

INIS-BR--2853

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**ESTUDO DE DANOS DE IRRADIAÇÃO COM NÊUTRONS**  
**RÁPIDOS POR MEIO DE ULTRA-SOM**  
**EM CIMENTO PORTLAND**

**ALEXANDRE ANACREONTE ROSA JÚNIOR**

Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Tecnologia Nuclear.

**Orientador: Dr. Georgi Lucki**

**SÃO PAULO**  
**1988**

*À minha mulher e filhas*

## AGRADECIMENTOS

- Ao Dr. Georgi Lucki, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho;
- Ao Sr. Horst H. Klein, pelo apoio técnico na operação e manutenção dos equipamentos eletrônicos do sistema de medição;
- Ao meu amigo Dr. Eddy Segura Pino, pelo incentivo e apoio;
- Ao grupo operacional do reator do IPEN-CNEN/SP, pelas irradiações efetuadas;
- A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

**TÍTULO - ESTUDO DE DANOS DE IRRADIAÇÃO COM NÊUTRONS RÁPIDOS POR EFEITO DE ULTRA-SOM EM CIMENTO PORTLAND.**

**ALEXANDRE ANACREONTE ROSA JÚNIOR**

Neste estudo foram avaliados os efeitos da irradiação neutrônica em amostras de pasta de cimento Portland. Utilizou-se para tal os métodos de frequência de ressonância e velocidade de pulso da técnica ultra-sônica. Dividiu-se as amostras em três grupos, ou seja: 1) Amostras de monitoração; 2) Amostras para simulação do aquecimento gama; 3) Amostras irradiadas com nêutrons rápidos. Na preparação das amostras, o cimento utilizado foi o Portland Santa Rita CP 520, e a taxa água-cimento de 0,40 l/kg. As irradiações foram realizadas no interior do núcleo do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP, com fluxo integrado de  $7,2 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> (E aproximada de 1 Mev). As amostras para simulação foram submetidas a tratamentos térmicos especiais com microondas, com o mesmo número de ciclos do reator, a fim de evidenciar os efeitos da irradiação neutrônica, dentro dos predominantes efeitos térmicos.

## ABSTRACT

**TITLE - STUDY OF IRRADIATION DAMAGE BY FAST NEUTRONS IN PORTLAND CEMENT BY MEANS OF ULTRA-SOUND.**

**ALEXANDRE ANACREONTE ROSA JÚNIOR**

*The effect of neutron irradiation in samples of Portland cement paste was evaluated, using the resonance frequency method and pulse velocity of ultra-sound technique. The samples were divide in three groups: 1) Monitoring samples; 2) Samples to gamma heating simulation; 3) Fast neutron irradiated samples in reactor core. Santa Rita Portland cement was utilized for samples preparation with water-cement rate of 0,40 l/kg. The irradiation was performed in the research reactor IEA-R1, at IPEN-CNEN/SP, with an integrated flux of  $7,2 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> (E approx. 1 Mev). The samples of group 2 were submitted to special micro-waves heat treatment - with the same number of cycles of the reactor - which allowed the detection of fast neutron radiation effects within the predominant thermal effects.*

## ÍNDICE

<i>Introdução e objetivos.....</i>	<i>1</i>
<b>CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS.....</b>	<b>6</b>
<i>1.1 Danos de irradiação em materiais.....</i>	<i>6</i>
<i>1.2 Efeitos da irradiação no concreto.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3 Cimento Portland.....</i>	<i>14</i>
<i>1.4 Técnicas ultra-sônicas.....</i>	<i>18</i>
<i>1.4.1 Determinação das propriedades dinâmicas.....</i>	<i>23</i>
<b>CAPÍTULO 2 - TRABALHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>28</b>
<i>2.1 Preparo das amostras.....</i>	<i>28</i>
<i>2.2 Cura.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3 Programa de ensaios.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4 Caracterização das amostras.....</i>	<i>33</i>
<i>2.5 Irradiação das amostras.....</i>	<i>41</i>
<i>2.6 Efeitos térmicos.....</i>	<i>49</i>
<b>CAPÍTULO 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>51</b>
<i>3.1 Amostras submetidas à irradiação.....</i>	<i>51</i>
<i>3.2 Amostras submetidas ao recozimento térmico cíclico....</i>	<i>52</i>
<b>CAPÍTULO 4 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DAS TABELAS

<b>TABELA 1 - Composição média do cimento Portland expressa em óxidos.....</b>	<b>16</b>
<b>TABELA 2 - Principais compostos do cimento Portland não hidratado.....</b>	<b>17</b>
<b>TABELA 3 - Composição química do cimento Portland Santa Rita CP 320 determinada através de análise por ativação.....</b>	<b>19</b>
<b>TABELA 4 - Variação nos parâmetros das amostras submetidas à irradiação.....</b>	<b>53</b>
<b>TABELA 5 - Média dos valores medidos nas amostras submetidas à irradiação e ao recozimento térmico cíclico.....</b>	<b>54</b>
<b>TABELA 6 - Variações percentuais nos parâmetros das amostras submetidas à irradiação e ao recozimento térmico cíclico.....</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 1 - Curva esquemática relacionando o fluxo relativo de nêutrons rápidos em vasos de pressão de concreto protendido e a distância da face interna....	04
FIGURA 2 - Configuração do defeito Frenkel.....	10
FIGURA 3a- Configuração do intersticial Halteres.....	11
FIGURA 3b- Configuração do intersticial Corpo Centrado.....	11
FIGURA 3c- Configuração do intersticial Crowdion.....	11
FIGURA 4a- Amplitude de vibração na amostra, na frequência fundamental de ressonância.....	22
FIGURA 4b- Amplitude de vibração na amostra, no harmônico de segunda ordem.....	22
FIGURA 4c- Amplitude de vibração na amostra, no harmônico de terceira ordem.....	22
FIGURA 5a- Posicionamento dos transdutores no método da propagação de pulso - Técnica da transmissão ou transparência.....	24
FIGURA 5b- Posicionamento dos transdutores no método da propagação de pulso - Técnica da reflexão.....	24
FIGURA 6 - Efeito das condições de cura sobre a resistência a compressão do concreto.....	30



<b>FIGURA 7 - Programa de ensaios.....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 8 - Dispositivo utilizado na determinação da frequência de ressonância.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 9 - Disposição dos equipamentos utilizados na determinação da frequência de ressonância.....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 10 - Leitura do tempo de trânsito.....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 11 - Dispositivo utilizado na determinação do pulso ultra-sônico.....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 12 - Disposição dos equipamentos utilizados na determinação do tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 13 - Equipamento utilizado na irradiação.....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 14 - Detalhamento do tubo de irradiação.....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 15 - Fixação das amostras no tubo de irradiação.....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 16 - Posicionamento das amostras no caroço do reator de pesquisas IEA-R1.....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 17 - Fluxo instantâneo de nêutrons rápidos e nêutrons térmicos nas amostras durante a irradiação.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 18 - Fluxo integrado médio de nêutrons rápidos e nêutrons térmicos em cada amostra no caroço do reator de pesquisas IEA-R1.....</b>	<b>48</b>

<b>FIGURA 19 - Variação no comprimento das amostras.....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 20 - Variação no diâmetro das amostras.....</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 21 - Variação na massa das amostras.....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 22 - Variação na frequência de ressonância das amostras.....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 23 - Variação no tempo de trânsito das amostras.....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 24 - Variação no volume das amostras.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 25 - Variação na massa específica das amostras.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 26 - Variação na velocidade de pulso das amostras...</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 27 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico das amostras (método da frequência de ressonância).</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 28 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico das amostras (método da velocidade de pulso).....</b>	<b>65</b>

