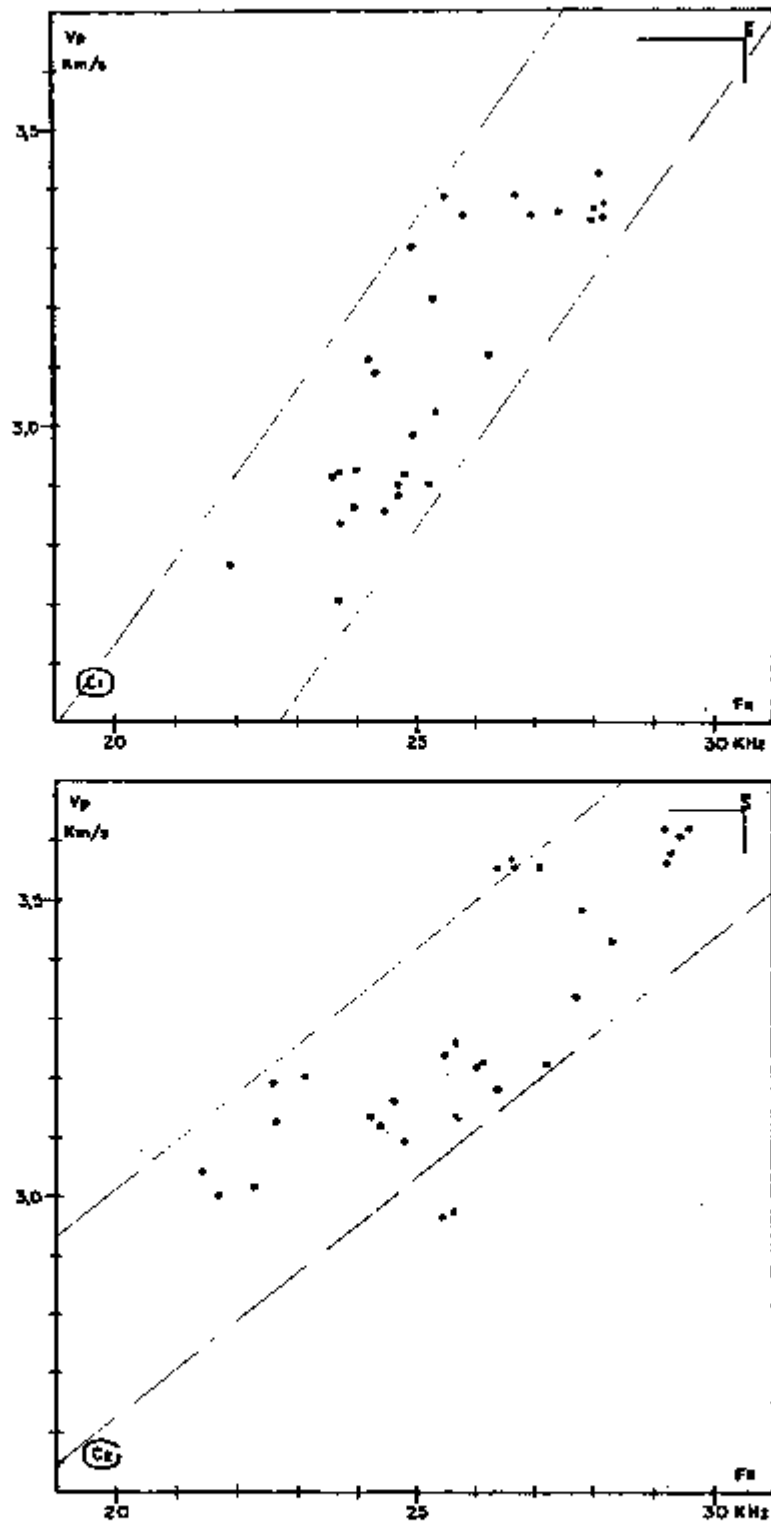


FIGURA 4.12 - Correlação entre frequência de ressonância e velocidade de pulso.

Desvio padrão médio

C_1	FR = $\pm 1,7$ KHz
	Vp = $\pm 0,80$ Km/h
C_2	FR = 1,2 KHz
	Vp = 0,70 Km/h

4.2.11. Módulo de Elasticidade Dinâmico

É calculado a partir dos resultados dos testes de velocidade de pulso pela fórmula empírica:

$$E_d = V^2 \rho R$$

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (t/cm)

V = velocidade de pulso Km/h

ρ = peso específico gf/cm³

R = 10-constante que depende do:

- caminho percorrido
- forma
- coeficiente de Poisson
- intervalo de variação de ρ

O valor da constante K deve ser obtido experimentalmente por correlação com resultados de testes destrutivos, o que não foi realizado neste trabalho. Tomou-se um valor arbitrário $K=10$.

A alteração ocorrida entre os ENSAIOS 2 e 5 é pequena frente aos desvios padrão encontrados sendo, em parte, devido à evolução das micro-fissuras. Entre os ENSAIOS 1 e 6, esta alteração é de mesma magnitude em todos os TIPOS de procedimento (TABELA 4.11).

TABELA 4.11 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico nas amostras de cimento.

SATURADO					SECO				
CIMENTO	ENSAIO	E_d	s	ΔE_d	CIMENTO	ENSAIO	E_d	s	ΔE_d
1	1	230	7	35	1	2	142	7	10
	6	195	10			5	132	12	
2	1	260	7	50	2	2	175	7	15
	6	210	10			5	160	15	

TIPO 1 : Pequena variação devido à alteração de umidade retomando ao valor inicial após saturação final.

TIPO 2 : Permanece estável até a irradiação, quando sofre decréscimo, recuperando parcialmente, após a saturação, o valor inicial de Ed.

TIPO 3,4,5 : Apresentam comportamento semelhante:
redução sensível de Ed após primeira secagem;
ligeira redução entre a primeira e a segunda secagem;
recuperação parcial do valor inicial de Ed após saturação final (FIGURA 4.13).

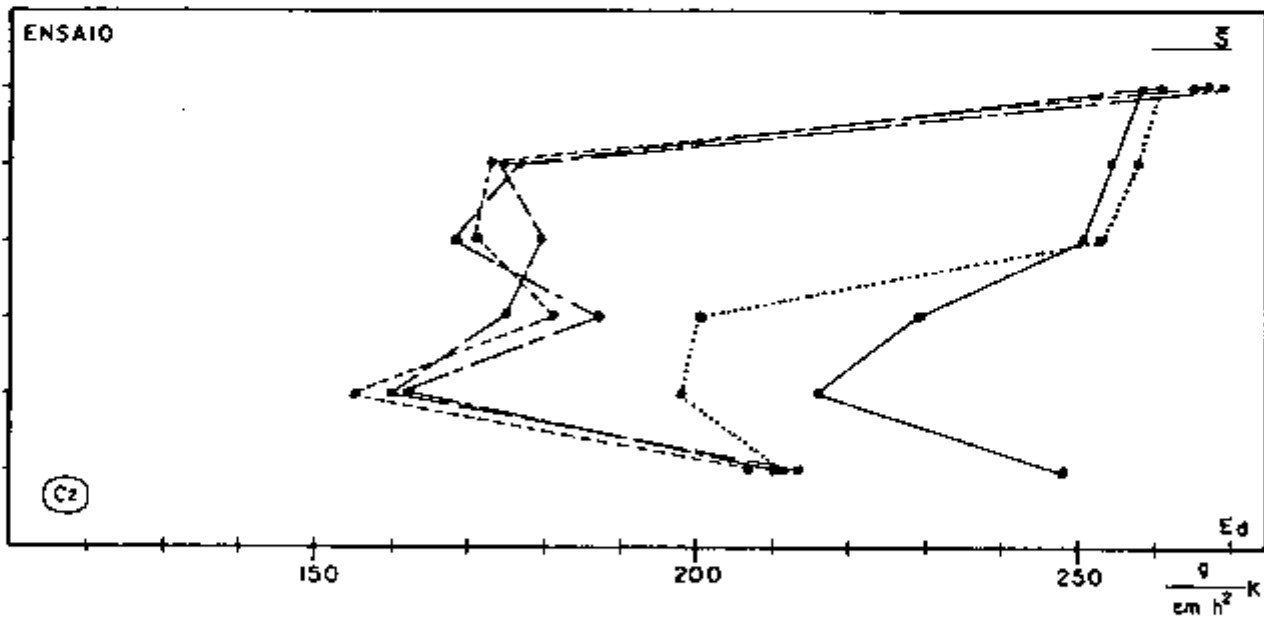
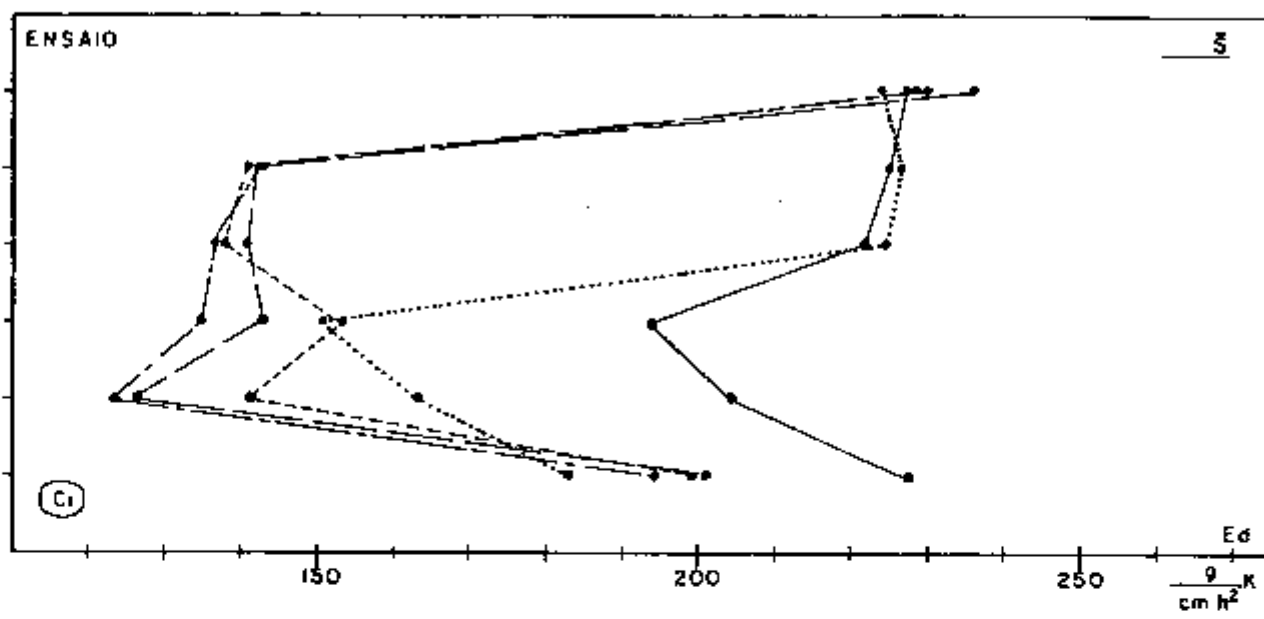


FIGURA 4.13 - Comportamento do módulo de elasticidade dinâmico das amostras de cimento.

Desvio padrão médio* C₁: ± 9
C₂: ± 10

*OBS.: considerando ENSAIOS E₁-E₆ e E₂-E₅.

5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES

5.1. EFEITOS DE IRRADIAÇÃO

Considerando a ordem de grandeza do fluxo integrado, as condições de irradiação (pressão, temperatura, umidade) e a aparelhagem disponível (ENSAIOS), pode-se afirmar que a irradiação por neutrons rápidos, térmicos e raios gama, causam o mesmo efeito, em termos de redução de velocidade do som no meio, que a elevação de temperatura considerada isoladamente, causada pela irradiação nas amostras de cimento.

A elevação de temperatura no cimento irradiado produzida pela atenuação dos raios gama do caroço e o aquecimento por condução nas amostras de controle em estufa causam deformação na micro-estrutura da pasta. Esta alteração, indicada pela redução da velocidade do pulso ultra-sônico, é devida principalmente à perda de água intersticial e a consequente ruptura das ligações entre os micro-cristais de cimento hidratado. A ressaturação das amostras não refaz estas ligações. A recuperação parcial da velocidade de pulso é devida ao preenchimento dos poros e capilares com água.

Havendo superposição de efeitos de irradiação e efeitos de temperatura, este último exerce influência predominante em termos de redução de velocidade de pulso. Nota-se ainda que o efeito de um ciclo de temperatura é o mesmo que o de dois, seis e sete ciclos estudados.

5.2. TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS

5.2.1. Técnica de Frequência de Ressonância

Esta técnica é sensivelmente afetada pelo teor de umidade e integridade física das amostras de cimento (fissuras).

Em amostras não saturadas, ressonâncias expúrias causam interferências que dificultam a identificação do modo fundamental de vibração afetando também a reprodutibilidade do ensaio.

O posicionamento da amostra entre os transdutores (centralização e pressão) é a principal causa da dispersão de resultados em amostras saturadas. Esta dispersão implica em menor confiabilidade do método, tendo-se em vista os equipamentos utilizados.

Tomando-se apenas os resultados de ensaios das amostras saturadas, a precisão dos resultados é suficiente para a análise comparativa proposta. Observa-se, contudo, menor sensibilidade, em relação ao método de velocidade de pulso, em termos de variação da frequência de ressonância como indicativo da alteração de estrutura da pasta de cimento.

5.2.2. Técnica de Velocidade de Pulso

Esta técnica é também sensível ao teor de umidade do cimento, estando relacionada às condições das camadas internas da amostra, (48,51).

O pulso emitido produz o primeiro pico da sequên-

cia formada pelos pulsos refletidos na superfície da amostra, tornando imediata a sua identificação (FIGURA 1.14).

Amostras secas em estufa permanecem com a região central não fissurada (segundo observado em testes de ruptura não incluídos neste trabalho) proporcionando ainda uma boa leitura do tempo de trânsito do pulso nas amostras de cimento.

A dispersão dos resultados, cerca de duas a três vezes o valor da precisão de leitura do aparelho, é considerada suficiente para a análise comparativa em todos os TIPOS de procedimentos estudados.

Considerando a aparelhagem empregada, pode-se afirmar que esta técnica não é suficientemente sensível para distinguir o efeito da irradiação do efeito de temperatura, em termos de redução da velocidade do som no cimento, na ordem de grandeza do fluxo integrado estudado.

A presente técnica permite, também, concluir que o efeito de um ciclo de temperatura é o mesmo que o de dois, seis e sete ciclos estudados, ou seja, o dano principal é produzido pelo primeiro ciclo de temperatura.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.3.1. Objetivos Propostos

Foi desenvolvida uma metodologia de trabalho relativa ao estudo dos efeitos de irradiação em cimento portland ; os equipamentos e sistemas de segurança foram estudados, dimensionados e testados com resultados satisfató-

rios dentro dos objetivos propostos. A experiência adquirida nos trabalhos desenvolvidos cristaliza-se na forma de infra-estrutura experimental básica, necessária ao desenvolvimento de estudos mais profundos acerca dos efeitos de irradiação em concretos de vasos de pressão.

A aparelhagem disponível foi estudada detalhadamente e algumas sugestões relativas a seu aperfeiçoamento são apresentadas a seguir, juntamente com sugestões de ordem geral para obtenção de melhores resultados no estudo de efeitos de irradiação em cimento.

5.3.2. Sugestões para Futuros Trabalhos

a) APARELHAGEM: Aquisição de aparelhagem atualizada com dispositivos de controle de pressão dos transdutores sobre as amostras e controle remoto para amostras altamente ativadas.

- Leitura de frequência de ressonância e velocidade de pulso por sistema digital, disponíveis em aparelhagens modernas.

b) MOLDAGEM: Moldagem de apenas um lote com 50 ou mais amostras em moldes de PVC estanques, para evitar perda de água durante o processo de cura.

- Cura em temperatura constante.
- Estudo de argamassas de cimento e areia para comparação com o cimento.

c) ENSAIOS: Manter todas as amostras submersas em água, inclusive durante às irradiações, eliminando os pro

cedimentos TIPO₃ e 5. (Irradiação após secagem em estufa, e controle ao ar livre após secagem em estufa). As amostras seriam retiradas da água apenas para a realização dos ensaios.

- Volume medido diretamente por imersão da amostra em água (recipiente graduado).
- O estudo da variação da taxa de perda e absorção de umidade pode indicar alteração de porosidade nas amostras.
- Ensaios de ruptura para correlacionar velocidade de pulso ou frequência de ressonância com resistência mecânica do cimento.

d) IRRADIAÇÕES: Maiores períodos de irradiação resultando em maiores fluxos integrados.