## NOTAÇÃO

SÍMBOLO		DIMENSÃO
<b>g</b>	Aceleração da gravidade.....	$LT^{-2}$
<b><math>\eta</math></b>	Coefficiente de Poisson.....	
<b>c</b>	Comprimento da amostra.....	L
<b>Lp</b>	Trajectoria do pulso ultra-sônico.....	L
<b>d</b>	Diâmetro da amostra.....	L
<b>Fr</b>	Frequência de ressonância.....	$T^{-1}$
<b>f</b>	Massa específica.....	$ML^{-3}$
<b>E<sub>d</sub></b>	Módulo de elasticidade dinâmico.....	$ML^{-2}$
<b>Tt</b>	Tempo de trânsito do pulso ultra-sônico.....	T
<b>Vp</b>	Velocidade do pulso ultra-sônico.....	$LT^{-1}$
<b>V</b>	Velocidade do som.....	$LT^{-1}$
<b><math>\lambda</math></b>	Comprimento da onda.....	L
<b>t</b>	Tempo.....	T
<b>VP</b>	Vaso de pressão.....	
<b>VPCP</b>	Vaso de pressão de concreto protendido.....	
<b>AGR</b>	Advanced gas reactor.....	
<b>PWR</b>	Pressurized water reactor.....	
<b>BWR</b>	Boiling water reactor.....	
<b>SGHWR</b>	Steam generating heavy water reactor.....	
<b>UR</b>	Umidade relativa do ar.....	
<b>n</b>	Fator adimensional.....	

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Concreto é o material obtido pela mistura de um aglomerante, água, areia, pedra britada, seixos, etc. A areia é chamada de agregado miúdo, ao passo que a pedra britada, seixos, etc, é denominado agregado graúdo. É um material utilizado nas construções em geral, e por ter boas propriedades de blindagem às radiações, é freqüentemente utilizado em instalações nucleares<sup>(1)</sup>, e na construção de vasos de pressão de concreto protendido (VPCP) para reatores nucleares. O concreto que utiliza o cimento Portland comum (TIPO I) como aglomerante, com espessuras adequadas, pode ser empregado para tais propósitos<sup>(1)</sup>.

A utilização de VPCP ainda é restrito aos reatores nucleares de potência refrigerados a gás, como o AGR e o SGHWR, mas há a possibilidade de empregá-lo em reatores de outros tipos tais como o PWR e o BWR<sup>(2)</sup>.

Entre as vantagens de se utilizar o concreto para a construção de vasos de pressão (VP), pode-se citar: é um material econômico; não tem limitações de espessura; pode ser moldado "in loco" e em diversas formas, evitando deste modo o transporte de grandes estruturas de aço até o local da obra, como ocorre com os VP de aço para reatores nucleares.

Em estudos realizados em países como os Estados Unidos, Inglaterra e França sobre temperaturas admissíveis nas paredes de um VP de concreto, estabeleceu-se a temperatura de 100 °C como sendo a máxima permissível. A partir deste ponto, o concreto pode sofrer danos irreparáveis em sua estrutura. Para que a temperatura na face interna das paredes do vaso se situe na faixa de 50 a 100 °C, colocam-se sistemas de refrigeração. Esta solução geralmente eleva sensivelmente o custo dos VP.

Os fluxos de radiação em um VP varia com o tipo de reator, e também com o método de cálculo adotado em seu projeto. Em um reator nuclear tipo AGR, operando com fator de carga de 85 % durante trinta anos, a face interna do VPCP está sujeita a variações de temperatura de 50 a 100 °C, e aos seguintes fluxos<sup>(3)</sup>:

6,00 x 10 <sup>19</sup>	nvt	(nêutrons térmicos)
2 - 3 x 10 <sup>18</sup>	nvt	(nêutrons rápidos)
10 <sup>11</sup>	rads	(raios gama)

À distância de 10 cm da face interna do VPCP a dose de nêutrons rápidos decai por um fator de 10, e as de nêutrons térmicos por um fator de 3, aproximadamente.

Em geral, a espessura da parede de um VPCP é superior a 3m<sup>(4)</sup>; ao atravessar esta parede, os nêutrons são atenuados, e as doses na face externa são desprezíveis ( figura 1).

A potência de um reator nuclear, que utiliza VP de concreto, está limitada pela temperatura que pode ser aceita no concreto (  $\sim 100^{\circ}\text{C}$  ). O aumento da potência dos reatores nucleares como é tendência nos projetos futuros, resultará na exposição do VP a fluxos de nêutrons e temperatura cada vez maiores. Por esta razão, o estudo do comportamento do concreto sob a influência combinada de radiação e calor torna-se importante<sup>(5)</sup>.

Considerando o concreto como um material constituído de vários elementos com formas, dimensões e propriedades variadas (agregados graúdos e miudos, cimento e água), o controle de sua execução e dos materiais empregados adquirem uma importância fundamental<sup>(6)</sup>.

Para o estudo dos efeitos da radiação no concreto, é importante conhecer o efeito que esta provoca em seus diversos constituintes, individualmente, para em seguida correlacioná-los.

Elaborou-se um programa que visa ao estudo de cada um dos constituintes, e nesta primeira etapa, foi nosso objetivo determinar as variações das propriedades dinâmicas nas amostras de pasta de cimento Portland comum, quando estas são submetidas à irradiação e à variação de temperatura no reator.

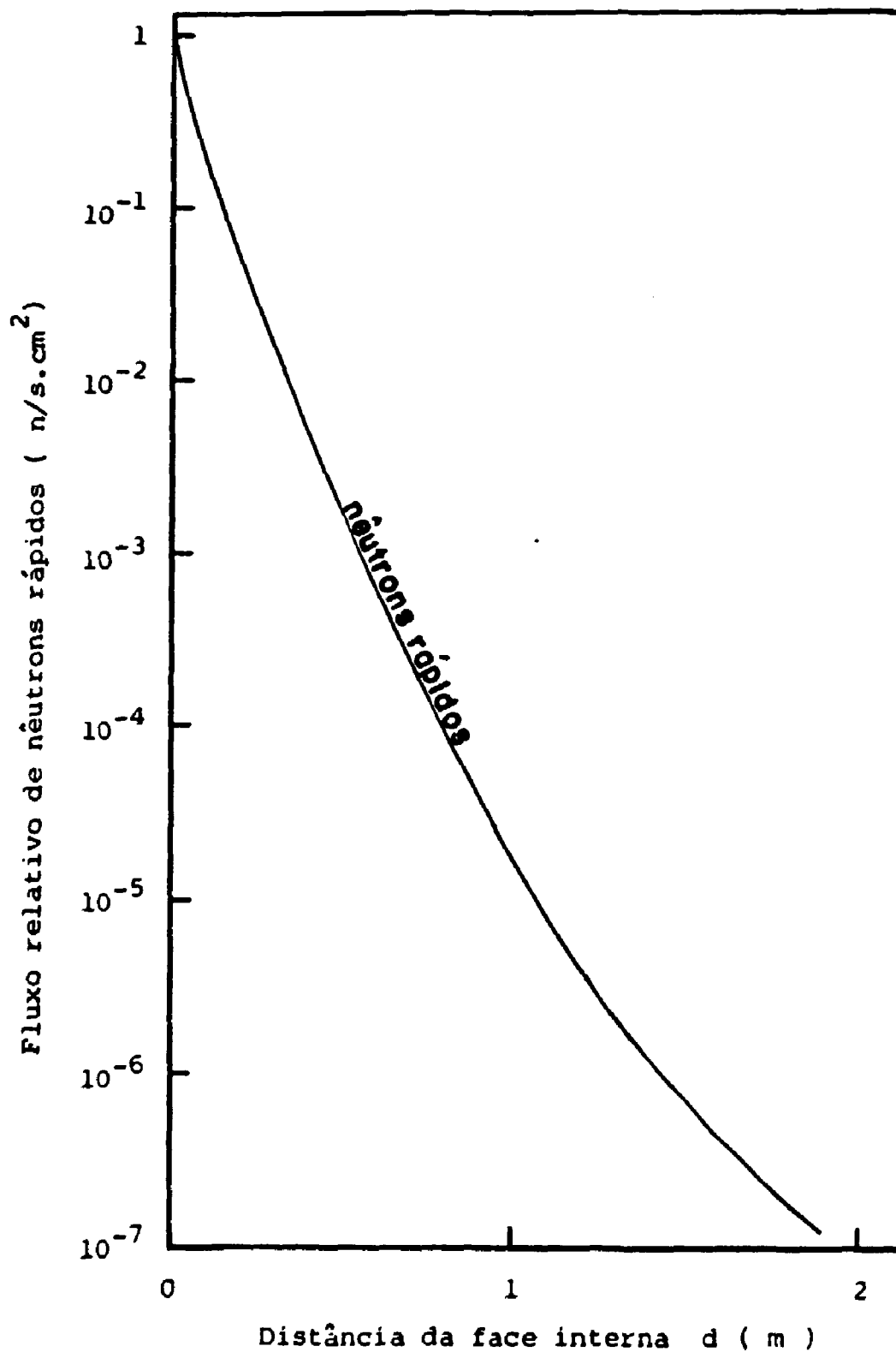


FIGURA 1 - Curva esquemática relacionando o fluxo relativo de nêutrons rápidos em vasos de pressão de concreto protendido ( VPCP ) e a distância da face interna (Referência 7)

Para estas determinações foram utilizadas técnicas ultra-sônicas, que permitem realizar ensaios não destrutivos. Isto é de extrema importância quando se trata de ensaios com amostras irradiadas.

Os ensaios foram realizados utilizando-se as técnicas de propagação de pulso e frequência de ressonância, os quais serão descritos no capítulo 1.

A fluência de nêutrons rápidos e a temperatura a que foram submetidas as amostras, corresponde a uma dose equivalente a 30 anos de operação do VPCP do reator tipo AGR, e que é a vida útil de um reator nuclear, aproximadamente.

Iniciou-se as experiências com o cimento, pela facilidade de fabricação de corpos de prova de pequenas dimensões, limitados pelo dispositivo utilizado na irradiação.



## CAPÍTULO 1

### CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

#### 1.1 - DANOS DE IRRADIAÇÃO EM MATERIAIS

Podemos dizer que todos os desvios da estrutura de uma rede periódica constitui um defeito. Os defeitos elementares (ou puntiformes) podem ser criados, deslocando-se um átomo da rede. Este deslocamento pode ser através de fornecimento de energia térmica, energia mecânica, ou também por de formação plástica<sup>(8)</sup>. Os defeitos puntiformes mais comuns são as impurezas químicas, sítios vazios da rede (lacunas) e átomos fora de posição normal da rede (intersticiais)<sup>(9)</sup>.

Um dos meios pelo qual podemos fornecer energia para o deslocamento dos átomos, e conseqüentemente criar defeitos em um material é através da irradiação neutrônica, pois quando os materiais são submetidos à irradiação com nêutrons, estes fornecem energia aos átomos no interior do cristal. O efeito localizado pode ser comparado a um aumento repentino na energia térmica ("temperature spike"). A absorção de energia pode, também, provocar o deslocamento dos átomos ("displacement spikes"), produzindo defeitos cristalinos (defeitos puntiformes)<sup>(10,11)</sup>. Deste modo, os materiais quando expostos à irradiação, estão sujeitos à alteração de suas propriedades (danos de irradiação)<sup>(11)</sup>. Os danos de irradiação dependem da energia, massa e carga da partícula, bem como do número de partículas que atravessam uma quantidade unitária do material (fluxo)<sup>(8)</sup>.

O defeito mais comum é a lacuna, que é um local vago na rede cristalina, deixados por átomos ou ions retirados da sua posição normal. Este átomo pode migrar para outra lacuna, sendo aniquilado, ou para uma posição não regular da rede cristalina, formando um intersticial. Este átomo ou ion pode ser tirado da sua posição normal da rede por interação com fonons, ou pela combinação da energia térmica com a energia fornecida pela deformação plástica ou irradiação. A probabilidade de que um local da rede esteja vazio é proporcional ao fator de Boltzmann para o equilíbrio térmico<sup>(9)</sup>. ou seja:

$$P = \exp ( - E_1 / k_B T )$$

onde

$E_1$  : Energia necessária para retirar um átomo de um local da rede cristalina (energia de formação de uma lacuna);

$k_B$  : Constante de Boltzmann (  $0,86 \cdot 10^{-4}$  eV /  $^{\circ}\text{C}$  );

$T$  : Temperatura (  $^{\circ}\text{C}$  ).

Supondo que haja  $N$  átomos, o número de equilíbrio para as  $n$  lacunas é dado por:

$$\frac{n}{N - n} \cong \exp ( - E_1 / k_B T )$$

e se  $n \ll N$ , então

$$\frac{n}{N} \cong \exp ( - E_1 / k_B T )$$

Em cristais iônicos é possível formar números iguais de lacunas de ions positivos e negativos. A formação de pares de lacunas faz com que o cristal permaneça eletrostaticamente nêutro em escala local<sup>(9)</sup>. Por intermédio de cálculos estatísticos, obtemos:

$$n \cong N \exp ( - E_p / 2 k_B T )$$

sendo  $E_p$  a energia de formação de um par de lacunas.

Um outro tipo de defeito é o intersticial, que é formado por átomos localizados em posições não regulares

da rede cristalina. O átomo intersticial pode ser um átomo de impureza introduzido na rede cristalina, ou um átomo transferido da sua posição original na rede para uma posição diferente das posições regulares, por interação com fonons ou pela combinação da energia térmica com a energia fornecida pela deformação plástica ou irradiação.

Quando o átomo ou íon é removido de sua posição da rede para uma posição intersticial no cristal, o par lacuna-intersticial recebe o nome de Defeito Frenkel<sup>(9)</sup> (figura 2). O cálculo do número de defeitos Frenkel é estatístico, e se o número  $n$  de defeitos Frenkel for muito menor do que o número de sítios da rede  $N$ , e menor que o número de sítios intersticiais  $N'$ , obtemos:

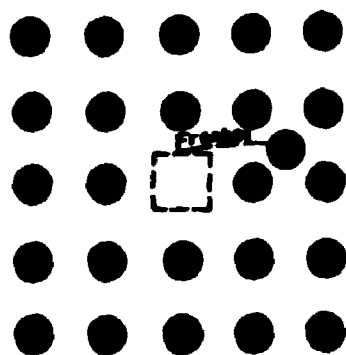
$$n \cong (N N')^{1/2} \exp(-E_i / 2 k_B T)$$

sendo  $E_i$  a energia necessária para remover um átomo de um sítio da rede para uma posição intersticial.

As figuras 3a, 3b e 3c mostram as três configurações mais prováveis para átomos intersticiais, que são: halteres, corpo centrado e "crowdion"<sup>(12)</sup>.