- Irradiações em temperaturas mais baixas com amostras submersas em água para evitar perda de umidade.
- Simulação do aquecimento γ do reator em forno de micro-ondas.
- Estudo de monitoração de temperatura no interior da massa da amostra durante irradiação e simulação de temperatura.

Estudos paralelos de efeitos de temperatura.

- Dosímetros instalados diretamente nas amostras (cobre ou níquel - reação $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$, para fluxos até 4×10^{19} nvt).

e) ANÁLISE DE RESULTADOS: Estudo de maior número de amostras:

- Estudo com dados emparelhados apenas.
- Análise estatísticas com:
 - Modelo de distribuição de resultados
 - Teste de hipóteses e comparação de médias.

APÊNDICE 1ENSAIOS PRELIMINARES1 - INTRODUÇÃO2 - ENSAIOS DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

- a) Amplitude de Vibração.
- b) Reprodutibilidade com Líquidos de Acoplamento.
- c) Precisão de Leitura dos Picos.
- d) Número de Leituras.
- e) Influência do Teor de Umidade.
- f) Reprodutibilidade do Pico de Ressonância.
- g) Ensaio de Redução de Comprimento.
- h) Conclusão.

3 - ENSAIOS DE VELOCIDADE DE PULSO

- a) Precisão de Leitura.
- b) Reprodutibilidade.
- c) Ensaio de Redução de Comprimento.
- d) Conclusão.

4 - PROGRAMA DE ENSAIOS

1 - INTRODUÇÃO

As dimensões das amostras de cimento são definidas basicamente em função das características geométricas da caixa de irradiação (gresil) e dispositivo de irradiação. A relação altura-diâmetro da amostra, igual a dois, permite estimar a frequência de ressonância a partir dos resultados dos testes de velocidade de pulso (item 2.3.1). A facilidade de manuseio, simplicidade nos ensaios, massa de cimento ativada e a conseqüente blindagem necessária são fatores também considerados.

A aparelhagem utilizada deve ser adequada às características das amostras em estudo. A série de testes descrita a seguir tem por objetivo determinar a resolução dos aparelhos utilizados, a precisão de leitura, a identificação da frequência fundamental de ressonância e a reprodutibilidade dos resultados.

OBS.: Nestes testes foi utilizado um osciloscópio TECTRONICS 7904 equipado com frequencímetro digital 7D15.

2 - ENSAIOS DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

A frequência fundamental de ressonância é aqui identificada e a reprodutibilidade dos resultados é estudada em função das condições do ensaio (posicionamento da amostra, resinas de acoplamento, umidade ambiente, comprimento-altura da amostra).

a) Amplitude de Vibração

A amplitude de vibração na amostra varia em função da frequência emitida pelo gerador. Em uma escala adequada, registra-se esta amplitude em intervalos de 400 Hz na faixa de 4 a 40 KHz. A curva assim obtida é denominada "curva de ressonância". São feitas cinco leituras dessa curva (90 pontos em cada leitura), observando seu deslocamento devido ao reposicionamento da amostra entre os transdutores entre cada leitura.

Foram levantadas 30 curvas de ressonância (3 amostras saturadas) sendo encontrados quatro picos de amplitude na faixa estudada (4-10-27-31 KHz). A identificação do modo fundamental de vibração é descrita nos itens (d) e (e).

b) Reprodutibilidade com Líquidos de Acoplamento

A reprodutibilidade das "curvas de ressonância" é estudada aplicando-se líquidos ou pastas na superfície de contacto transdutor-amostra. Estas substâncias contribuem para a melhor transmissão da onda mecânica (FIGURA A.1.1).

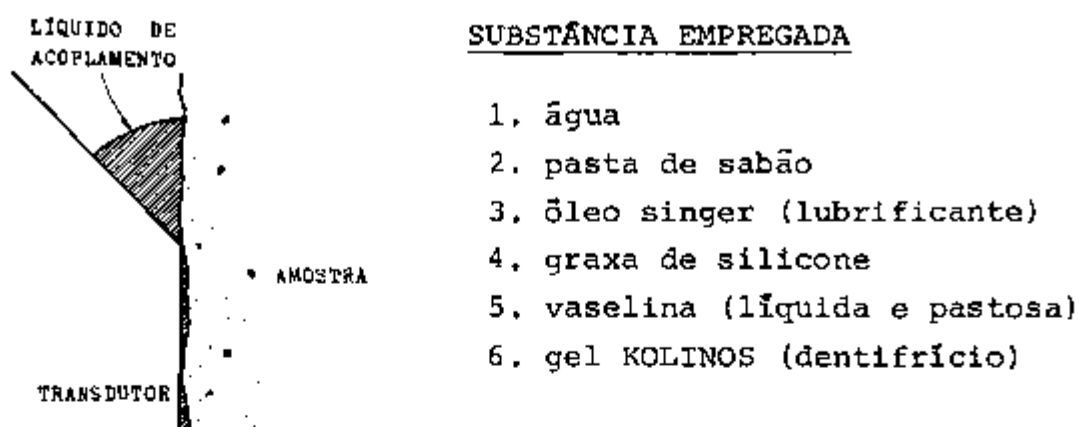


FIGURA A.1.1 - Líquidos de acoplamento entre transdutor e amostra.

Concluiu-se, após o estudo de 80 curvas, que, nas condições de trabalho existentes, o uso de tais substâncias não afeta a reprodutibilidade das curvas de ressonância. A infiltração do líquido ou pasta na massa de cimento causa ainda a contaminação da amostra, que pode resultar em certos inconvenientes no caso de amostras irradiadas.

Um maior cuidado no posicionamento da amostra (centralização e ajuste das superfícies de contacto) e um ajuste de pressão mais preciso (deslocamento da mola) podem contribuir significativamente para a melhor reprodutibilidade da "curva de ressonância".

c) Precisão de Leitura dos Picos

A partir desta etapa, apenas os "PICOS" de amplitude são estudados.

Três séries de 10 leituras dos PICOS são realizadas, reposicionando-se a amostra após cada série. Este procedimento é repetido em três amostras em condições de umidade

específicas: saturada, seca ao ar livre, seca em estufa.

A precisão de leitura é avaliada pelo desvio padrão das leituras realizadas:

<u>REGIÃO DE RESSONÂNCIA (KHz)</u>	<u>DESVIO PADRÃO (KHz)</u>
5	0,004
10	0,005
27	0,014
31	0,036

(medidas realizadas com osciloscópio TECTRONICS 7904).

OBS.: O Osciloscópio empregado nos ensaios de caracterização (item 2.2.1) resulta em precisão de leitura de aproximadamente 0,2 KHz em toda faixa de frequências estudada (4-40 KHz) e o desvio padrão nos ensaios de reprodutibilidade em amostras saturadas é da ordem de 0,8 KHz.

d) Número de Leituras

O valor numérico da frequência de ressonância é afetado pelo posicionamento da amostra entre os transdutores (centralização e pressão). Esta variação é causada pela superposição dos três modos principais de vibração: longitudinal, transversal e de superfície.

São feitas 10 leituras da série de picos, reposicionando-se a amostra após a leitura de cada série. A pressão dos transdutores sobre a amostra é regulada pelo deslocamento Δl Pré-estabelecido de uma mola do sistema (FIGURA 2.6).

A média de 10 leituras em qualquer região de ressonância é igual à média de 5 leituras na região correspondente e o desvio padrão apresenta uma alteração da ordem de 10%.

Considera-se que 5 leituras são suficientes para identificar um pico de ressonância qualquer.

e) Influência do Teor de Umidade

O teor de umidade (água livre) presente na amostra afeta diretamente o valor da frequência de ressonância. Este ensaio demonstra qualitativamente esta influência e avalia quantitativamente a variação da F R no período de ensaio de um lote (~ 20 minutos).

A leitura dos picos é feita com intervalos de 5 minutos sem reposicionamento da amostra no decorrer do ensaio.

Foram estudadas as três condições básicas de umidade (FIGURA A.1.2):

1. Amostra inicialmente saturada: observa-se uma redução da frequência de ressonância em função da perda de umidade da amostra.

2. Amostra seca em atmosfera ambiente: a F R não se altera no período de ensaio (2 horas).

3. Amostra seca em estufa: a absorção de umidade pelo cimento causa aumento da F R.

A variação do teor de umidade implica na variação da massa da amostra causando também uma variação da velocidade do som no meio, o que contribui para a alteração da frequência de ressonância.

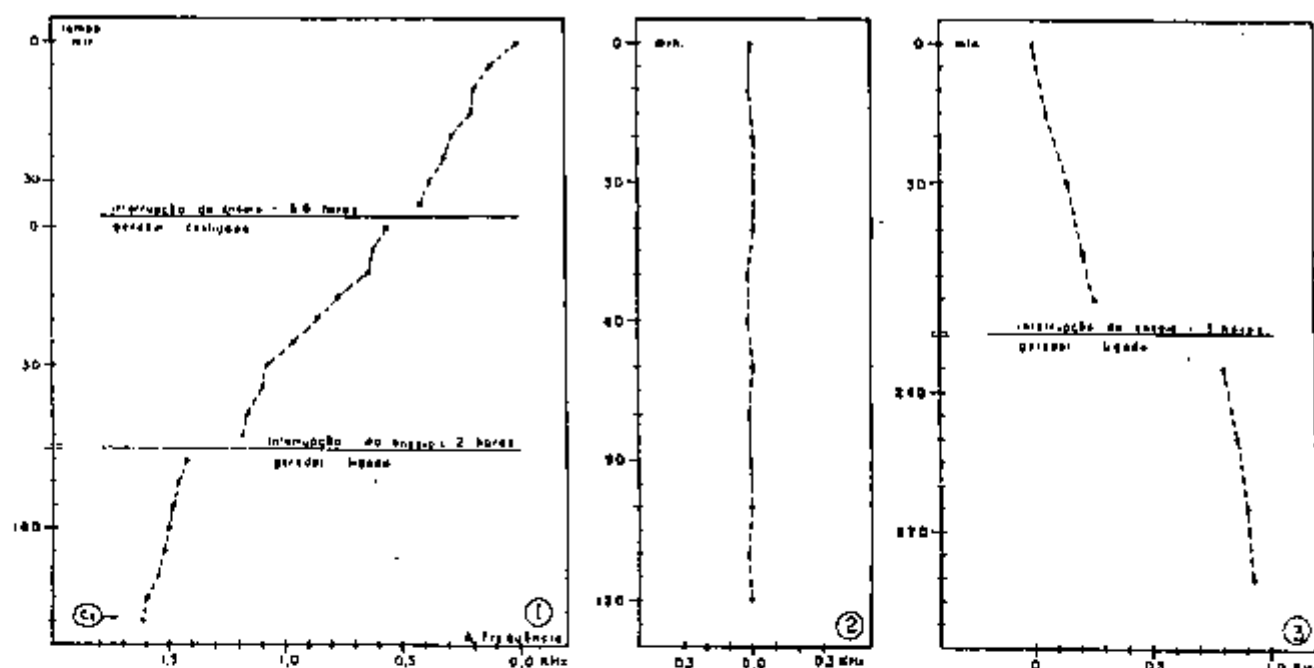


FIGURA A1.2 - Influência da umidade na estabilidade da frequência de ressonância:

1. Saturada
2. Seca ao ar livre
3. Seca em estufa

f) Reprodutibilidade do pico de ressonância

O resultado obtido em um ensaio é confiável se for reprodutível, mantendo-se constantes as condições do ensaio. São estudadas 8 amostras em 4 condições de umidade (2 em cada). Em cada condição de umidade são realizados sete ensaios com intervalos de 48 horas entre si.

CONDIÇÕES DE UMIDADE:

1. Atmosfera ambiente: duas amostras são ensaiadas após permanecerem em atmosfera ambiente cerca de 90 dias. Permanecem em atmosfera ambiente no decorrer do teste.

2. Processo de saturação: duas amostras são ensaiadas após permanecerem em atmosfera ambiente cerca de 90 dias. São levadas à uma câmara saturada onde permanecem no decorrer do teste.

3. Ambiente saturado: duas amostras permanecem em câmara saturada sendo daí retiradas apenas para realização do ensaio.

4. Secagem em atmosfera ambiente: duas amostras são retiradas da câmara saturada e ensaiadas. Permanecem em atmosfera ambiente no decorrer do teste.

Observa-se a influência das condições de umidade na reprodutibilidade do pico de ressonância na faixa de 25-30 KHz. As amostras mais afetadas são aquelas que permaneceram em atmosfera ambiente (os três últimos ensaios foram realizados em dias chuvosos, quando a umidade ambiente permanece próxima a 100%), (FIGURA A1.3).

Este teste evidencia a sensibilidade da técnica às condições de umidade do cimento. A melhor estabilidade (reprodutibilidade) é obtida com amostras em câmara saturada, onde a variação de umidade (absoluta) é função somente da temperatura, não causando variação significativa nos resultados considerando-se a precisão de leitura no ensaio.

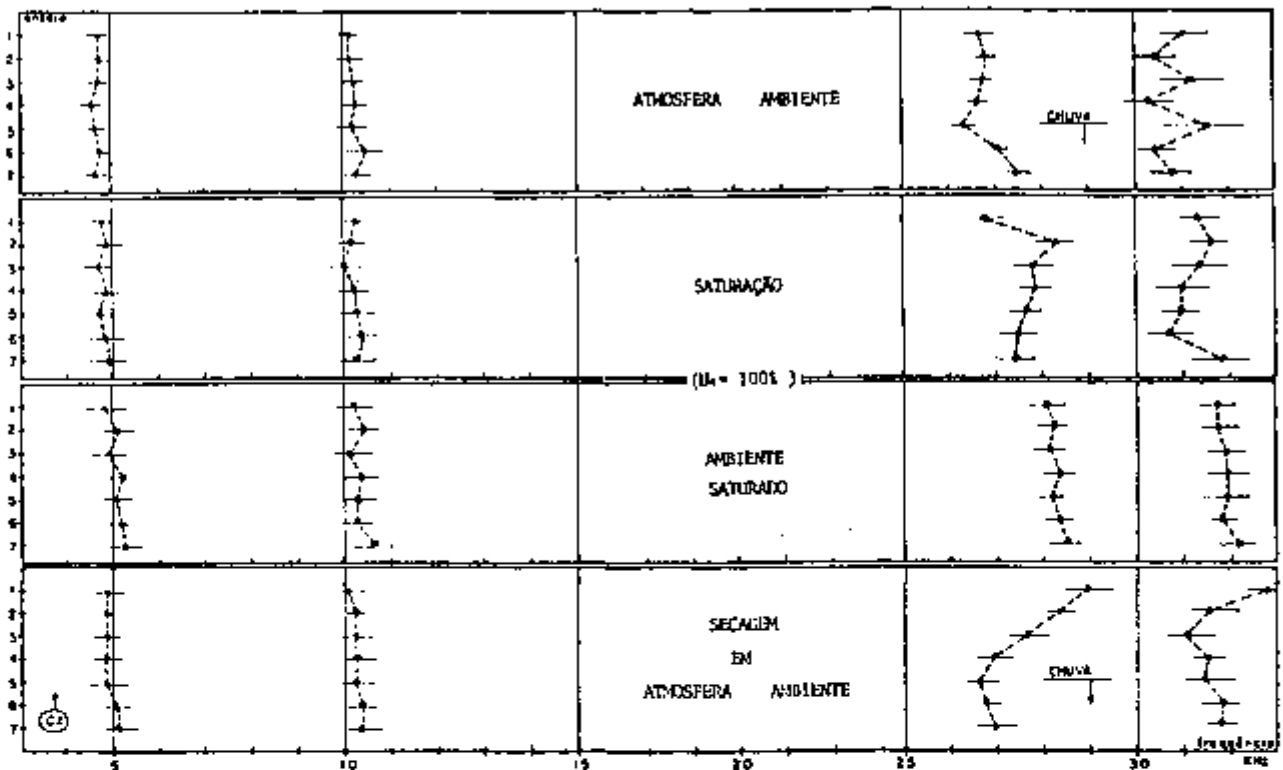


FIGURA A1.3 - Influência das condições de umidade na reprodução da F.R.

OBS.: cada ponto representa a média de 5 leituras.

g) Ensaio de Redução de Comprimento

A identificação da frequência fundamental de ressonância é feita repetindo-se o ensaio de uma amostra cujo comprimento é reduzido a cada ensaio. Os picos menos sensíveis à variação do comprimento são atribuídos à ressonância do sistema (transdutores- mola), (FIGURA A1.4).

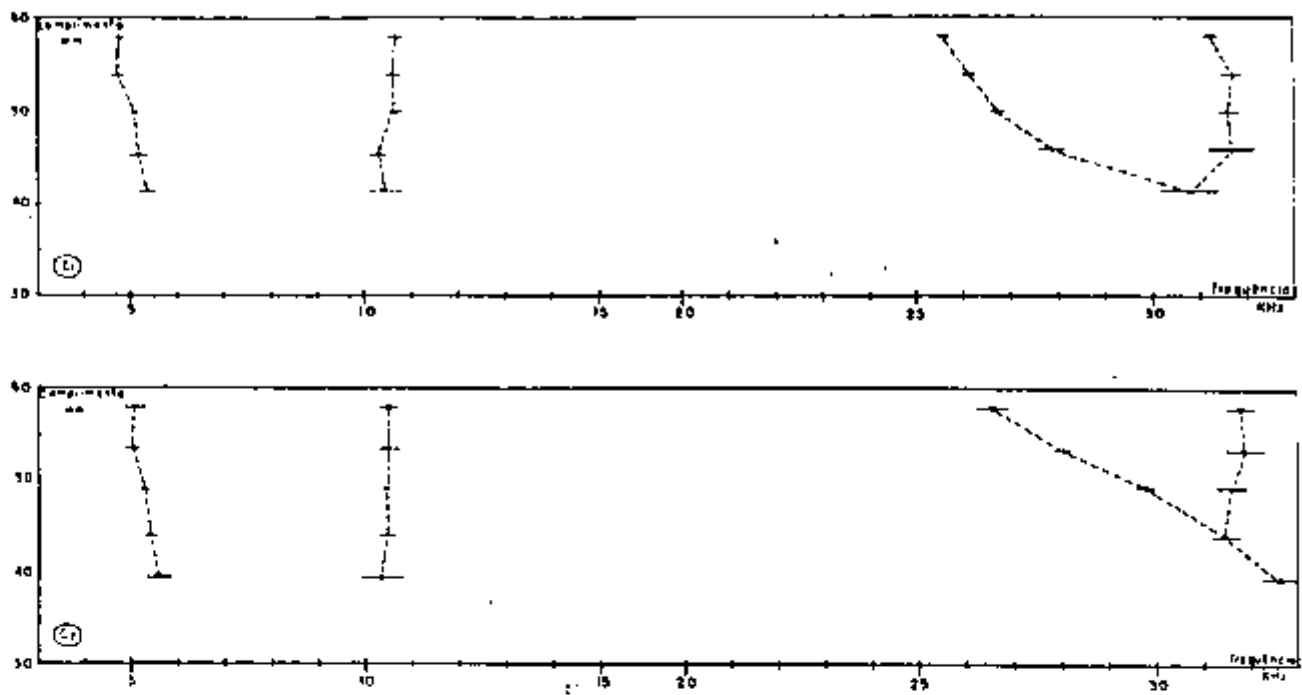


FIGURA A1.4 - Influência do comprimento da amostra na frequência de ressonância.

O teste fornece ainda uma avaliação quantitativa da sensibilidade da F.R. em função da variação de comprimento da amostra (L=60 mm):

$$\Delta L - 5 \text{ mm}$$

$$\Delta FR - 0,3-0,5 \text{ KHz}$$

A uniformização de comprimento das amostras de um mesmo lote é feita com precisão de ± 1 mm, causando variação na F R de cerca de ± 100 Hz, sendo assim menor que a precisão de leitura dos picos (± 200 Hz).

h) Conclusão

A frequência fundamental de ressonância das amostras estudadas é identificada pelo ensaio de redução de com-

primento e confirmada pelos ensaios de reprodutibilidade em condições de umidade variáveis. Situa-se entre 25-30 KHz e a precisão de leitura é cerca de $\pm 0,2$ KHz.

O teor de umidade do cimento afeta significativamente o valor da F R . Amostras saturadas apresentam menor dispersão de médias (melhor reprodutibilidade) - cerca de 0,3-0,4 KHz, estando próxima a precisão de leitura.

Os testes descritos evidenciam a importância da realização de ensaios com amostras em condições de umidade semelhantes para que a comparação de resultados seja possível.

3 - ENSAIOS DE VELOCIDADE DE PULSO

a) Precisão de Leitura

A velocidade de um pulso ultra-sônico é calculada pela relação h/t_{tr} onde h (ou ℓ) é o caminho percorrido pelo pulso (altura ou comprimento da amostra) e t_{tr} é a defasagem entre o pulso emitido e o recebido, medida diretamente em μs na tela do aparelho.

A pressão exercida pelos transdutores sobre a amostra afeta a amplitude do pico emergente influenciando na precisão de leitura (identificação do início do pulso) , (FIGURA A1.5).

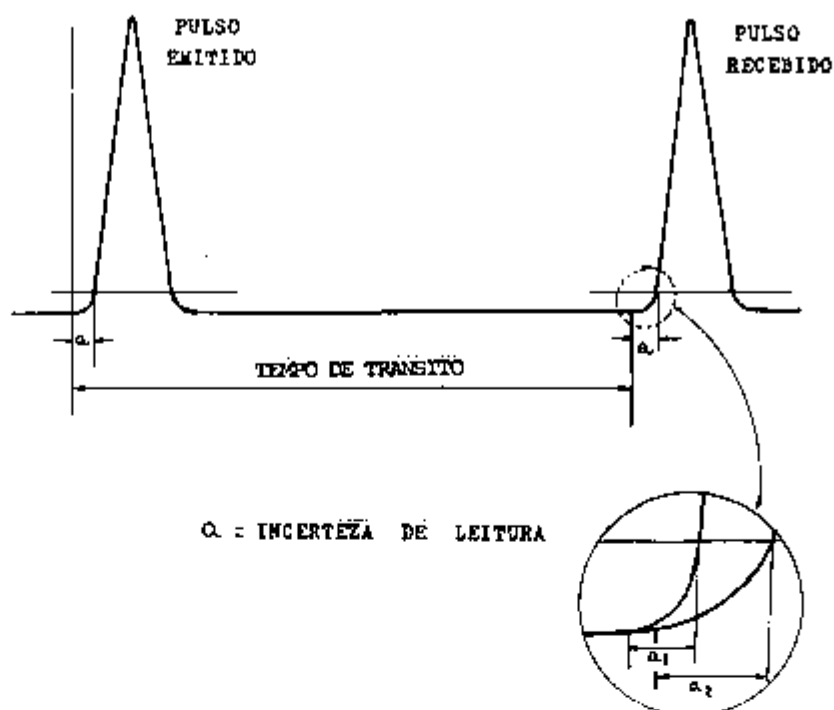


FIGURA A1.5 - Incerteza de leitura no teste de velocidade de pulso .

a = região de início do pulso (incerteza de leitura).
 a_1 = maior pressão transdutor-amostra
 a_2 = menor pressão transdutor-amostra

A precisão de leitura indicada pelo ensaio de 3 amostras (60 leituras) é cerca de $\pm 0,2 \mu s$.

OBS.: considerando a variação máxima encontrada nos ensaios

$$| E_1 - E_6 | : \Delta t_{tr} - 4 \mu s$$

incerteza: 10%

precisão de leitura $\pm 0,2 \mu s$

b) Reprodutibilidade

Uma série de 15 ensaios é realizada em um lote (10 amostras) mantido em câmara saturada. Uma amostra padrão, de acrílico, é ensaiada antes e após o ensaio do lote para referência de calibração do aparelho.

A dispersão dos valores de t_{tr} observada é cerca de 0,2 μs , sendo numericamente igual à precisão de leitura. Considera-se que duas leituras são suficientes para caracterizar a velocidade de pulso no material.

c) Ensaio de Redução de Comprimento

Uma série de nove ensaios é realizada em duas amostras (a_1 : saturada, a_2 : seca em estufa), cujo comprimento é reduzido progressivamente a cada ensaio. Para efeito comparativo, realiza-se também o ensaio de frequência de ressonância (período na ressonância).

Observa-se maior sensibilidade do t_{tr} à redução de comprimento (FIGURA A1.6):

t_{tr} : diretamente proporcional ao caminho percorrido pelo pulso, apresentando distanciamento progressivo dos valores de período de ressonância (P R). A velocidade de pulso mantém-se constante, sendo indicada pela inclinação da reta;

P R : É relacionado à massa da amostra e a velocidade de propagação da onda mecânica. É menos sensível à variação de comprimento.

A magnitude da dispersão dos valores de período de

ressonância corresponde à variação de comprimento de cerca de 2 a 3 mm.

OBS.: t_{tr} : tempo de trânsito do pulso ultra-sônico na amostra.

P R : período de onda na frequência de ressonância.

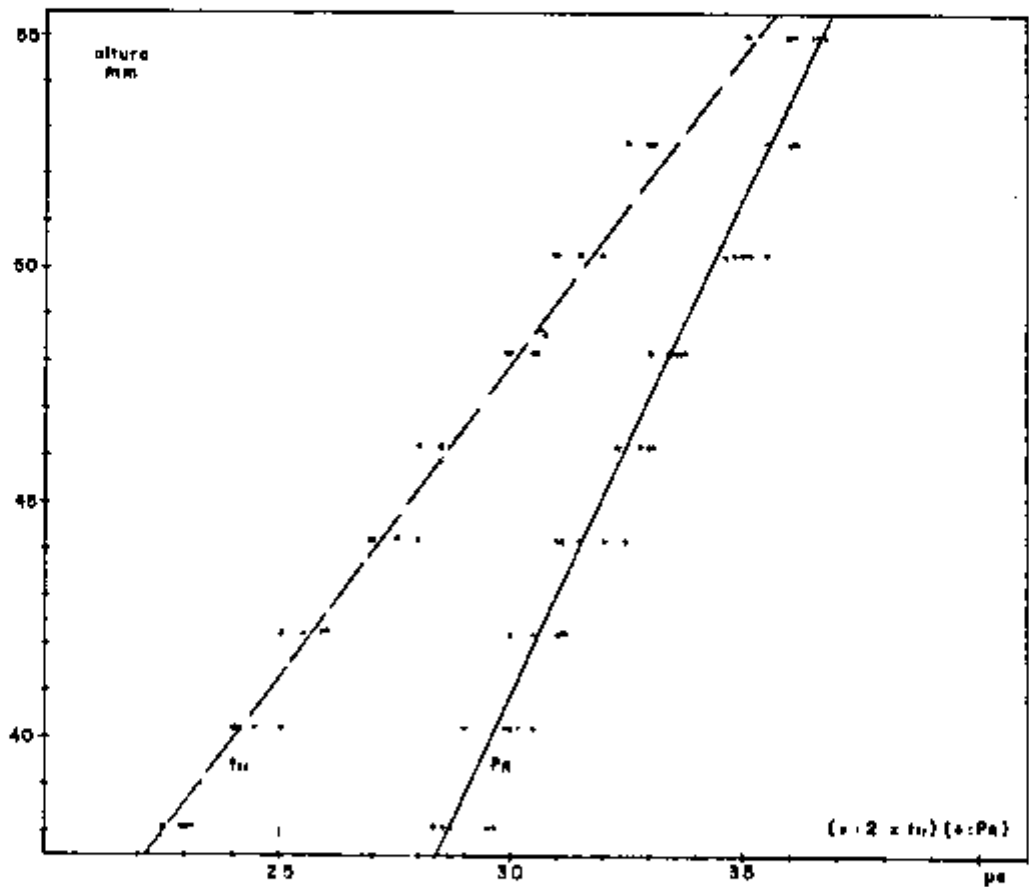


FIGURA A1.6 - Influência da redução de comprimento da amostra no t_{tr} e PR.

• Tempo de trânsito do pulso: — — — — —

• Período na frequência de ressonância : —————

OBS.: amostra saturada. O teste com amostra seca em estufa a apresenta resultados semelhantes, com maior dispersão nos valores de período na ressonância -(PR). Notar que, para altura = 60mm, onde a relação h/d = 2, a relação $2t_{tr}/PR \sim 1,0$.

d) Conclusão

A vantagem principal da técnica de velocidade de pulso reside na precisão, reprodutibilidade e simplicidade de aplicação, características estas que se revestem de particular importância nos ensaios com amostras irradiadas.

A dificuldade básica encontra-se na leitura óptica do tempo de trânsito: a incerteza na identificação de início do pulso introduz um erro que pode se tornar significativo no caso de pequenas variações nas propriedades da amostra.

Esta técnica mostra-se também sensível à variação do teor de umidade no cimento.

4 - PROGRAMA DE ENSAIOS

A série de ensaios preliminares aponta a importância das condições de umidade do cimento na reprodutibilidade dos resultados. A comparação dos valores de FR e Vp só é representativa quando as mesmas condições experimentais são estabelecidas. O programa de ensaios (item 2.3.2; FIGURA 2.9) é definido basicamente em função das condições de umidade das amostras (6 ENSAIOS) e da história de temperatura do cimento (5 TIPOS de procedimento: APÊNDICE 4), (FIGURA A1.7).

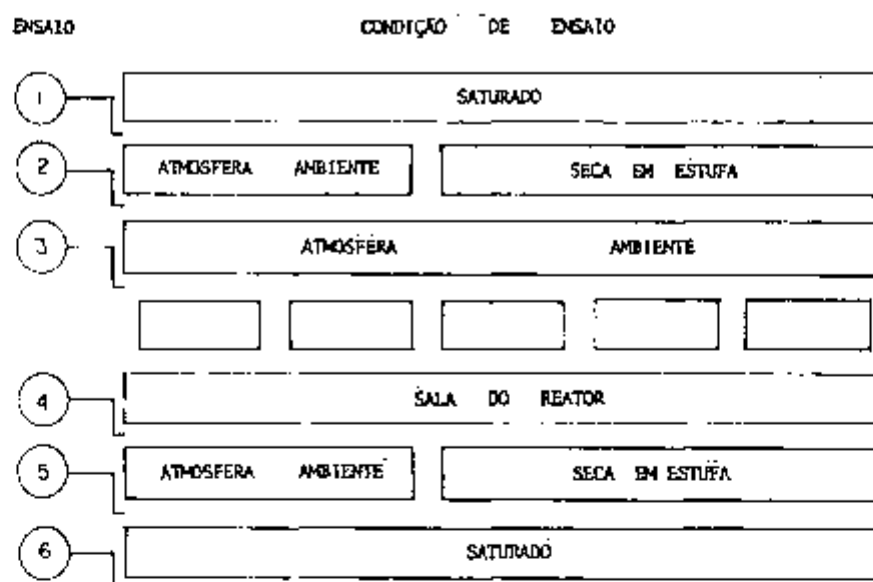


FIGURA A1.7 - Condição de umidade das amostras nos ensaios.

Comparação de resultados:

ENSAIO 1 e 6 + amostras saturadas

ENSAIO 2 e 5 + amostras secas

ENSAIO 3 e 4 + não se faz análise comparativa: apenas avalia-se a tendência de comportamento das médias.

APÊNDICE 2IRRADIAÇÃO PROTÓTIPO1 - INTRODUÇÃO2 - CARACTERÍSTICAS NUCLEARES DAS AMOSTRAS

- a) Principais Componentes
- b) Operação de irradiação
- c) Monitoração das amostras
- d) Identificação dos Elementos Ativados

3 - VALIDADE DAS INFORMAÇÕES

1 - INTRODUÇÃO

O cimento é um material cerâmico formado por compostos complexos com presença de impurezas provenientes das jazidas de matéria prima e água de amassamento. A irradiação por neutrons rápidos e térmicos pode tornar ativados alguns destes elementos. A atenuação da radiação gama produz calor, que causa elevação de temperatura na massa do material. Duas irradiações protótipo foram realizadas com os objetivos seguintes:

Irradiação "0": irradiação de uma amostra para teste do dispositivo e procedimentos de irradiação, determinação do período de decaimento inicial (tubo submerso na piscina do reator), levantamento do nível de dose a distâncias progressivas da amostra (atenuação da radiação no ar) e da curva de decaimento, identificação dos elementos ativados e decaimento de cada elemento em multicanal ;

Irradiação "00": irradiação de 4 amostras para desenvolvimento dos procedimentos de irradiação, obtenção da curva de temperatura das amostras sob irradiação (APÊNDICE 4), determinação do período de decaimento inicial (tubo submerso), confirmação da curva de decaimento das amostras, desenvolvimento e teste dos sistemas de segurança e proteção radiológica (APÊNDICE 3).