Em decorrência dos deslocamentos atômicos causados pela irradiação, foram constatadas variações nas propriedades físicas dos materiais. Nos metais observou-se<sup>(10)</sup>:

- a) A resistividade elétrica sempre aumenta;
- b) Variação na propriedade elástica, uma vez que constatou-se aumento no módulo de elasticidade dos materiais (15 a 20 %);
- c) Grande aumento na tensão de cisalhamento, e de modo geral,



*FIGURA 2 - Configuração do defeito Frenkel (Referência 9 )*

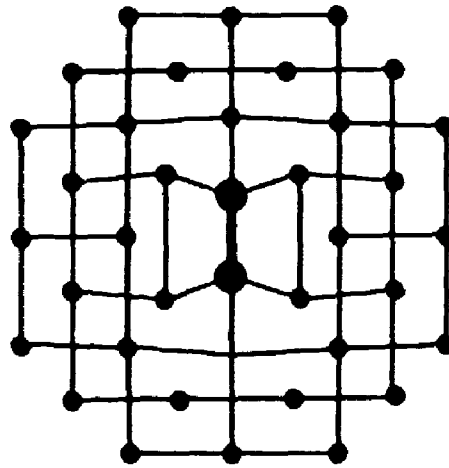


FIGURA 3a - Configuração do intersticial halteres (Ref. 12)

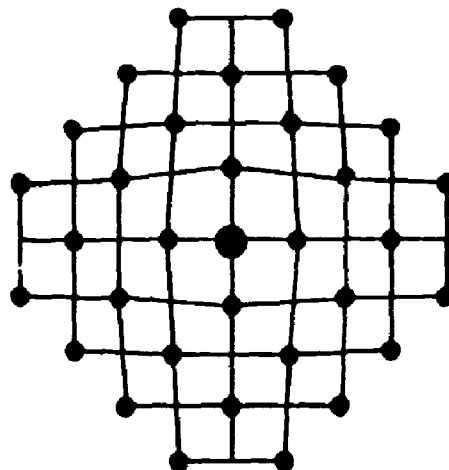


FIGURA 3b - Configuração do intersticial corpo centrado  
(Ref. 12)

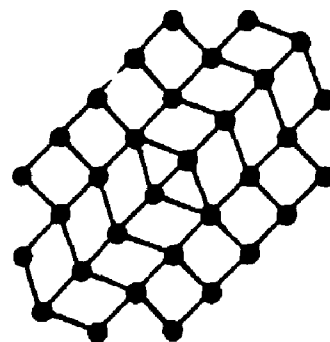


FIGURA 3c - Configuração do intersticial crowdion (Ref. 12)

aumento da fragilidade e diminuição da ductilidade (propriedades plásticas).

Foram notadas também variações em outras propriedades mecânicas, tais como a diminuição da resiliência dos aços, e o aumento da temperatura de transição entre a ruptura fragil e ductil, entre outras<sup>(10)</sup>.

Já nos materiais cerâmicos, de um modo geral, são observados<sup>(11)</sup>: maior dureza, maior resistência mecânica, menor ductilidade, redução da densidade, e muitas vezes também na condutibilidade térmica. Finalmente, há um aumento, em geral, na condutibilidade elétrica das fases cerâmicas.

## 1.2 - EFEITOS DA IRRADIAÇÃO NO CONCRETO

Para a finalidade do estudo em questão, é importante considerar duas classes de radiações<sup>(1, 13)</sup>:

- 1) Ondas eletromagnéticas de alta frequência, particularmente os raios gama;
- 2) Partículas nucleares, especificamente os nêutrons, que podem ser divididos em três classes, de acordo com a sua energia<sup>(13, 14)</sup>:

nêutrons térmicos	$E < 1 \text{ eV}$
nêutrons epitérmicos	$1 \text{ eV} < E < 0,1 \text{ MeV}$
nêutrons rápidos	$E > 0,1 \text{ MeV}$

Para o nosso estudo, a classe de maior interesse é a dos nêutrons rápidos, que são aqueles que efetivamente causam danos de radiação. Os nêutrons são partículas eletricamente nêutras, e portanto não são afetadas pelos eletrons em um átomo, ou pelas cargas positivas dos núcleos. Deste modo, interagem diretamente com o núcleo (15).

Os VPCP de um reator nuclear estão sujeitos à radiações por ondas eletromagnéticas e por partículas nucleares, e em um sistema complexo como o do concreto, a radiação pode produzir efeitos químicos e efeitos físicos. Como efeito químico podemos citar a radiólise da água de constituição do cimento, que é causada pela elevação da temperatura provocada principalmente pela radiação gama, ocasionando a liberação de gases (oxigênio e hidrogênio) (3, 7, 16). Os efeitos da radiação nos gels do cimento são muito complexos, e ainda não foram estudados em todos os detalhes (3). Já os efeitos físicos são decorrentes dos deslocamentos atômicos na região cristalina do concreto, provocado principalmente por nêutrons rápidos. Devido a estes deslocamentos, nota-se um aumento no volume, principalmente do quartzo, quer como areias, ou como constituinte dos agregados graúdos (3).

Grande parte dos trabalhos publicados versa sobre o concreto como blindagem biológica, sendo ainda pequeno o número de trabalhos que trata especificamente sobre concreto para uso em VP de reatores nucleares.

A maior parte dos trabalhos que tratam de danos de radiação no concreto, são coincidentes na afirmação de que na faixa de fluência de  $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> os danos tornam-se sig -



nificativos<sup>(4, 5, 7, 17, 18, 19, 20)</sup>, e que a resistência do concreto à radiação neutrônica depende da relação dos componentes (traço), tipo de cimento e agregados utilizados<sup>(21)</sup>.

Nos estudos realizados, foi observado que nas amostras irradiadas em reatores, o valor do módulo de elasticidade dinâmico do concreto sofrem decréscimos situados na faixa de 15 a 45 %, para fluências na faixa de 1 a  $3 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> (nêutrons rápidos)<sup>(5, 20)</sup>. Notaram-se também variações nas dimensões lineares, condutividade térmica, peso, resistência à tração e volume. A causa da variação de volume é principalmente o aumento de volume dos agregados, porque a areia e a brita sofrem consideráveis aumentos de volume, embora as doses requeridas sejam maiores do que as que recebem as paredes de um VP de um reator nuclear durante sua vida útil, que é de 25 a 30 anos, aproximadamente<sup>(4, 7, 14, 19, 20)</sup>.

### 1.3 - CIMENTO PORTLAND

Denomina-se cimento ao aglomerante utilizado na fabricação do concreto. Ele pode ser definido como sendo um elemento com propriedades de unir fragmentos de materiais sólidos em um bloco compacto<sup>(22,23)</sup>.

O cimento é obtido pela moagem e mistura em proporções adequadas de calcáreo e argila, que são levados a fornos onde fundem e sinterizam-se parcialmente. O produto desta fusão é denominado "clinker", que é resfriado e moído até

se tornar um pó. A este pó adiciona-se de 2 a 3 % em peso de gesso para regularização da pega<sup>(24)</sup>. O produto final desta mistura é denominado cimento Portland.

A ASTM Standard Specification for Ordinary Portland Cement (American Society for Testing and Materials), na qual estão baseados as especificações nacionais da maioria dos países da América do Sul<sup>(25)</sup>, estabeleceu em 1940 uma classificação baseada na utilização do aglomerante. Assim, os cimentos podem ser classificados em cinco tipos<sup>(23, 24)</sup>.

TIPO I - Cimento Portland comum;

TIPO II - Cimento Portland de alta resistência inicial;

TIPO III - Cimento Portland resistente aos sulfatos;

TIPO IV - Cimento modificado;

TIPO V - Cimento Portland de baixo calor de hidratação.

Os principais componentes do cimento Portland é a cal, sílica, alumina e óxido de ferro, que quando interagem no forno, e o equilíbrio químico é alcançado, formam uma série de produtos mais complexos.

A composição média dos cimentos, expressa em óxidos é mostrada na tabela 1.

No cimento não hidratado os óxidos se combinam na forma de compostos, sendo que os quatro principais estão mostrados na tabela 2.

Estão presentes também certas quantidades de impurezas provenientes das jazidas de matéria prima.

No lote de cimento utilizado neste estudo

TABELA 1

Composição média dos cimentos Portland  
expressa em óxidos (Ref. 24)

Forma química	Teor (%)
CaO	60,0 a 67,0
SiO <sub>2</sub>	17,0 a 25,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0 a 8,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 a 6,0
MgO	0,1 a 5,5
NaO + K <sub>2</sub> O (alcalis)	0,5 a 1,5
SO <sub>3</sub>	1 a 3

TABELA 2

Principais compostos do cimento Portland não hidratado  
(Ref. 24)

Composto	Forma química	Notação simplificada
Silicato tricálcico	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaAl}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferro aluminato tetra-cálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

(Santa Rita CP 320), fez-se análise qualitativa e quantitativa. As impurezas detectadas, além de alguns componentes principais mostrados na tabela 1, são mostrados na tabela 3.