2 - CARACTERÍSTICAS NUCLEARES DAS AMOSTRAS

a) Principais componentes

O cimento é constituído por 7 elementos principais agrupados em compostos complexos e elementos secundários em pequenas quantidades sob forma de óxidos:

ELEMENTOS PRINCIPAIS

AL Ca Fe S S_i O H

ELEMENTOS SECUNDÁRIOS

Mg Na K L_i T_i Ba Cr V P B
Mn As Sb Mo Sr Zn W

As impurezas presentes são características de uma partida de cimento em particular e devem estar presentes em quantidades inferiores a 1%. A pasta de cimento apresenta ainda as impurezas trazidas pela água de amassamento.

b) Operação de Irradiação - Resumo

1. dispositivo inserido no caroço - reator "desligado".
2. Registrador de temperatura permanece ligado durante todo o período de irradiação (24 horas/dia).
3. Gêlo do sistema de referência do termo-par renovado diariamente - (antes da partida do reator).
4. anota-se pelo menos 4 pontos de referência horária na curva de temperatura.
5. Pressão indicada pelo manômetro conferida pelo menos 4 vezes ao dia (P=0,1 atm devido à elevação de

temperatura).

6. Amostras TIPO 4 (simulação de temperatura) são mantidas em estufa simultaneamente aos ciclos de operação do reator.
7. Completado o período de irradiação, o dispositivo é retirado do caroço (reator desligado), alivia-se a pressão no interior do tubo; a mistura ar-argônio é coletado por um dispositivo de sucção de gases (o detetor não indica radioatividade no gás).
8. Mantendo-se o tubo de irradiação parcialmente submerso procede-se à operação de troca de tubos. O tubo contendo amostras irradiadas é vedado, convenientemente identificado e ancorado à borda da piscina para decaimento inicial das amostras.

OBS.: foram utilizados 4 tubos de irradiação e dois termopares, utilizados alternadamente.

9. Após certo período de decaimento as amostras são transferidas para castelos de chumbo e o tubo é reutilizado em irradiações seguintes.

c) Monitoração das Amostras

O decaimento inicial é acompanhado efetuando-se monitorações periódicas, retirando-se parcialmente o tubo da água até que a aproximação das amostras seja possível dentro dos limites de dose recomendados pela I.C.R.P. (International Commission of Radiological Protection). O período mínimo no caso das amostras em estudo é de 30 dias.

OBS.: a permanência do tubo submerso na piscina do reator é estendido ao período máximo permitido pelo esquema de rodízio de tubos (cerca de 40-60 dias nas irradiações finais).

A observação do decaimento de cada amostra é realizada utilizando-se um detector VICTOREEN 4.4.4. As leituras são feitas a distâncias de aproximadamente: 0 (superfície) - 5-10-20-30-50 centímetros da amostra (FIGURA A2.1).

O cimento estudado mostrou-se sensível em termos de ativação à pequenas variações do fluxo integrado (FIGURA A2.2). O alinhamento dos pontos neste gráfico indica a proximidade do fluxo integrado teórico (calculado a partir do fluxo instantâneo médio) e do fluxo integrado real nas amostras estudadas.

OBS.: o decaimento das amostras irradiadas (Lote 1,2,3,4,5, 6,) é acompanhado com base nos gráficos obtidos na irradiação "00" (8 gráficos) (FIGURA A2.1). As leituras são feitas a 10 e 50 cm de distância da amostra mais ativada do lote.

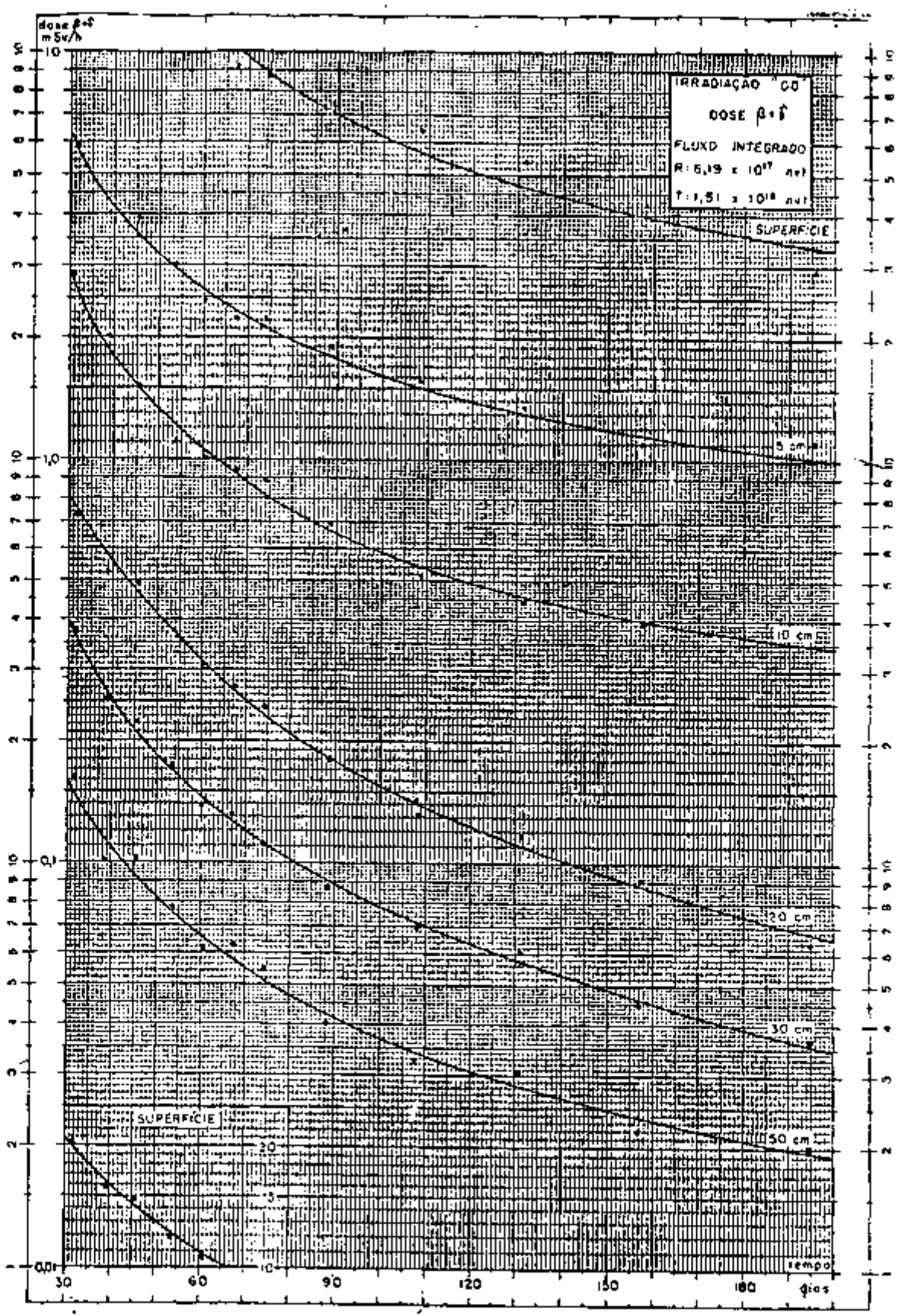


FIGURA A.2.1(a) - Decaimento da radiação $\beta + \gamma$ - amostra de cimento mais ativada - atenuação da radiação no ar: leituras a distâncias: 0 (superfície) - 5-10-20-30-50 cm.

R = rápido
T = térmico

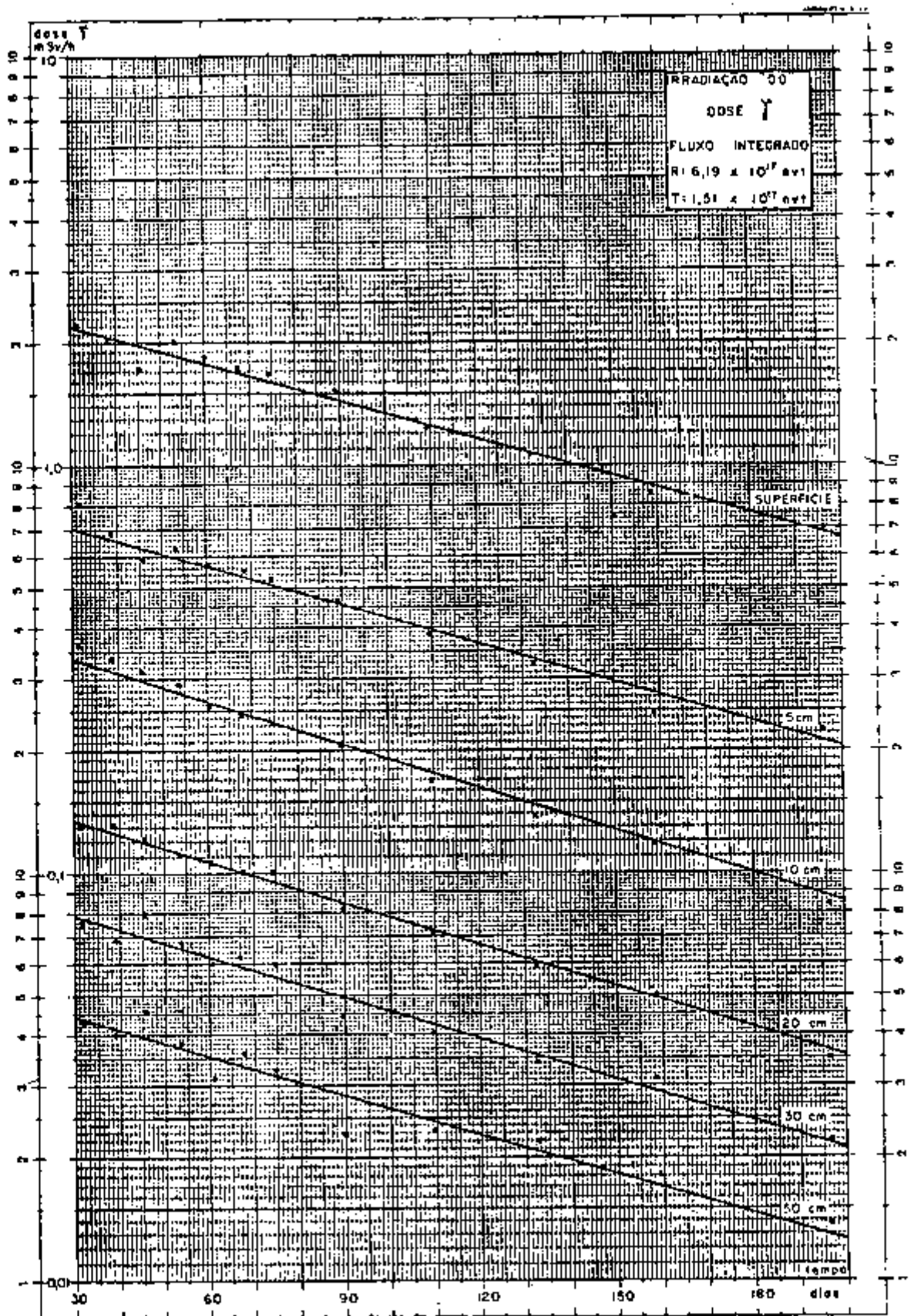


FIGURA A2.1(b) - Decaimento da radiação γ amostra de cimento mais ativada - atenuação da radiação no ar: leituras a distâncias: 0 (superfície)-
 R = rápido
 T = térmico
 5-10-20-50 cm.

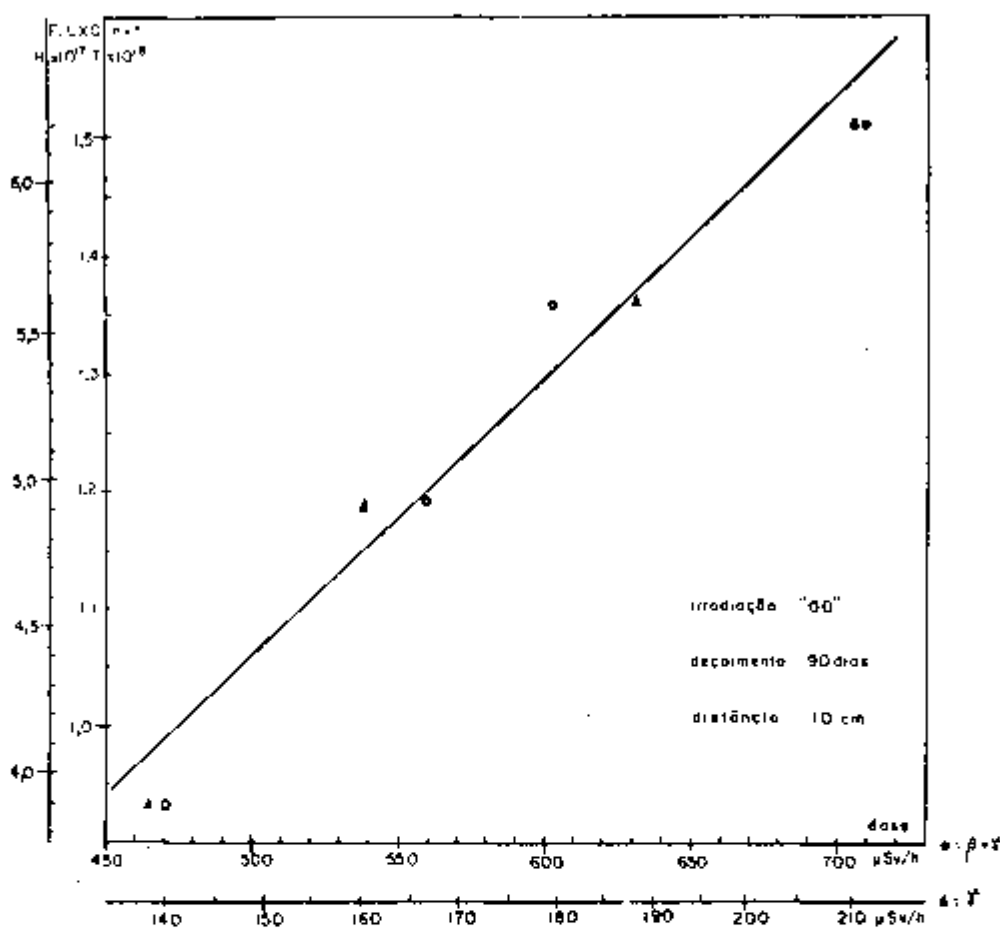


FIGURA A2.2 - Influência do fluxo integrado na ativação das amostras.

R = rápido

T = têrmico

d) Identificação dos Elementos Ativados

O espectro de emissão radioativa de uma amostra é analisado em um multicanal HEWLET PACKARD de 8192 canais equipado com detector de germânio lítio. A contagem é feita com a amostra posicionada a 20 cm de altura no porta amostras e o tempo de contagem é 5 minutos. A observação do decaimento de cada pico de energia permite a confirmação dos elementos identificados.

OBS.: leituras a 31-45-74-118-146-178-233 dias de decaimento.

Foram encontrados 17 picos de energia com amplitude de significativa, nas condições descritas. Os picos de maior amplitude se localizam nas energias de 839,9 e 1121,8 keV (TABELA A2.1; FIGURA A2.3).

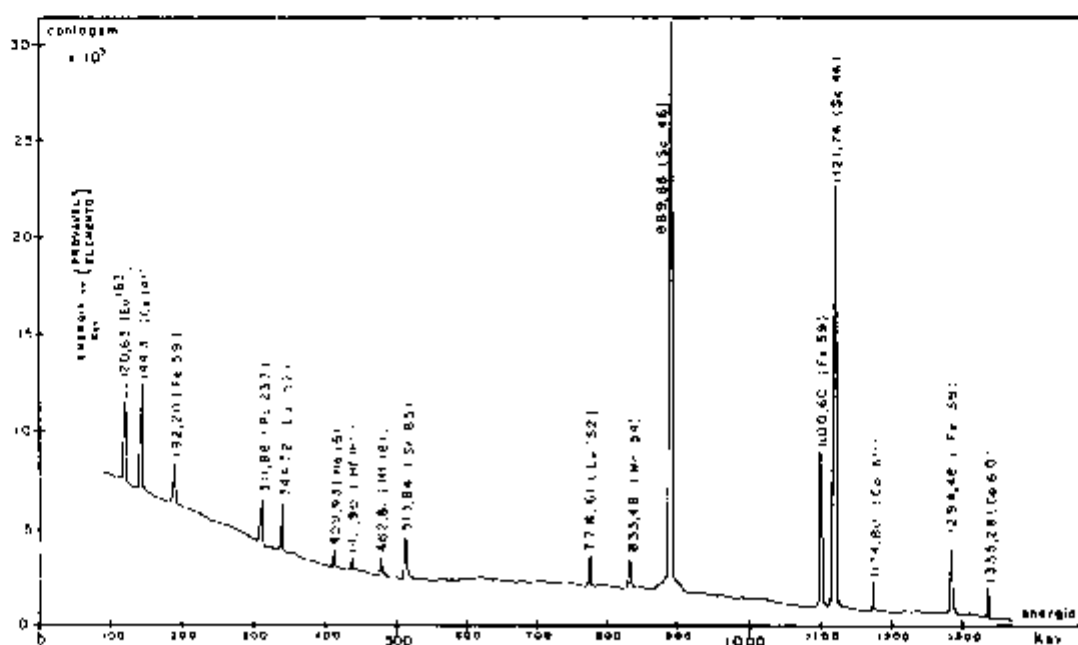


FIGURA A2.3 - Espectro de emissão radioativa do cimento estudado.

ENERGIA (keV)		PROVÁVEL ELEMENTO	1/2 VIDA
39,02			
44,46			
58,54		região de	
66,54		raio X	
73,90			
83,82			
120,63	*	^{152}Eu	12,3 a
144,31	*	^{141}Ce	40 d
192,20		^{59}Fe	45 d
311,88	*	^{233}Pa	27,4 d
344,52		^{152}Eu	12,2 a
409,93	*	^{166}Ho	30 a
442,90	*	^{180}Hf	5,5 a
482,81	*	^{181}Hf	42,5 d
513,84	*	^{85}Sr	64 d
778,61	*	^{152}Eu	12,2 a
835,48	*	^{54}Mn	291 d
889,88	*	^{46}Sc	** 83,9 d
1100,60	*	^{59}Fe	45,1 d
1121,76	*	^{46}Sc	** 83,9 d
1174,80	*	^{60}Co	5,24 a
1294,48	*	^{59}Fe	45,1 d
1335,28	*	^{60}Co	5,24 a

TABELA A2.1 - Prováveis elementos ativados no cimento estudado.

d: dias

a: anos

* Decaimento acompanhado em multicanal.

** Picos de maior amplitude.

3 - VALIDADE DOS RESULTADOS

O conhecimento das características nucleares das amostras está principalmente relacionado ao aspecto de segurança. A execução do programa de ENSAIOS (item 2.3.2) considera o nível de dose em cada operação e procura distribuir as doses uniformemente em cada etapa de trabalho do período de irradiações e ENSAIOS.

Os elementos ativados podem ser classificados, em sua maioria, como impurezas da pasta. O tipo e a concentração dessas impurezas pode variar dentro de uma mesma jazida de matéria prima (calcário e argila). O espectro de emissão radioativa e o nível de dose encontrados são, portanto, característicos aos lotes estudados, não sendo possível uma generalização dos resultados ao cimento em geral.

APÊNDICE 3SISTEMAS DE SEGURANÇA1 - INTRODUÇÃO2 - LIMITES DE DOSE

- a) Limites anuais e trimestrais
- b) Campo de radiação
- c) Atenuação da radiação β em luvas de borracha

3 - NÍVEL DE DOSE

- a) Irradiação
- b) Ensaio
- c) Estocagem final

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos sistemas de segurança é feito com base nas normas recomendadas pela I.C.R.P. (International Commission of Radiological Protection). Considerando que são ainda pouco conhecidos os efeitos biológicos de baixas doses de irradiação em períodos prolongados de exposição, procurou-se manter "tão baixo quanto possível, ou razoavelmente alcançável", o nível de dose nas operações e ensaios, respeitando os limites anuais e trimestrais estabelecidos pela comissão.

Três elementos devem ser considerados na proteção contra radiações ionizantes: TEMPO de exposição, DISTÂNCIA da fonte emissora e ANTEPARO entre a fonte e o elemento a ser protegido.

As atividades que não envolvem a manipulação de materiais radioativos requerem cuidados de ordem geral; particularmente na operação de mistura, moldagem e regularização de superfície das amostras de cimento, devem ser utilizadas luvas de borracha e máscara (filtros de papel) para proteção contra agressão química do pó de cimento na pele e mucosa nasal.

O uso de luvas de borracha é indispensável nas operações com o dispositivo de irradiação (posicionamento, transporte, troca de tubos) devido a contaminação das partes pela água da piscina.

2 - LIMITES DE DOSE

a) Radiação Natural

Fontes naturais de radiação (minerais radioativos no solo, ar, água, alimentos, etc...), implicam em uma dose de radiação ambiente em torno de 10 micro roentgens/hora . Em certas regiões do planeta esta dose pode atingir cerca de 100 a 200 micro roentgens/hora (sudeste da Índia e Sul do Espírito Santo, Brasil) e até mesmo 1,5 mili roentgen/hora (morro do ferro - Poços de Caldas, MG), (53).

Os limites de dose recomendados pela ICRP, representam a "dose de radiação ionizante de tal magnitude que , à luz dos conhecimentos atuais, não é de se esperar que uma exposição a essa taxa durante um período indefinido de tempo, venha a causar danos apreciáveis a uma pessoa em qualquer época da vida" , (53).

OBS.: a radiação interagindo com a matéria (tecido) provoca ionização, isto é: "arranca" elétrons das camadas externas dos átomos. a transformação de átomos em íons tem repercussões de ordem química que acarretam efeitos biológicos , (53).

1 Roentgen = 10^{17} ionizações no corpo humano médio

1 Roentgen no ar = 1 RAD em tecidos moles = 1 REM para radiação β e γ = 10 Milisievert (mSv).

b) Limites Anuais e Trimestrais

Limite anual de dose é o valor máximo permissível

de dose acumulada em um período qualquer de um ano. A dose máxima permissível em uma exposição é limitada à dose trimestral desde que este valor não seja ultrapassado em um período qualquer de três meses.

Os limites derivados correspondem à dose horária que, se recebida 8 horas por dia, 5 dias por semana e 50 semanas por ano, acumularia o valor do limite anual de dose estabelecido pela norma.

UNIDADE	LIMITE DE DOSE		LIMITES
	ANUAL	TRIMESTRAL	DERIVADOS
	mSv	mSv	μ Sv/h
Corpo			
Medula	50	30	25
Mãos			
Antebraços			
Pés	750	400	375
Tornozelos			
Pele exceto item anterior	300	150	150
Osso			
Tireoide	300	150	150
Demais órgãos	150	80	75

TABELA A3.1 - Limites de dose recomendados pela I.C.R.P.
(International Commission of Radiological Protection).

c) Campo de Irradiação

A radiação β , que apresenta maiores níveis de dose nas amostras em estudo, possui baixo poder de penetração sendo consideravelmente atenuada nas camadas de ar próximas à amostra (~ 20 cm).

A radiação γ , de maior intensidade, é reduzida a 6% do valor inicial à distância de 20 cm da amostra.

Devido à atenuação da radiação no ar, as mãos e antebraços do operador são expostos à níveis próximos aos limites derivados anuais (FIGURA A3.2). O restante do corpo permanece protegido, sendo ocasionalmente exposto aos limites derivados anuais.

O manuseio de amostras irradiadas é feito por intermédio de pinças de alumínio, estando as mãos protegidas da radiação β por luvas de borracha (item d), (FIGURA A3.1).



FIGURA A3.1 - Pinças de alumínio.

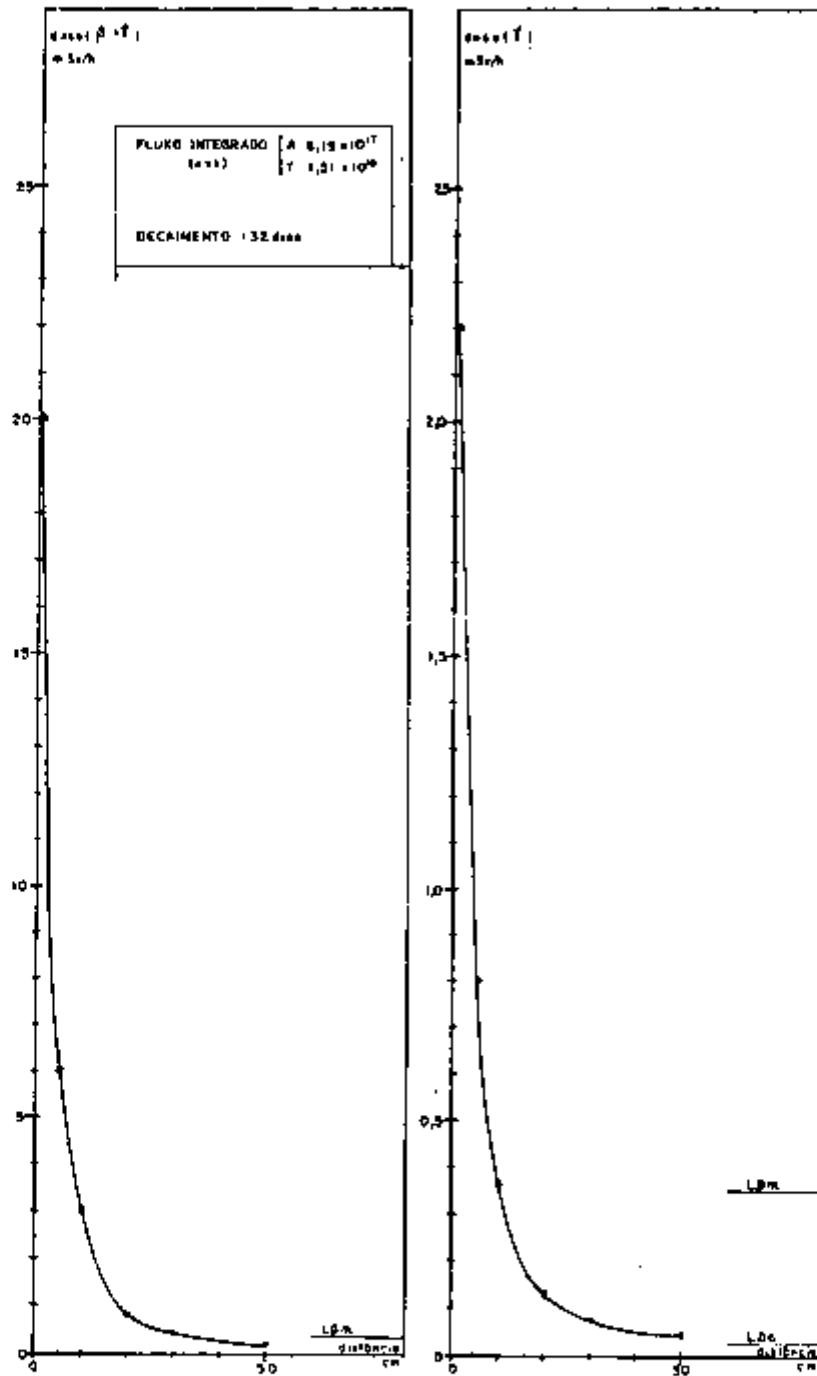


FIGURA A3.2 - Atenuação da radiação no ar.

OBS.: LD m: limite derivado - mãos

LDc: limite derivado - corpo todo.

d) Atenuação da Radiação β em Luvas de Borracha

O alto nível de radiação β nas proximidades da amostra requer proteção adicional para as mãos, além do emprego de pinças. O uso de luvas de borracha produz uma redução da dose β , variável com a distância (FIGURA A3.3). A radiação γ não é sensivelmente atenuada na espessura da borra-
cha da luva.

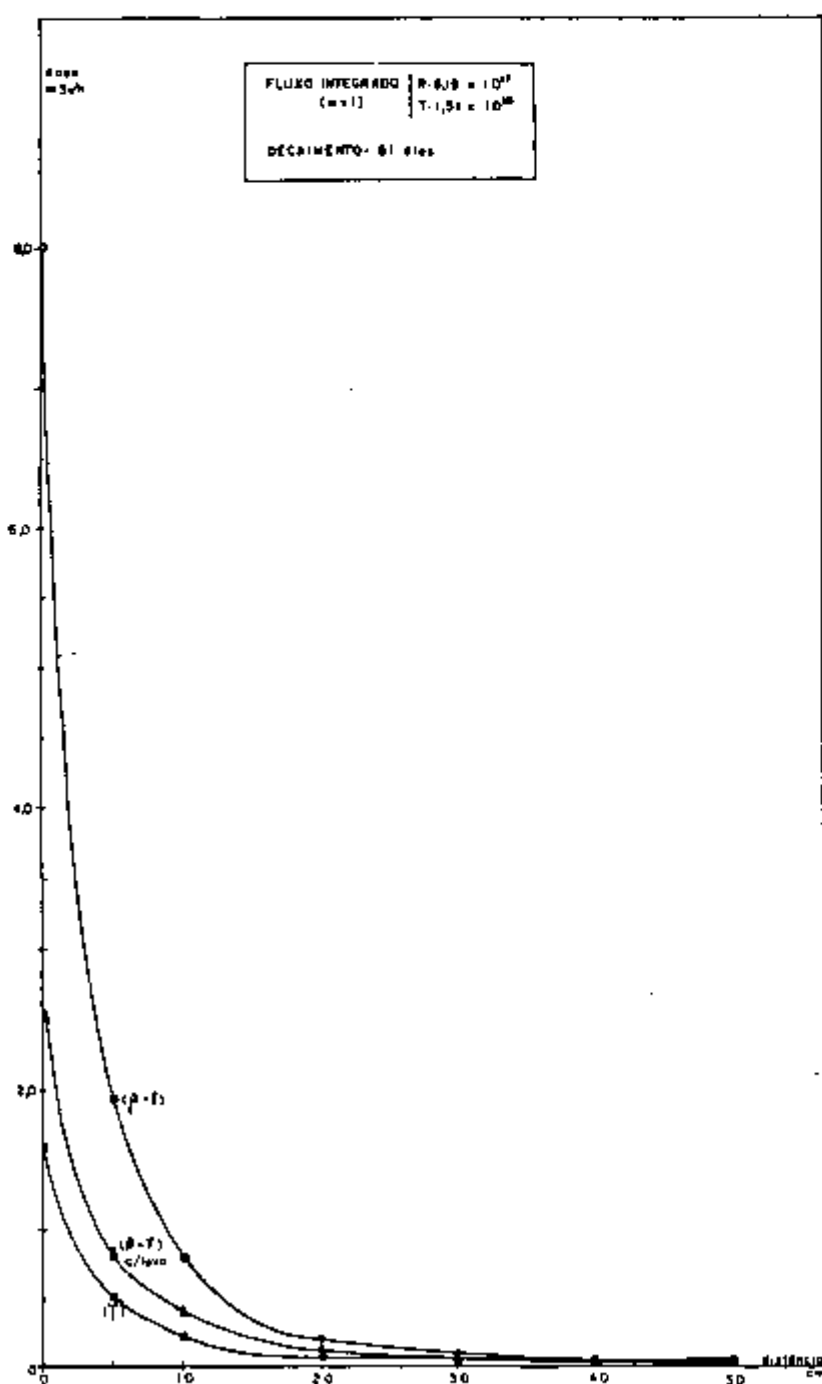


FIGURA A3.3 - Atenuação da radiação β em luvas de borracha anti-derrapante.

3 - NÍVEL DE DOSE NAS OPERAÇÕES

a) Irradiação

A operação de irradiação implica em dose absorvida pelo corpo todo ao nível de radiação de fundo local (sala do reator) em torno de $10 \mu\text{Sv/h}$.

O gás recolhido pelo sistema de sucção de gases (gás sob pressão no dispositivo de irradiação) não apresenta radiação detectável pelos aparelhos de monitoração em uso.

Operação de troca de tubos: Na região cilíndrica formada pelo prolongamento virtual do tubo a dose observada (decaimento: 17 horas) é cerca de $100 \mu\text{Sv/h}$. Na região circunvizinha a dose corresponde à radiação de fundo local (FIGURA A3.4).