Os componentes presentes no "clinker" são anidros. Se expostos à ação da água, sofrem ataques ou decompõe-se formando novos compostos hidratados menos solúveis, que são os materiais de cementação (causam o endurecimento da pasta)<sup>(26)</sup>.

Pasta é a denominação da mistura água-cimento, cuja função é preencher os vazios formados pelos agregados grudos. Ela também une os agregados no concreto, resultando nas propriedades seguintes: impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos e proteção contra os agentes agressivos<sup>(2)</sup>.

#### 1.4 - TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS

Denominam-se vibrações ultra-sônicas, aquelas com frequência acima do limiar da audição humana, que é de 20 KHz, aproximadamente<sup>(2, 27, 28)</sup>.

Técnicas ultra-sônicas são técnicas não destrutivas, e quando aplicadas a peças ou estruturas não prejudicam o desempenho das mesmas<sup>(28)</sup>.

Os testes realizados por estas técnicas são denominados dinâmicos, para distinguirem-se dos testes que utilizam carga. Estas últimas podem deformar permanentemente as peças ou corpos de prova (ensaios destrutivos).

TABELA 3

Composição química do cimento Portland Santa Rita CP 320  
determinada através de análise por ativação

Elemento químico	Teor	Elemento químico	Teor
Ca	24,05 %	Nd	Traços
Fe	1,85 %	Ba	"
Na	0,097 %	Yb	"
Ce	165 ppm	Tb	"
La	68,50 ppm	Cr	"
Sm	10,00 ppm	Au	"
Th	9,80 ppm	Sr	"
Sc	7,55 ppm	Cs	"
Co	4,70 ppm	Rb	"
Hf	3,60 ppm	As	"
Eu	1,75 ppm	Sb	"
Lu	0,42 ppm	Ta	"
		U	"

As técnicas ultra-sônicas são as mais indicadas para o estudo das propriedades dos materiais, pela sua sensibilidade e precisão, sendo a melhor quando se trata de avaliação de fissuras e uniformidades<sup>(29)</sup>.

Muitas pesquisas foram desenvolvidas para se obter uma correlação entre os resultados obtidos por meio de testes sônicos e as características dos concretos, tais como módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tração.

Há dois métodos para a determinação destas propriedades por testes sônicos, as quais são:

- 1) Método da frequência de ressonância;
- 2) Método da velocidade de propagação de um pulso através da amostra.

O princípio destes métodos são descritos a seguir:

#### 1) MÉTODO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

Aplica-se um sinal com determinada forma de onda periódica ao corpo em teste, e varia-se a frequência. A medida que a frequência do sinal aproxima-se da frequência de ressonância do corpo, a amplitude de vibração aumenta. Quando a frequência de ressonância é alcançada, a amplitude de vibração torna-se máxima.

A frequência de ressonância de um corpo é função dos seguintes parâmetros<sup>(21)</sup>:

- a) Fator de forma, que depende das características do corpo, tais como: comprimento, peso e espessura;
- b) Fator físico, que depende do módulo de elasticidade, densidade e coeficiente de Poisson.

Neste método, podemos ter diferentes modos de vibração de um corpo, de acordo com o posicionamento dos transdutores na amostra, e a frequência obtida pode ser uma das seguintes: frequência de ressonância torcional, frequência de ressonância transversal ou frequência de ressonância longitudinal.

A frequência de ressonância longitudinal (ondas longitudinais) são as mais utilizadas por serem mais conhecidas, e também pela facilidade de serem geradas.

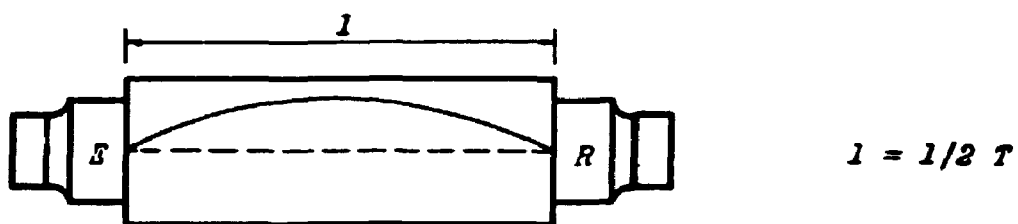
Na frequência fundamental de ressonância (longitudinal), o comprimento de onda é cerca de duas vezes o comprimento do corpo de prova, quando a relação altura-diâmetro está em torno de dois ( $L \cong 2 d$ ) (2, 6, 27).

Existem outras frequências além da frequência fundamental. A estas, dá-se o nome de harmônicos de ordem superior. A ordem do harmônico é dada pelo número de meias-ondas contidas na extensão da amostra. As figuras 4a, 4b e 4c mostram a frequência fundamental de ressonância longitudinal.

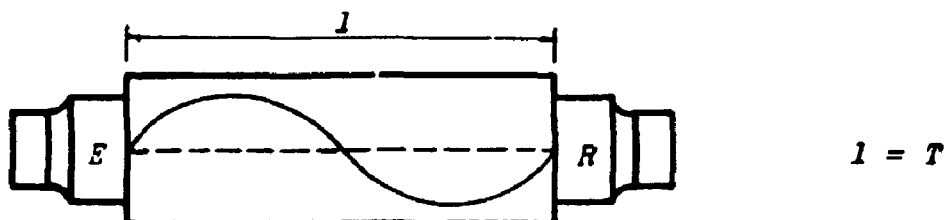
## 2) MÉTODO DA PROPAGAÇÃO DE PULSO

O método é análogo ao da frequência de ressonância, porém, no lugar de um gerador de funções (ondas), uti-

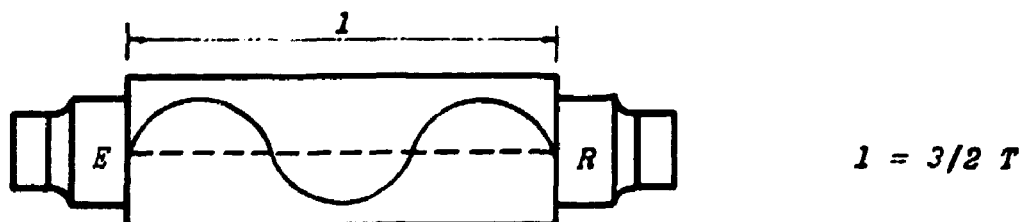




**FIGURA 4a** - Amplitude de vibração na amostra (frequência fundamental de ressonância) (Referência 21)



**FIGURA 4b** - Amplitude de vibração na amostra (harmônico de segunda ordem) (Referência 21)



**FIGURA 4c** - Amplitude de vibração na amostra (harmônico de terceira ordem) (Referência 21)

**Legenda:**

- $l$  - Comprimento da onda
- $T$  - Período da onda ultra-sônica
- $E$  - Transdutor emissor
- $R$  - Transdutor receptor

liza-se um gerador de pulsos. Neste caso, ao invés da amplitude de onda, analisa-se a defasagem entre o pulso emitido e o recebido (tempo de trânsito do pulso ultra-sônico).

Existem duas técnicas que podem ser utilizadas neste método, ou seja: técnica da transmissão ou transparência, ou técnica da reflexão.

Na técnica da transmissão ou transparência, utilizada neste trabalho, colocam-se os transdutores emissor e receptor em faces opostas da peça, conforme mostra a figura 5a.

Na técnica da reflexão, colocam-se os transdutores na mesma face da peça. Pode-se utilizar apenas um transdutor, com função de operar como emissor e receptor, conforme mostra a figura 5b.

Conhecendo-se a trajetória do pulso ( $L_p$ ), calcula-se a velocidade deste no material, pela fórmula seguinte:

$$V_p = \frac{L_p}{T_t} \quad (\text{Equação 1})^{(30)}$$

#### 1.4.1 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS

Partindo-se de resultados obtidos por meio de testes sônicos, Rayleigh<sup>(29)</sup>, Love<sup>(29)</sup>, Timoshenko<sup>(29)</sup> e outros, desenvolveram teorias que permitem determinar diversas propriedades dos materiais, tais como: módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento, etc.