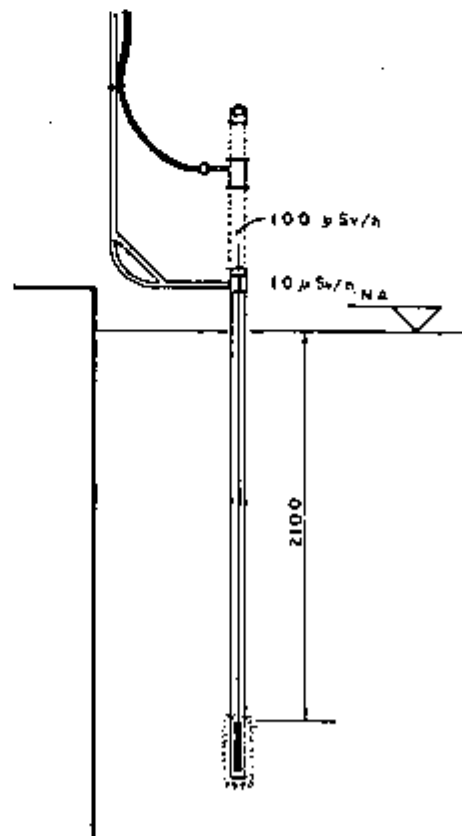


FIGURA A3.4 - Nível de dose na operação de troca de tubos.

A transferência das amostras para castelo de chumbo é feita após, pelo menos, 32 dias de decaimento na piscina do reator (FIGURA A3.5). A dose na superfície do castelo é, nessa ocasião, cerca de $600 \mu\text{Sv/h}$ (FIGURA A3.6).

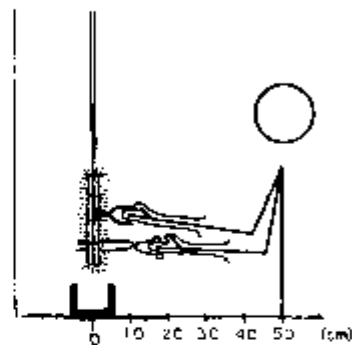


FIGURA A3.5 - Transferência das amostras para castelo de chumbo.

No transporte das amostras (feito em 2 castelos de chumbo) a distância mínima entre corpo e o castelo é de aproximadamente 130 cm (FIGURA A3.7). A dose nesta região é menor que $0,4 \mu\text{Sv/h}$.

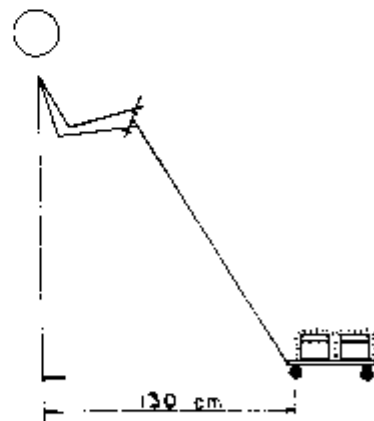


FIGURA A3.7 - Transporte dos castelos de chumbo.

A transferência das amostras para castelo de chumbo é feita após, pelo menos, 32 dias de decaimento na piscina do reator (FIGURA A3.5). A dose na superfície do castelo é, nessa ocasião, cerca de $600 \mu\text{Sv/h}$ (FIGURA A3.6).

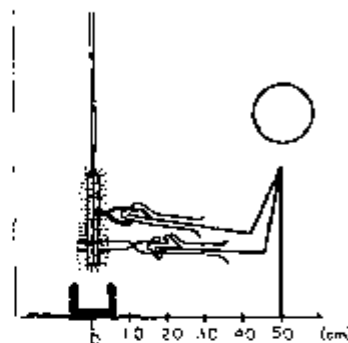


FIGURA A3.5 - Transferência das amostras para castelo de chumbo.

No transporte das amostras (feito em 2 castelos de chumbo) a distância mínima entre corpo e o castelo é de aproximadamente 130 cm (FIGURA A3.7). A dose nesta região é menor que $0,4 \mu\text{Sv/h}$.

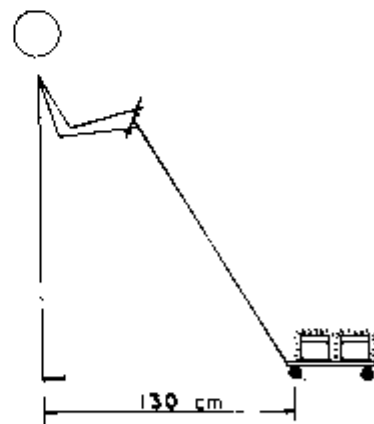


FIGURA A3.7 - Transporte dos castelos de chumbo.

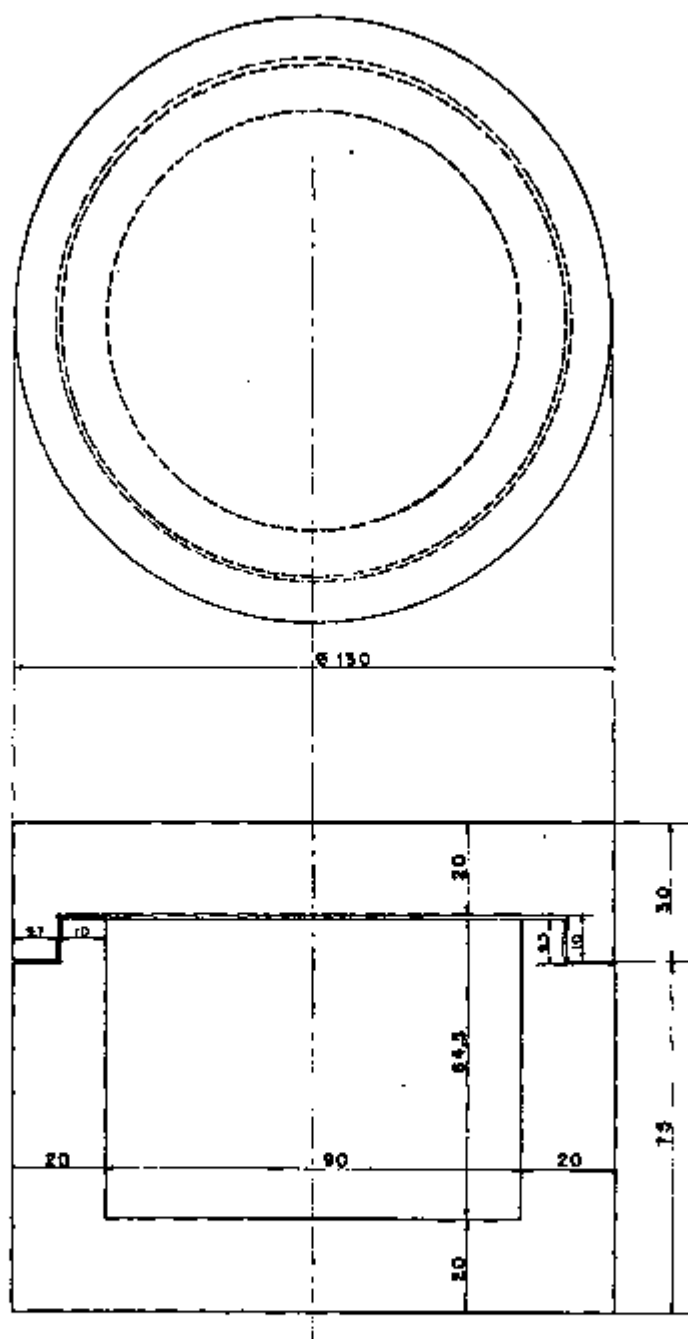


FIGURA A3.6 - Castelo de chumbo.

Volume de chumbo : $980,18 \text{ cm}^3$

Peso do castelo: 11 115g

b) Ensaios

O período de decaimento entre a irradiação e o ENSAIO 4 varia entre 41 e 70 dias (APÊNDICE 6). Nas vésperas deste ensaio faz-se uma monitoração de área da amostra mais ativada do lote.

No decorrer das diversas etapas de um ENSAIO (item 2.3.1) as amostras irradiadas são separadas em 2 castelos (amostras sem secagem prévia, amostras secas em estufa). Em todas as etapas utiliza-se luvas de borracha e pinças de alumínio:

1. MEDIDA DE COMPRIMENTO: realizada com paquímetro. Tem duração máxima de 60 segundos (4 amostras). Utiliza-se como proteção um muro de chumbo (5 cm de espessura) e a mesa de concreto (10 cm de espessura), (FIGURA A3.8).

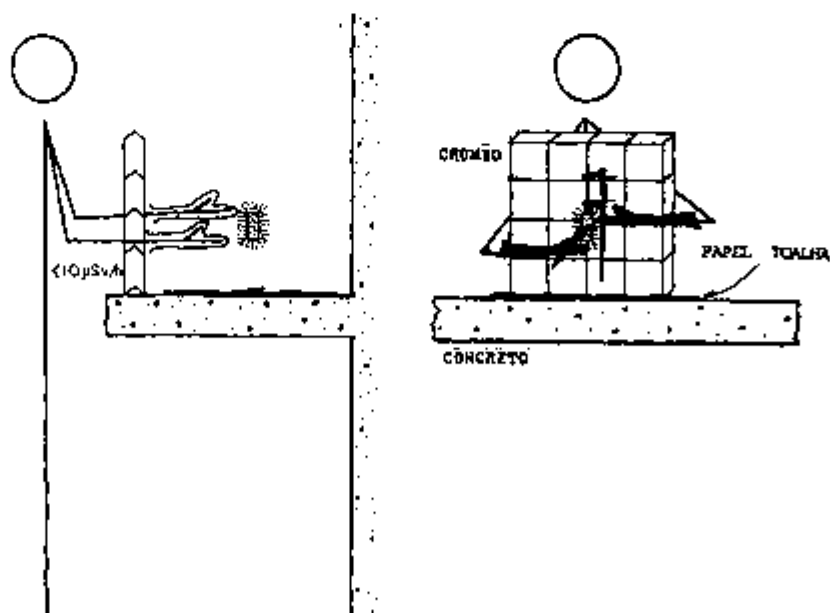


FIGURA A3.8 - Medida das dimensões de amostras irradiadas.

2. PESAGEM DAS AMOSTRAS: a atenuação da radiação no ar e no vidro de proteção da balança permite a operação de pesagem sem o uso de dispositivos especiais de proteção. A operação tem duração máxima de 2 minutos (FIGURA A3.9).

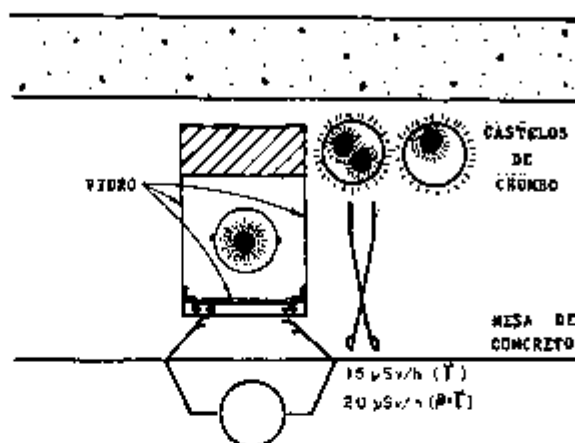


FIGURA A3.9 - Pesagem das amostras irradiadas.

3. ENSAIO DE RESSONÂNCIA: proteção de muro de chumbo com 5 cm de espessura; duração de ensaio - 10 segundos.

Os possíveis resíduos de cimento irradiado desprezados das amostras pela ação do posicionamento são recolhidos pelo papel toalha que reveste uma calha de alumínio (comprimento 20 cm) localizada sob a amostra (FIGURA A3.10).

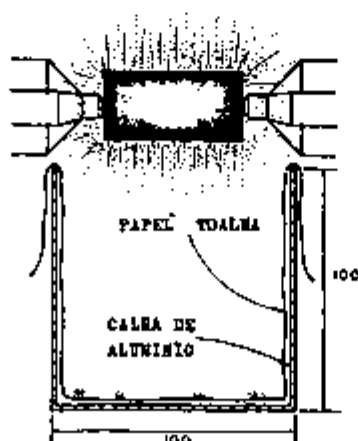


FIGURA A3.10 - Ensaio de ressonância - Proteção contra contaminação.

4. ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO: proteção de muro de chumbo com 5 cm de espessura. Duração máxima do ensaio: 60 segundos.

OBS.: uso de luvas de borracha (FIGURA A3.11).

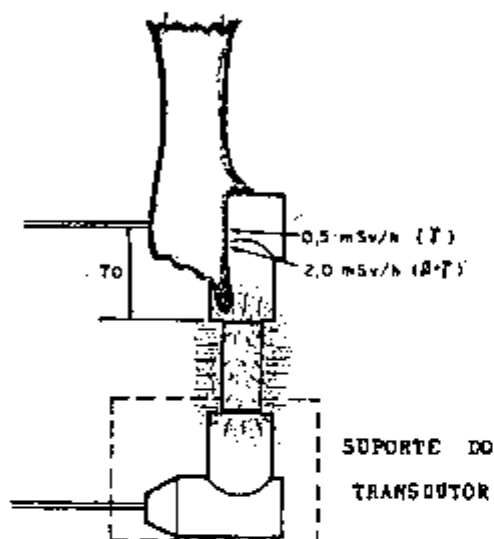


FIGURA A3.11 - Ensaio de velocidade de pulso em amostras irradiadas.

A disposição dos aparelhos é planejada em função da simplicidade e segurança nos ensaios (FIGURA A3.12).

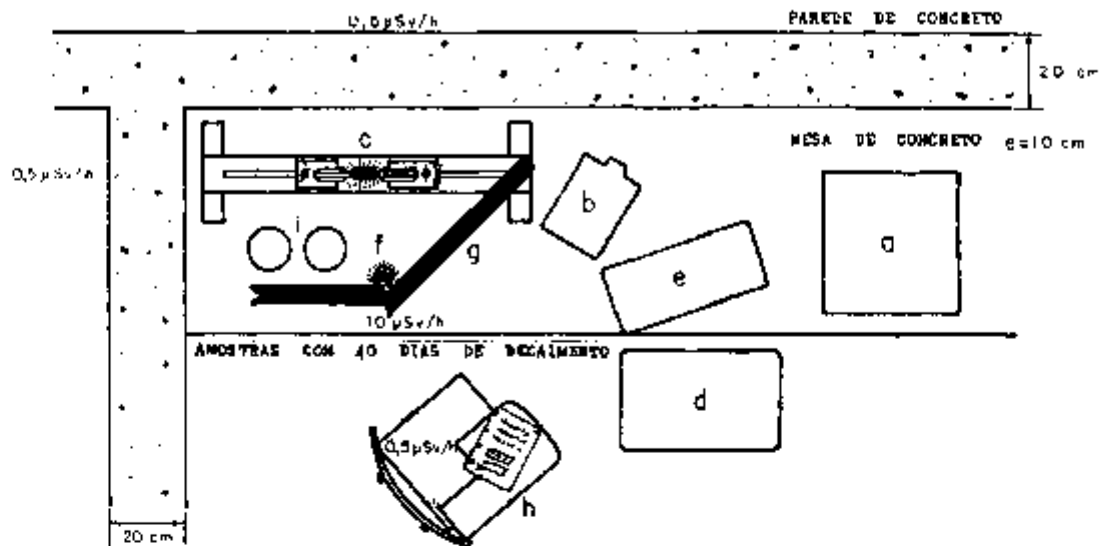
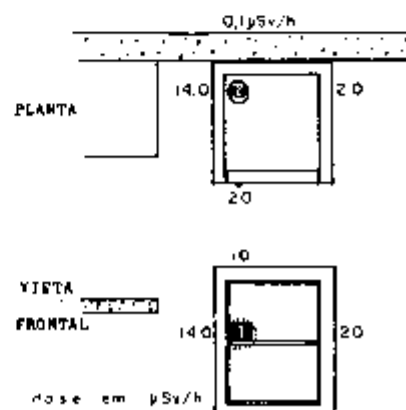


FIGURA A3.12 - Disposição dos aparelhos na montagem utilizada nos ensaios.

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| a) estabilizador de tensão. | f) transdutores de pulso |
| b) gerador de funções. | g) muro de chumbo (e=5cm). |
| c) mesa e transdutores - (FR). | h) posição do operador. |
| d) osciloscópio. | i) castelos de chumbo. |
| e) gerador/receptor de pulso | |

5. SECAGEM DAS AMOSTRAS: as amostras irradiadas (TIPO 3) são levadas à estufa em um recipiente de papel de alumínio que recolhe possíveis resíduos de cimento ra-



dioativo (FIGURA A3.13). A superfície externa da estufa é monitorada e os níveis de dose são afixados nos locais correspondentes.

FIGURA A3.13 - Secagem de amostras irradiadas.