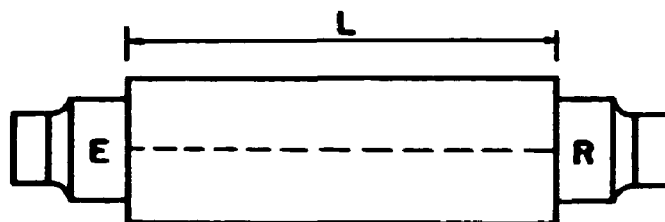
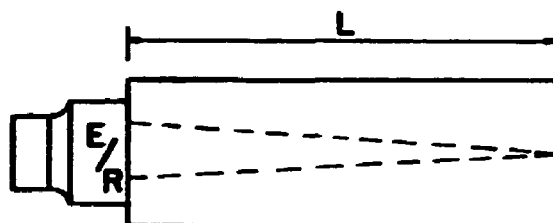


FIGURA 5a - Posicionamento dos transdutores no método da propagação de pulso - Técnica da transmissão ou transparência



ou

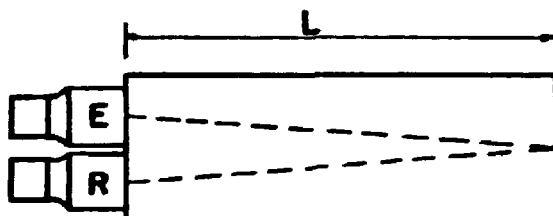


FIGURA 5b - Posicionamento dos transdutores no método da propagação de pulso - Técnica da reflexão

LEGENDA :

E : Transdutor emissor

R : Transdutor receptor

E/R : Transdutor que funciona como emissor e receptor

L : Caminho percorrido pelo pulso

Neste trabalho, fez-se determinação do  $E_d$  de amostras de pasta de cimento pelos dois métodos já citados.

As relações utilizadas são dadas a seguir:

a) DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO PELO MÉTODO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE PULSO.

A equação para o cálculo da velocidade do pulso ultra-sônico em um sólido foi deduzida por Long<sup>(31)</sup>, Kurtz<sup>(31)</sup> e Sandenaw<sup>(31)</sup>, e é a seguinte:

$$v_p^2 = \frac{E g (1 - \eta)}{\rho (1 + \eta) (1 - 2\eta)} \quad (\text{Equação 2})$$

A equação acima é utilizada para peças de concreto que tenham grandes massas<sup>(29)</sup>, e como as nossas amostras são de pequenas dimensões, optamos pela equação 4, dada a seguir, e é empregada para cálculo de placas<sup>(29)</sup>, e também em analogia à referência 31.

$$v_p^2 = \frac{E_d g}{\rho (1 - \eta^2)} \quad (\text{Equação 3})$$

de onde concluímos que:

$$E_d = \frac{v_p^2 \rho}{g} (1 - \eta^2) \quad (\text{Equação 4})^{(29, 32)}$$

Adotou-se para este trabalho o valor de  $1/6$  para o coeficiente de Poisson ( $\eta$ ), mesmo valor assumido por Long, Kurtz e Sandenaw em suas pesquisas.

**b) DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO PELO MÉTODO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA LONGITUDINAL.**

Sabemos da literatura que:

$$v = \lambda F_r \quad (\text{Equação 5})$$

e

$$L_p = v t \Rightarrow v = L_p/t \quad (\text{Equação 6})$$

e

$$L_p = n \lambda \quad (\text{Equação 7})$$

e que para a frequência longitudinal  $n = 1/2$ , e portanto a (7) fica:

$$L_p = 1/2 \lambda \Rightarrow \lambda = 2 L_p \quad (\text{Equação 8})$$

substituindo (8) em (5), obtemos:

$$v = 2 L_p F_r \quad (\text{Equação 9})$$

e da definição de Rayleigh segue:

$$v^2 = \frac{E_d g}{\rho} \quad (\text{Equação 10})^{(6)}$$

substituindo (10) em (9), obtemos:

$$E_d = \frac{4 (F_r)^2 L_p^2 \rho}{g} \quad (\text{Equação 11})^{(2, 6, 32)}$$

## CAPÍTULO 2

### TRABALHO EXPERIMENTAL

#### 2.1 - PREPARO DAS AMOSTRAS

Foi preparado um lote com cinquenta e sete a mostras cilíndricas, com as dimensões seguintes:

c : 51,7 ± 0,2 mm

d : 27,3 ± 0,1 mm

O tamanho das amostras foi limitado pelas dimensões do dispositivo de irradiação no reator.

Utilizou-se o cimento Portland Santa Rita CP 320 (TIPO I), e o teor água-cimento da pasta foi de 0,40 l/Kg.

Com o intuito de evitar perda de água de amassamento da pasta fresca, moldou-se as amostras num tubo de PVC, com as dimensões dadas acima. Os tubos foram fixados em uma base de vidro, com cola de silício, o que permitiu uma completa vedação.

## 2.2 - CURA

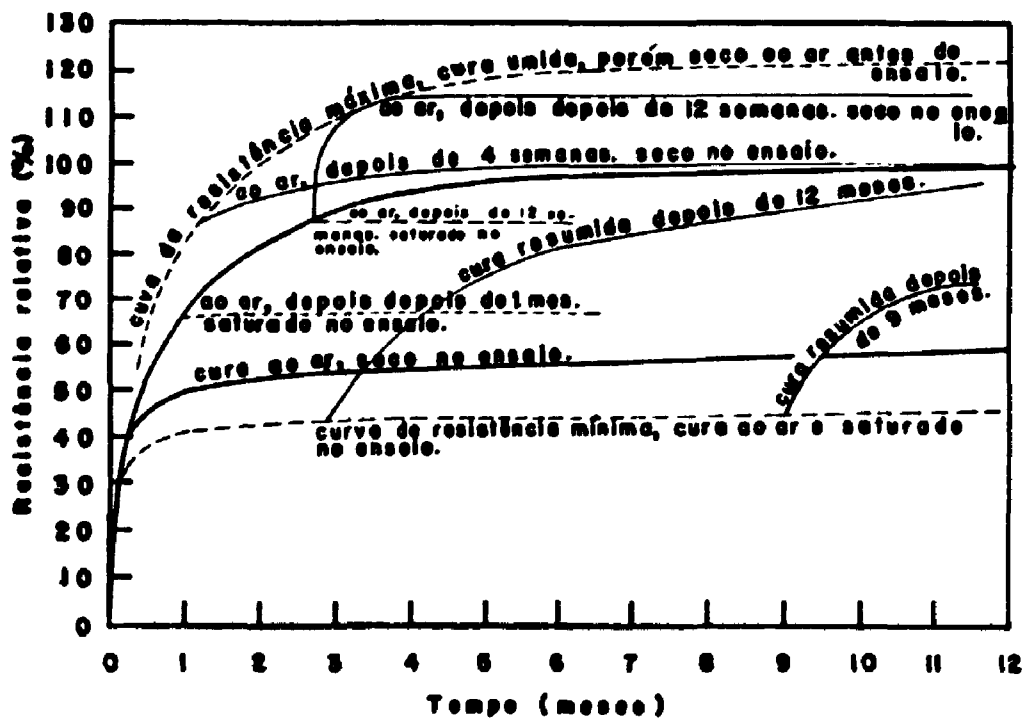
A resistência mecânica da pasta de cimento sofre significativa influência da temperatura e da umidade do meio onde é efetuada a cura<sup>(12,24, 25)</sup>. A figura 6 mostra a relação da umidade durante a cura e a resistência à compressão do concreto.

No presente trabalho efetuou-se a cura das amostras em câmara de saturação, e umidade relativa do ar (UR) de 100 %, mantendo-se a temperatura em  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>(33)</sup>, por um período de 180 dias. Este prazo foi estabelecido para que se obtivesse maior estabilidade estrutural e uniformidade das características físicas.

Em seguida fez-se a desmoldagem com auxílio de prensa. Após a desmoldagem foram polidas as faces das amostras, para garantir o paralelismo entre elas.

As amostras foram recolocadas em câmara de saturação por mais trinta (30) dias, após o qual foram iniciados os testes de caracterização.





**FIGURA 6** – Efeito das condições de cura sobre a resistência e compressão do concreto  
(Referências 20, 25 e 34)

### 2.3 - PROGRAMA DE ENSAIOS

Desenvolveu-se um programa de ensaios com a finalidade de distinguir o efeito da radiação neutrônica do efeito da temperatura causada pelo aquecimento gama. O programa consta de quatro etapas, que são descritas a seguir:

ETAPA 1 - Nesta etapa foram feitos ensaios de caracterização inicial das amostras. Após este ensaio, colocou-se as amostras na câmara de saturação com UR de 100%.

ETAPA 2 - As amostras foram reensaiadas e divididas em três lotes de cinco amostras cada, destinadas à:

Lote 1 - Amostras para irradiação no reator;

Lote 2 - Amostras para simulação da temperatura, em laboratório, a que estiveram sujeitas as amostras no reator, devido ao aquecimento gama;

Lote 3 - Amostras de controle.

ETAPA 3 - Foram realizados ensaios após a irradiação no reator e tratamento térmico de simulação do aquecimento gama;

ETAPA 4 - Nesta etapa foi feita a ressaturação e ensaio das amostras da etapa anterior.

O programa de ensaios está esquematizado na figura 7.

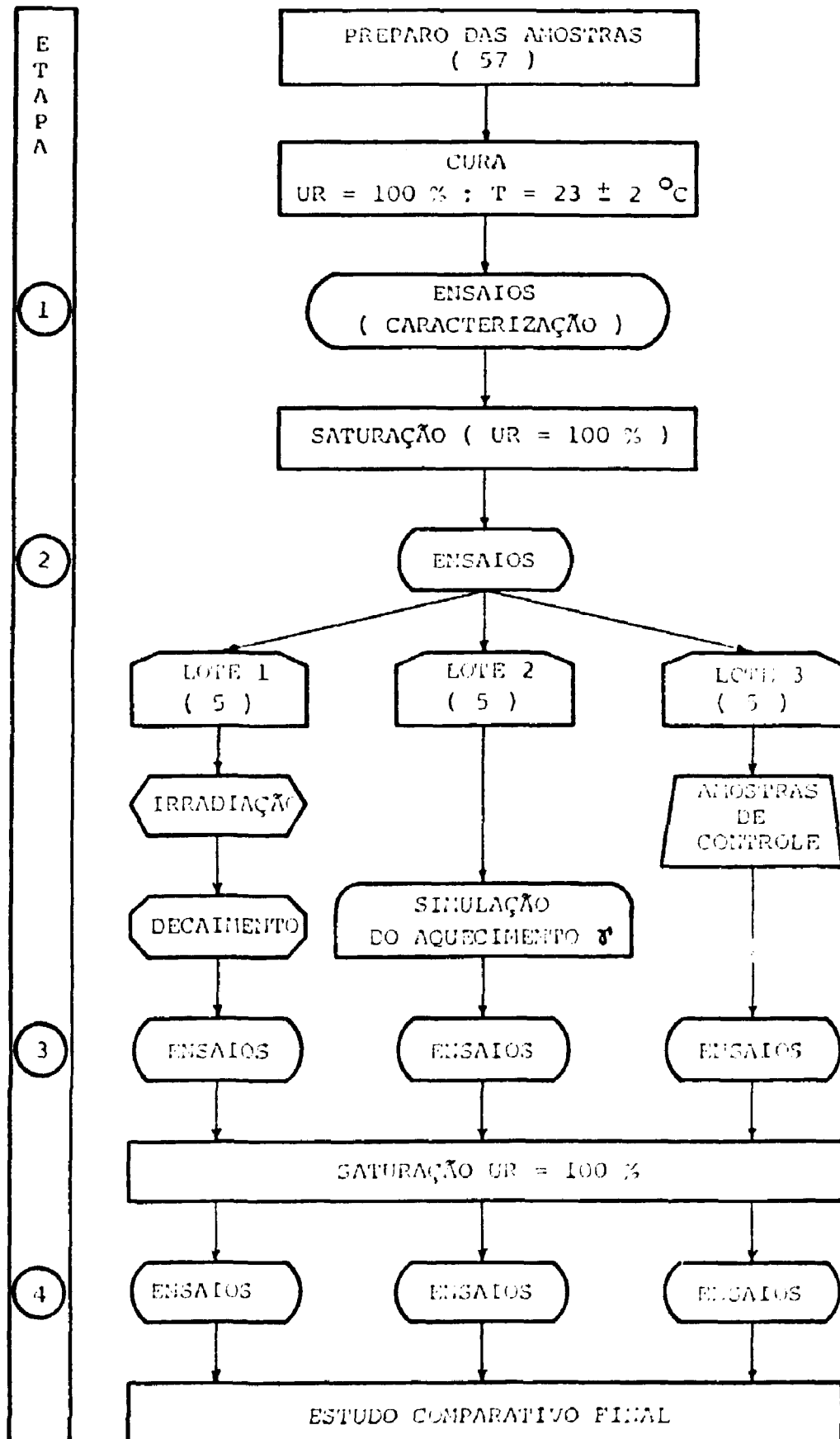


FIGURA 7 - Programa de ensaios

A conclusão deste trabalho sairá de um estudo comparativo final entre os resultados obtidos nas diversas etapas.

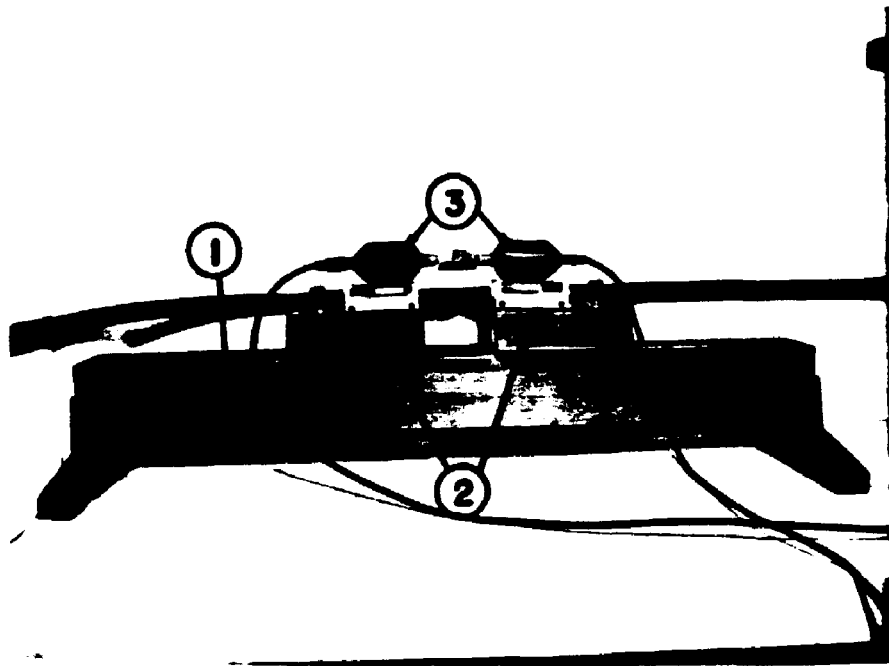
#### 2.4 - CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Inicialmente determinou-se as dimensões lineares e massa com micrômetro e balança de precisão.