6. DESCONTAMINAÇÃO: as amostras não irradiadas são ensaiadas em primeiro lugar. Terminando o ensaio do lote as pinças, paquímetro e transdutores são descontaminados com tetracloreto de carbono em algodão, as folhas de papel toalha são trocadas e as amostras são armazenadas em local apropriado.

OBS.: o material utilizado na descontaminação é depositado em lixo radioativo.

APÊNDICE 4EFEITOS TÉRMICOS1 - INTRODUÇÃO2 - CURVAS DE TEMPERATURA3 - SIMULAÇÃO EM ESTUFA

- a) Amostras irradiadas
- b) Amostras de controle
- c) Gradiente de temperatura
- d) Programa de ensaios

1 - INTRODUÇÃO

A atenuação da radiação em um material produz calor causando aumento localizado de temperatura. Devido à baixa condutividade térmica do concreto (ou cimento) podem ocorrer elevados gradientes de temperatura no interior da massa, dando origem à tensões térmicas que, somadas às tensões causadas pelos efeitos de irradiação propriamente ditos, levam a uma deterioração das propriedades mecânicas do material (item 1.1.1 e 1.1.2).

No caso específico das amostras de cimento submetidas à irradiação no IEA - R-1, a principal fonte de calor é a absorção da radiação gama emitida pelo elemento combustível (γ HEATING).

A história de temperatura das amostras foi estudada na irradiação protótipo I - "00" e acompanhada nas demais irradiações com o objetivo de simular em estufa as condições térmicas das amostras irradiadas e, assim, distinguir por comparação os efeitos de temperatura dos efeitos de irradiação propriamente ditos.

2 - CURVAS DE TEMPERATURA

A história de temperatura obtida em todas as irradiações (exceto I - "0") é semelhante em todos os ciclos diários de irradiação com variação de $\pm 8^{\circ}\text{C}$. Esta variação pode ser atribuída à imprecisão de leitura do registrador.

Cerca de 10 minutos após atingida a criticalidade do reator, a temperatura das amostras atinge aproximadamente 130°C (80% do valor máximo). A temperatura máxima de 170°C é alcançada 40 minutos após atingida a criticalidade e mantém-se estável até o fim do ciclo (inserção das barras de controle), (FIGURA A4.1a).

A redução de temperatura se dá por condução de energia térmica promovida pela circulação de água no carço (caixa de irradiação) que refrigera toda a superfície do tubo de irradiação (FIGURA A4.1b).

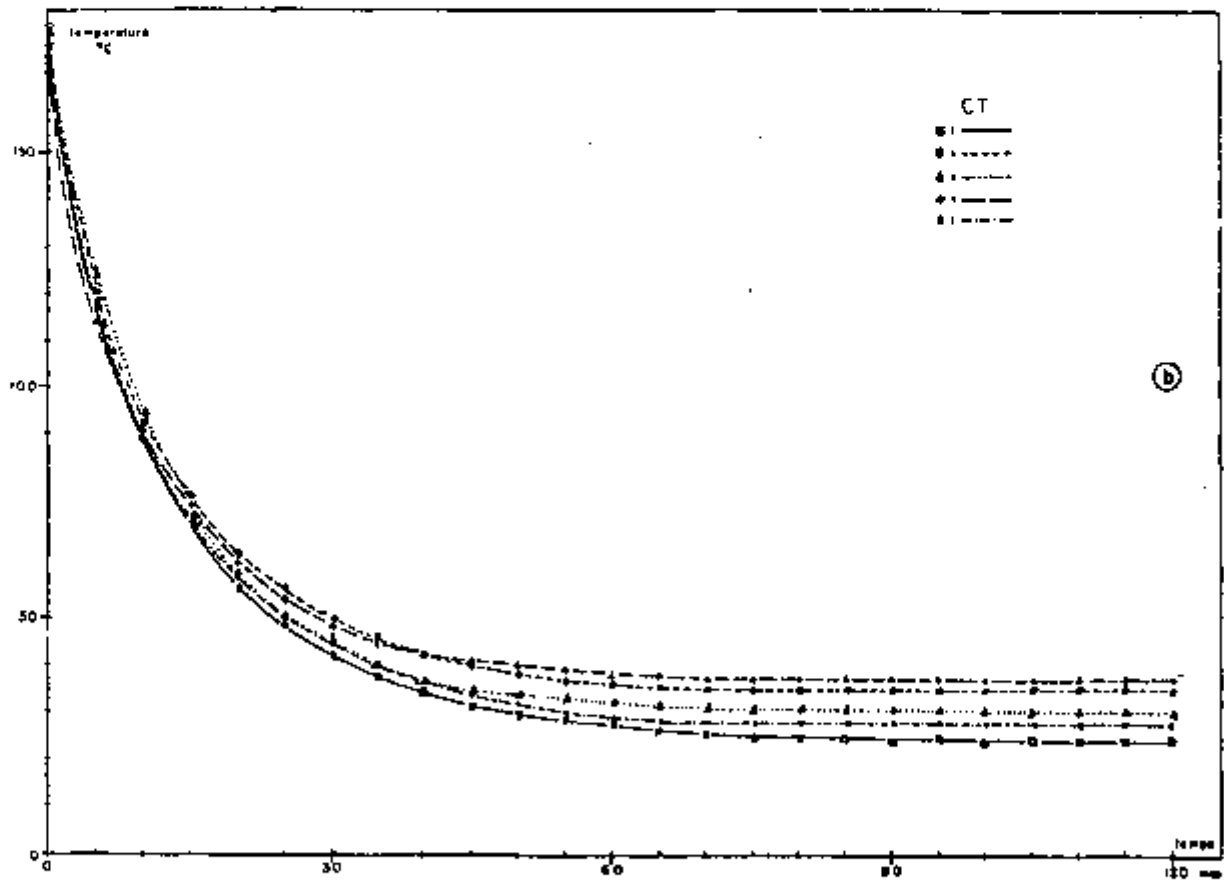
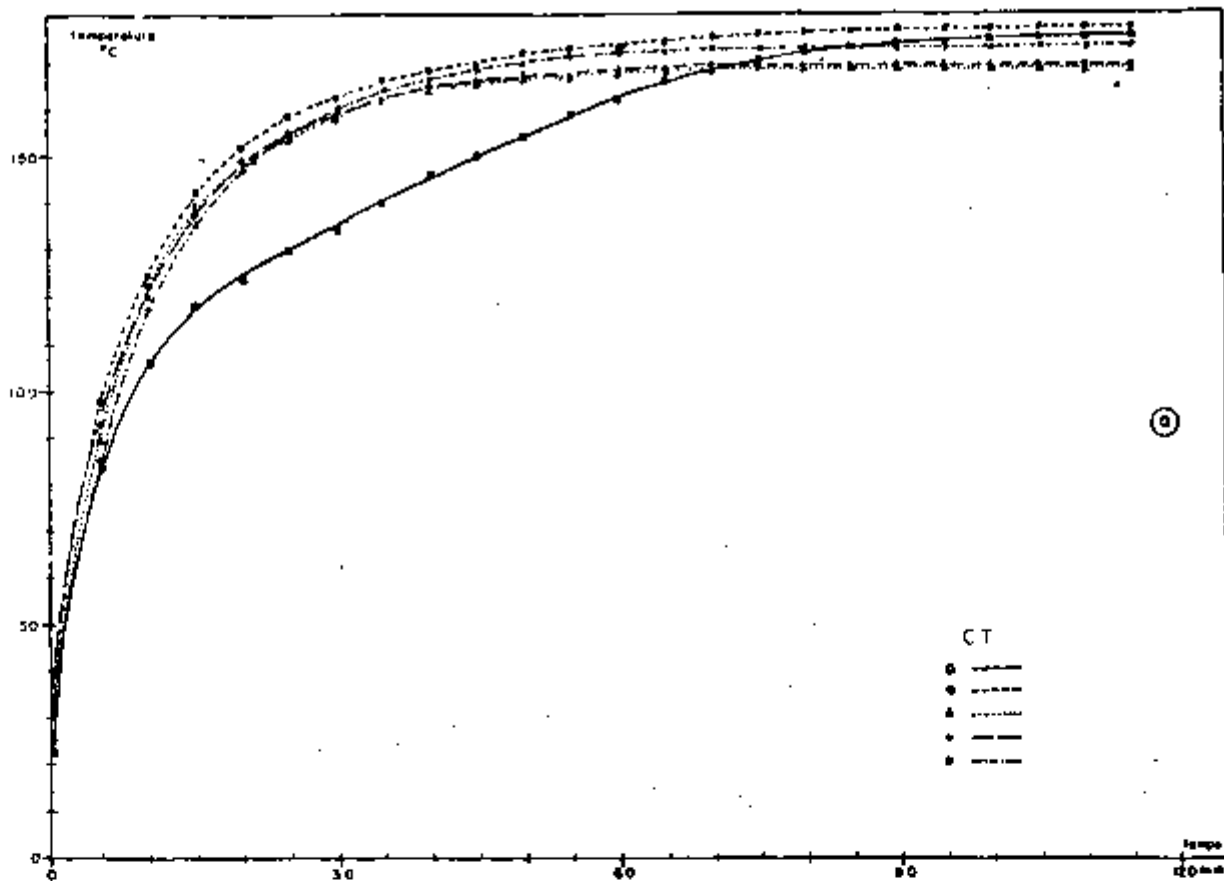


FIGURA A4.1 - Curvas de temperatura das amostras durante a irradiação.

a) início de operação do reator

b) fim de operação (reator desligado)

OBS.: CT: ciclo de temperatura

3 - SIMULAÇÃO DE TEMPERATURA

a) Amostras Irradiadas

O comprimento médio de relaxação para raios γ no concreto é cerca de 15 cm (item 1.1.2). Pode-se então considerar uma redução de intensidade da radiação γ de tal ordem que produza aquecimento uniforme da amostra de cimento ($d = 3,0$ cm). O gradiente e as consequentes tensões térmicas no início de operação do reator são, portanto, de ordem reduzida.

Quando, no término do ciclo de operação, as barras de controle são introduzidas no caroço, temos a interrupção imediata dos raios γ prontos de fissão. A radiação γ proveniente do decaimento dos produtos de fissão não contribui significativamente para o aumento de temperatura no cimento ($T \sim 30^{\circ}\text{C}$). O resfriamento se dá gradualmente por condução. O gradiente térmico assim criado é diferente daquele produzido no aquecimento.

b) Amostras de Controle

A elevação de temperatura no interior da estufa causa, por condução, a elevação de temperatura na amostra de cimento. O ambiente ventilado e a pressão atmosférica contribuem para maior perda de água e a consequente fissuração da amostra, que é visível a olho nu após o primeiro tratamento térmico.

Todas as amostras submetidas aos ciclos térmicos em estufa apresentaram elevado grau de fissuração (fissuras de até 0,5 mm).

c) Gradiente de Temperatura

Duas diferenças fundamentais relacionadas ao gradiente térmico nas amostras surgem em função dos diferentes meios de aquecimento:

1. Em amostras irradiadas o aquecimento é resultante da absorção dos raios gama e pode ser considerado uniforme na massa da amostra.

2. Em amostras de controle o aquecimento se dá por condução da energia térmica no sentido superfície-centro da amostra.

A curva de elevação e redução de temperatura é , provavelmente, diferente em cada caso: no caroço do reator, os raios γ atingem intensidade máxima em poucos minutos , enquanto a elevação de temperatura na estufa é lenta; o resfriamento da amostra no caroço é acelerado pela circulação de água em torno do tubo de irradiação e pela convecção do ar dentro do tubo enquanto a dissipação do calor na estufa é lenta e gradual.

O gradiente térmico na amostra e as conseqüentes tensões térmicas são diferentes em cada caso. Os resultados finais do presente trabalho (CAPITULO 3 e 4) indicam que , em termos de redução de velocidade de pulso e frequência de ressonância, estas diferenças não são detectáveis com os instrumentos disponíveis.

d) Programa de Ensaio

A importante ação da temperatura no cimento (e con

creto) faz necessária a simulação das condições térmicas de irradiação em amostras de controle. Nas amostras TIPO 4 (simulação de temperatura) procura-se reproduzir a história de temperatura das amostras TIPO 3 (irradiadas após secagem prévia) a fim de possibilitar a distinção de efeitos de irradiação e efeitos de temperatura. As amostras TIPO 5 fornecem referência para os efeitos da secagem prévia do cimento nas amostras TIPO 3.

Estes procedimentos permitem, por intermédio de estudo comparativo, maior definição dos efeitos de cada procedimento em cada etapa de ENSAIO.

OBS.: a secagem prévia de amostras ($T_{3,4,5}$) provoca grande perda de água (20% em peso) causando redução de resistência anterior à irradiação (item 4.2). Os procedimentos TIPO 1 e 2 (controle ar livre e irradiação sem secagem prévia) possibilitam a observação da influência da secagem prévia no comportamento dos resultados.

APÊNDICE 5CÁLCULO DE PROPAGAÇÃO DE ERRO1 - INTRODUÇÃO2 - CÁLCULO DE PROPAGAÇÃO

- a) Volume
- b) Peso Específico
- c) Frequência de Ressonância Calculada
- d) Frequência de Ressonância Medida
- e) Velocidade de Pulso
- f) Velocidade de Pulso/Peso Específico
- g) Frequência de Ressonância Estudada/Frequência de Ressonância Observada
- h) Porcentagem de Água
- i) Módulo de Elasticidade Dinâmico

1 - INTRODUÇÃO

Resultados experimentais estão sujeitos a erros que podem ser classificados em erros sistemáticos e erros aleatórios. Os erros sistemáticos estão presentes na mesma proporção em todas as medidas; os erros aleatórios surgem ao se repetir a medida de uma mesma quantidade, (52).

ERROS SISTEMÁTICOS

- . erros de calibração dos instrumentos
- . vícios de leitura
- . condições experimentais
- . técnicas imperfeitas

ERROS ALEATÓRIOS

- . erros de julgamento na leitura
- . flutuações nas condições de ensaio
- . pequenas perturbações
- . uniformidade das características

Existem também os erros grosseiros devido ao processo de cálculo (erros de aproximação), equívocos (erros de leitura), estabelecimento das condições de ensaio, cálculo dos resultados e erros caóticos, quando os desvios produzidos por perturbações no ensaio são maiores que o erro aleatório (estabilidade dos aparelhos).

Estes erros tendem a ser minimizados com um maior cuidado e atenção experimental, (52).

2 - CÁLCULO DE PROPAGAÇÃO

Se um resultado "R" é calculado a partir de uma quantidade medida "x" por meio de uma relação teórica $v = f(x)$, este resultado é afetado por um erro dR resultante dos erros "dx" da medida. A relação entre dR e dx pode ser determinada pelo cálculo diferencial; generalizando para

"R" função de mais de uma variável independente temos:

$$V = f(x, y, z, \dots)$$

$$dv = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial x}\right)^2 dx^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial y}\right)^2 dy^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial z}\right)^2 dz^2 + \dots}$$

A precisão de leitura das medidas introduz assim um erro nos resultados que limita o número de casas significativas dos valores calculados.

PRECISÃO DAS QUANTIDADES MEDIDAS

Quantidade	Unidade	Precisão de leitura
Altura	(cm)	$h, h \pm 0,005$
Diâmetro	(cm)	$d, dd \pm 0,005$
Peso	(gf)	$p, pp \pm 0,0005$
Tempo de trânsito	(μs)	$t, t \pm 0,2$
Período de Ressonância	(μs)	$t, t \pm 0,2$

a) Volume (cm)

$$v = \frac{\pi x^2 y}{4}$$

$x = d$: diâmetro

$y = h$: altura

$$dv = \sqrt{\left(\frac{\pi x y}{2}\right)^2 dx^2 + \left(\frac{\pi x^2}{4}\right)^2 dy^2}$$

$$dv < 0,04 \text{ cm}^3$$

b) Peso Específico gf/cm²

$$\rho = \frac{x}{y}$$

x = P + Peso

$$d\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{y}\right)^2 dx^2 + \left(-\frac{x}{y^2}\right)^2 dy^2}$$

y = v + volume

$$d\rho < 0,007 \text{ gf/cm}^3$$

c) Frequência de ressonância calculada (KHz)

$$FRe = \frac{1}{2x} K$$

x = t_{tr} + tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.

$$dFRe = \sqrt{\left(-\frac{1}{2x^2}\right)^2 K^2 dx^2}$$

K = constante para transformação de unidades.

$$dFRe < 0,4 \text{ KHz}$$

d) Frequência de ressonância medida (KHz)

$$FRo = \frac{1}{x} K$$

x = PR + Período na ressonância.

$$dFRo = \sqrt{\left(-\frac{1}{x^2}\right)^2 K^2 dx^2}$$

K = constante para unidade.

$$dFRo < 0,2 \text{ KHz}$$

e) Velocidade de pulso (Km/s)

$$Vp = \frac{x}{y} K$$

x = h + altura da amostra.

$$dVp = \sqrt{\left(\frac{1}{y}\right)^2 dy^2 + \left(-\frac{x}{y^2}\right)^2 dy^2} K$$

y = t_{tr} + tempo de trânsito do pulso.

$$dVp < 0,043 \text{ Km/s}$$

K = constante para transformação de unidade.

f) Velocidade de pulso/Peso Específico

$$Vp/\rho = \frac{Y}{X} \quad K$$

$y = Vp \rightarrow$ velocidade de pulso.

$$dVp/\rho = \sqrt{\left|\left(\frac{1}{Y}\right)^2 dx^2 + \left(\frac{-X}{Y^2}\right)^2 dy^2\right|} \quad K^2 \quad x = \rho \rightarrow \text{Peso Específico}$$

$K = +$ constante para escala.

$$dVp/\rho < 0,026$$

g) Frequência de ressonância estudada/Frequência de ressonância observada

$$FRe / FRo = \frac{X}{Y} \quad x = FRe$$

$$y = FRo$$

$$dFRe / FRo = \sqrt{\left|\left(\frac{1}{Y}\right)^2 dx^2 + \left(\frac{-X}{Y^2}\right)^2 dy^2\right|}$$

$$dFRe / FRo < 0,02.$$

h) Porcentagem de água

$$\% H_2O = \left| \frac{X - Y}{X} \right| \quad K$$

$x =$ Peso inicial

$y =$ Peso final

$K =$ constante = 100

$$d\% H_2O = \sqrt{\left|\left(\frac{Y}{X^2}\right)^2 dx^2 - \left(\frac{1}{X}\right)^2 dy^2\right|} \quad K^2$$

$$d\% H_2O < 0,07\%$$

i) Módulo de elasticidade dinâmico

$$Ed = x^2 y K$$

$x = V_p$ + velocidade de pul
so.

$$dEd = \sqrt{\left| \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} \right)^2 \right| K^2}$$

$y = \rho$ + Peso específico.

$$dEd < 6$$

$K =$ Constante.

j) Médias

$$M = \frac{x + y + z + \dots}{n}$$

$x, y, z =$ valores de mē-
dia.

$$dM = \sqrt{\left| \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^2 \dots \right| \left(\frac{1}{n} \right)^2}$$

$n =$ número de va-
lores.

$$\text{se } dx = dy = dz = \dots$$

$$dm = \frac{dx}{\sqrt{n}}$$

APÊNDICE 6

PROGRAMA DE IRRADIAÇÃO E ENSAIOS

- 1 - INTRODUÇÃO
- 2 - INTERVALO ENTRE ENSAIOS
- 3 - CICLOS DE IRRADIAÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

A concepção do programa de irradiação e ensaios teve por base os resultados obtidos nos ensaios preliminares (APÊNDICE 1), e nas irradiações protótipo (APÊNDICE 2). A influência de teor de umidade do cimento estabeleceu as condições de ensaio ($E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6$) e os estudos dos efeitos de temperatura definiram os TIPOS de procedimento adotados, (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5).

O teste final da operação de irradiação (atê à remoção das amostras para o castelo) foi realizado minuciosamente na irradiação 1, onde todas as fases foram executadas individualmente. As irradiações seguintes (2,3,4,5,6), foram realizadas em série seguindo o mesmo procedimento empregado na primeira.

O cronograma de irradiações e ENSAIOS é planejado em função da continuidade das operações de irradiação e do nível de dose nos ensaios com amostras irradiadas (tempo de decaimento).

2 - INTERVALO ENTRE OS ENSAIOS

Em virtude de os ENSAIOS de cada lote terem sido realizados em épocas diferentes, sob condições ambientes diferentes, somente são comparáveis os resultados dos ensaios em condições controladas, isto é, saturadas ou secas em estufa. A idade das amostras (tempo de cura) e o intervalo entre os ENSAIOS são, contudo, de mesma ordem de grandeza - (TABELA A 6-1).

LOTE (IDADE EM DIAS)						
ENSAIO	1	2	3	4	5	6
1	470	480	484	492	499	512
ar livre	2	2	2	2	2	3
2	472	482	486	494	501	515
ar livre	2	3	3	5	4	3
3	474	485	489	495	505	518
ar livre	4	1	2	2	3	3
irradiação	478	486	491	501	508	521
ar livre	70	54	68	63	54	41
4	548	540	559	564	562	562
ar livre	2	2	2	2	2	2
5	550	542	561	566	564	564
saturação final	46	39	13	11	8	7
6	596	581	574	577	572	571
% H ₂ O E ₆	0,15	0,21	0,04	0,54	0,65	0,62

TABELA A6.1 - Intervalo de tempo entre os ENSAIOS em cada lote.

A porcentagem final de água presente nas amostras é semelhante em todos os lotes, indicando que o tempo de saturação é menor ou igual ao tempo mínimo de sete dias (Lote 6).

3 - CICLOS DE IRRADIAÇÃO

As amostras são irradiadas diariamente das 9 às 17 h aproximadamente. São submetidas, portanto, a cinco ciclos de irradiação não contínuos, isto é, com intervalos de 16, 64 e 88 horas (Figura 6.1). Estes intervalos parecem não ter influência significativa sobre as características estudadas.

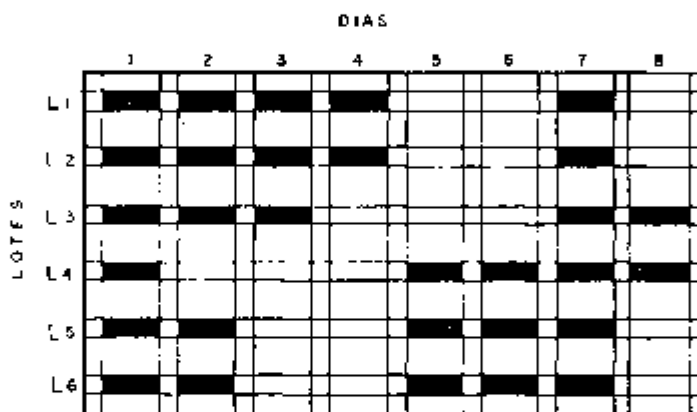


Figura 6.1 - Intervalo entre os ciclos de irradiação.

A análise individual dos resultados de cada lote não apresenta evidências de efeitos de dispersão resultantes de diferentes períodos de irradiação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREVIACÕES

CNR : Concrete for Nuclear Reactors : International Seminar on ... Held at the Bundesanstalt für Material Sprüfung. Berlin, 5.9 October 1970.

Detroit, American Concrete Institute, Special Publication SP-34, 1972.

IME : Experience in the Design, Construction and Operation of Prestressed Concrete Pressure Vessels and Containers for Nuclear Reactors : Conference on ... Held in York, England, 8.12 September 1975.

London, the Institution of Mechanical Engineers, 1976.

PCPV: Prestressed Concrete Pressure Vessels : Conference on ... Held at Church House, Westminster, SW1, 13.17 March 1967.

London, the Institution of Civil Engineers, 1968.

A - VASOS DE PRESSÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

1 . ANTONY, R.P.

Development of Statutory Requirements for Reactor Vessels.

(PCPV : PAG. 85-90)

2. BARRET, N.T.; DAVIDSON, I.
Design Philosophy and Safety (PCPV: pag. 65-71)
3. BROWNE, R.D.
Properties of Concrete in Reactor Vessels. (PCPV:
pag. 131-151).
4. BROWNE, R.D.; BLUNDEL, R.
Relevance of Concrete Properties Research to Pressure
Vessel Design., (CNR: pag. 69-102).
5. COMMON, D.K.; HANNAN, I.W.
Specification of Concrete Vessels for Gas Cooled Reac
tors., (PCPV: pag. 73-78).
6. DAVIDSON, I.; JAEGER, T.A.
Power Reactor Development and Prestressed Concrete
Pressure Vessels., (CNR: pag. 15-28).
7. DAVIES, I.LL.; DAVIDSON, I.
Concrete Properties Affecting the Integrity of Pressu
re Vessels., (PCPV: pag. 167-171).
8. DAVIS, N.S.
N Reactor Shielding., (CNR: pag. 1109-1162).
9. HANNA, I.W.
Prestressed Concrete Pressure Vessels in the United
Kingdon., (IME: pag. 1-8).
10. HAY, J.D.; EADIE, D.M.
Practical and Economic Design Aspects of Cilindricac
Vessels., (PCPV: pag. 99-104).

11. JUNGMAN, A.; KOPP, H.
Reference Design of PCPV for Pressurized Water Reactor., (IME: pag. 509-520).
12. KOMAROWSKI, A.N.
Shielding Materials for Nuclear Reactors, London, Pergamon Press, 1961.
13. LEWIS, D.J.; BYE, G.P.; CRISP, R.J.
Long Term Thermal Creep Effects in Pressure Vessels .
(PCPV: pag. 329-337).
14. MACKEN, T.; DEE, J.B.; DAVIDSON, I.
Prestressed Concrete Reactor Vessels Design and Development for Gas Cooled Fast Reactor., (IME: pag. 1-8).
15. PIHLAJAVAARA, S.E.
Preliminary Recommendation for Design, Making Control of Radiation Shielding Concrete Structures., (CNR : pag. 57-67).
16. PRICE, M.A.; HORTON, C.C.; SPINNEY, B.Sc.
Radiation Shielding. London, Pergamon Press, 1957.
17. TATE, L.A.; HOLDER, M.A. ; SEATON, A.R.; NORONHA, R.I.
The Temperature Control of Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessels., (IME: pag. 83-92).
18. TAYLOR, R.S.
The Wylfa Vessel., (PCPV: pag. 13-19).
19. TORIELLI, E., ROCCA, F.
Thermal Problems in Pressure Vessels Design., (PCPV : pag. 735-737).

20. TURTON, B.J.; HUTCHINSON, J. ; OLD, R.A.B.
Evaluation of Temperature and the Design of Cooling
Systems for Pressure Vessels., (PCPV: pag. 715-733).

B - EFEITOS DE IRRADIAÇÃO NO CONCRETO

21. DAVIDSON, I.; KELLY, B.T.
Irradiation Effects on Concrete., (PCPV: pag. 173-176).
22. ELLEUCH, M.F.; DUBOIS, S.F.; RAPPENEAU, J.
Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and
Their Components., (CNR: pag. 1071-1108).
23. ELLEUCH, M.F.; DUBOIS, S.F.; RAPPENEAU, J.
Behaviour of Special Shielding Concretes and of Their
Constituents Under Neutron Irradiation.
On Fourth United Nations International Conference on
the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva Switzerland,
6-16 September 1971. Geneva, 1972.
24. GRANATA, S.; MONTAGNINI, A.
Studies on Behaviour of Concrete Under Radiation. ,
(CNR: pag. 1163-1176).
25. PEDERSEN, A.
"Radiation Damage in Concrete - Measurements on Miniature Specimens of Cement Mortar"
Proceedings of an Information Exchange Meeting on
"Results of Concrete Irradiation Programmes",
Brussels (Belgium) April 19, 1971.
EUR - 4751 Brussels, 1971.

C - DANOS DE IRRADIAÇÃO

26. LEIBFRIED, G.

Introduction into Radiation Damage Theory on Proceedings of the International Summer School on Solid State Physic Held on Mol, Belgium, August, 12-31, 1963
Amsterdam North Holland Publishing Company, 1964 (pag. 1-32).

27. THOMPSON, M.W.

Defects and Radiation Damage in Metals., Cambridge University Press, 1969. ✓

D - FÍSICA E ENGENHARIA DE REATORES

28. EL WAKIL, M.M.

Nuclear Power Engineering., New York, McGraw-Hill Book Company, 1962.

29. GLASTONE, S.; SESONKS, A.

Nuclear Reactor Engineering., Princeton, N.J., Van Nostrand, 1967. ✓

30. LAMARSH, J.R.

Introduction to Nuclear Reactor Theory., Massachusetts, USA, Adison-Wesley Publishing Company, Inc, 1966.

31. KAPLAN, I.

Nuclear Physics., 2 ed. Massachusetts - USA, Adison Wesley Publishing Company Inc, 1964.

E - CIMENTO E CONCRETO

32. BOGUE, R.H.

The Chemistry of Portland Cement., New York, Reinhold Publishing Corporation, 1947.

33. GRUDEMO, A.

The Microstruture of Hardened Cement Paste on Proceedings of 4^o International Symposium Held on Washington, 2-7 October 1960., National Bureau of Standards, Monograph 43, 1962., (pag. 615-645).

34. KETL, F.

Cemento, Fabrication, Propriedades Aplicaciones., Barcelona, Editores Técnicos Asociados S.A., 1973.

35. LEA, F.M.

The Chemistry of Cement and Concrete., 3rd. Ed. London, Edward Arnold Publishers Ltd., 1970.

36. NEVILLE, A.M.

Properties of Concrete., 2^a. Ed. London, Pitman Publishing, 1973.

37. PETRUCCI, E.G.

Concreto de Cimento Portland., Enciclopédia Técnica Universal Globo, Volume IX., 2^a Ed. Porto Alegre, Editora Globo, 1973.

38. SOROKA, I.

Portland Cement Paste and Concrete., London, the MacMillan Press Ltd., 1979.

39. TAYLOR, H.F.W.
The Chemistry of Cements., London, Academic Press ,
1964.
40. TAYLOR, H.F.W.; ROY, D.M.
Structure and Composition of Hidrates... on Proceedings
of the Chemistry of Cement. Paris, 1980. Editions Sep
tima (Pag. 11-2/1 à 11-2/13).
41. VERBECK, G.
Pore Structure. On Significance of Testes and Proper-
ties of Concrete and Concrete Making Materials. ASTM-
Special Technical Publication 169-B (Pag. 262-280) Bal
timore, 1968.
42. VERBECK, G.; HELMUTH, R.H.
Structures and Physical Properties of Cement Pastes -
on Proceedings of the Fifth International Symposium
of Chemistry of Cement., Tokio, 7-11 October 1968 ,
(pag. 1-36).
43. WITTMAN, F.H.
Properties of Hardened Cement Paste on Proceedings of
the Fifth International Symposium of Chemistry of Ce-
ment., Paris, 1980., Editions Séptima, 1980.

G - ULTRA-SOM

44. BROWN, B.; GORDON, D.
Ultrasonic Techniques in Biology and Medicine., Spring
Field, Charles C. Thomas Publisher, 1967.

45. CARLIN, B.

Ultra Sonics., New York, McGraw-Hill Book Company Inc,
1949.

46. HUETER, T.F.; BOLT, R.H.

Sonics., New York, John Wiley & Sons Inc., 1955.

47. HUNTER, J.L.

Acoustics., Englewood Cliffs, New York, Prentice Hall
Inc. , 1957.

48. JONES, R.

Non Destructive Testing of Concrete., Cambridge, Cam-
bridge University Press, 1962.

49. ROSENBERG, L.D.; MARAKOV, L.O.

Ultra Sonic Cutting., New York, Consultants Bureau
1964.

50. VIGOUREX, P.

Ultra Sonics., London, Chapman & Hall Ltd., 1952.

51. WHITE HURST, E.A.

Evaluation of Concrete Properties from Sonic Tests
American Concrete Institute, Ames, the Iowa State Uni-
versity Press, 1966.

OUTRAS OBRAS CONSULTADAS

52. BEERS, Y.

Introduction to Theory of Error., Massachusetts, Addison
Wesley Publishing Company, Inc, 1957.

53. FREIRE_MAYA, N.

Radio Genética Humana., São Paulo, Edgard Blücher- EDUSP, 1972.

54. HELL, WALTER C.

Aplicação de Técnicas Ultra-sônicas no Estudo da In-
fluência da Temperatura sobre as Constantes Elásticas
do Cimento e Concreto em Vasos de Pressão de Concreto
Protendido de Reatores Nucleares., São Paulo, 1970 (Te-
se de Mestrado, Instituto de Energia Atômica).

55. KINGERY, W.D.

Introduction to Ceramics., 3 rd. Ed. New York, John Wi-
ley and Sons, 1965.

ERRATA

Paq. 31 - item 2.2.1-d

Osciloscópio Tectronics Type 561-A.

Time Base 2B67 Diferential Amplifier - 3A3.