A frequência de ressonância determinada foi a longitudinal, e para tal utilizou-se os seguintes aparelhos:

- 1 - Gerador de funções HP 20-45000 Hz - senoidal;
- 2 - Osciloscópio Tektronics modelo 561 A;
- 3 - Freqüencímetro digital HP - 5216 A;
- 4 - Base e transdutores construídos no laboratório de eletrônica do Instituto de Física da USP, sendo o excitador magnetostrictivo e o receptor piezoelétrico;
- 5 - Estabilizador de tensão 115 V - 30 A.

O ensaio para a determinação da frequência de ressonância foi feito da seguinte maneira: fixou-se a amostra entre os transdutores (emissor e receptor), onde a pressão é ajustada de modo reprodutível por molas situadas no suporte do transdutor. O suporte é preso a um bloco deslizante, sendo este fixado à base por intermédio de um parafuso. O conjunto é mostrado na figura 8. Acoplou-se em seguida o gerador de funções ao transdutor emissor. Variando-se a frequência do gerador, o sinal emitido é transformado em vibração mecânica por



*Legenda :*

- ① - *Base de madeira*
- ② - *Blocos deslizantes*
- ③ - *Transdutores*

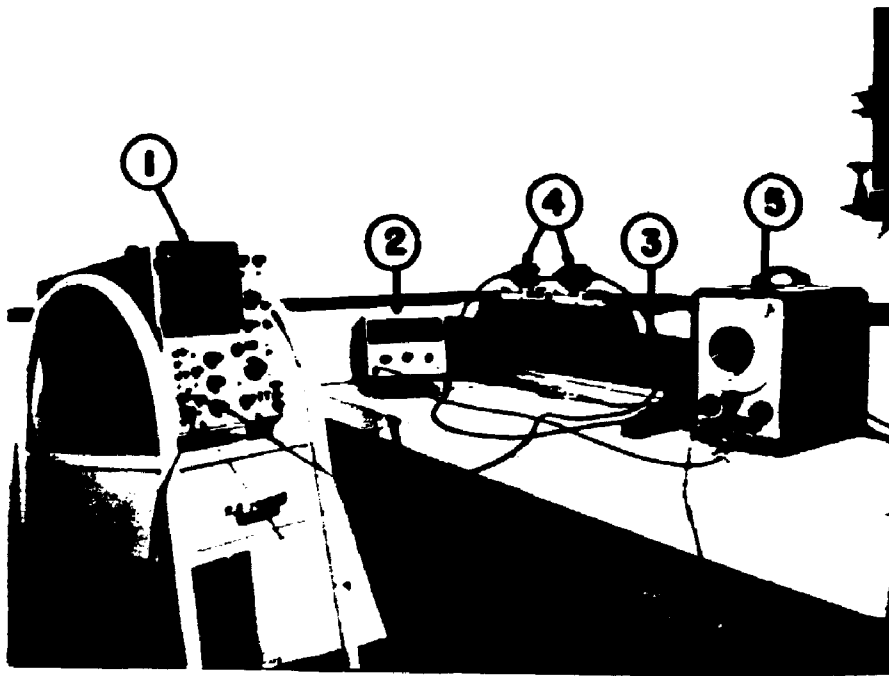
*FIGURA 8 - Dispositivo utilizado na determinação da frequência de ressonância*

meio do transdutor excitador. Este transmite a vibração à amostra, que passa a oscilar na frequência emitida. O transdutor recebe o sinal e o transmite para o osciloscópio, onde pode ser visualizado. Quando a frequência emitida pelo gerador de funções fica igual à frequência de ressonância da amostra, a amplitude de vibração torna-se máxima, e a identificação do pico pode ser feita visualmente na tela do osciloscópio. Na tela aparecem diversos picos, sendo que apenas um corresponde à frequência fundamental de ressonância da amostra. Os outros são interferência do sistema ou harmônicos da amostra. A frequência fundamental de ressonância da amostra foi determinada por meio de ensaios de redução do comprimento, sendo que para cada comprimento da amostra, este valor que é uma função da massa, variou consideravelmente. As frequências que eram do sistema sofreram pequenas variações. Determinou-se por este procedimento a frequência de ressonância das amostras, com valores na faixa de 31 a 33 KHz.

A disposição dos equipamentos utilizados no ensaio é mostrada na figura 9.

Para a determinação da velocidade do pulso ultra-sônico, foi utilizado o método da transmissão. Utilizou-se neste ensaio um detetor ultra-sônico de falhas, Krautkramer - USIP 10w, e transdutores de 50 Hz. Este aparelho possibilita obter precisão de leitura de 1/2 divisão do retículo, que na escala utilizada representa 0,5  $\mu$ s.

O ensaio para a determinação do tempo de trânsito do pulso ultra-sônico tem o seguinte procedimento: fixou-se as amostras entre os transdutores emissor e receptor. A



*Legenda :*

- ① - *Osciloscópio*
- ② - *Frequencímetro digital*
- ③ - *Base de madeira*
- ④ - *Transdutores*
- ⑤ - *Gerador de funções*

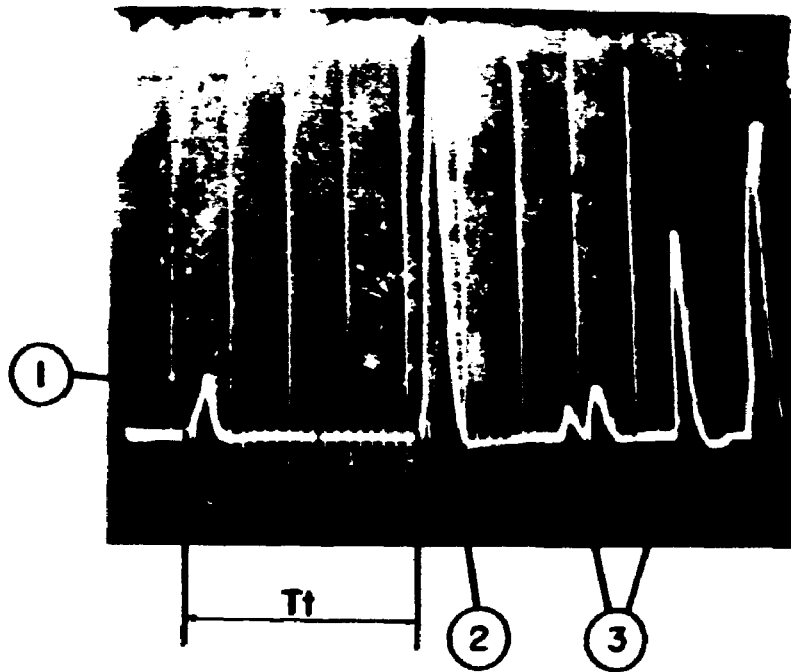
*FIGURA 9 - Disposição dos equipamentos utilizados na determinação da frequência de ressonância*

partir do pulso emitido obteve-se a defasagem de tempo entre o pico emitido e o pico recebido, diretamente na tela do aparelho. Esta leitura é mostrada na figura 10. Existem equipamentos mais modernos (digitais) que registram o tempo de trânsito diretamente no aparelho. Com a finalidade de garantir que a pressão exercida pelos transdutores nas amostras fosse constante, foram projetados e construídos suportes e braçadeiras de alumínio. Os suportes foram acoplados à mesma base de madeira utilizada para a determinação da frequência de ressonância, onde a pressão dos transdutores na amostra é ajustada por molas. A finalidade do dispositivo de fixação foi garantir a reprodutibilidade experimental. Este conjunto é mostrado na figura 11. Determinou-se o tempo de trânsito médio de  $14,00 \pm 0,50 \mu\text{s}$  nas amostras de pasta de cimento, com velocidade de pulso de  $3700 \pm 130 \text{ m/s}$ . Estes resultados foram comprovados, comparando-os com resultados obtidos com o aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester), em testes realizados no laboratório de materiais de construção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

A disposição dos equipamentos utilizados no ensaio é mostrada na figura 12.

O motivo de ter-se utilizado os dois métodos de técnicas ultra-sônicas, foi o de se obter melhor reprodutibilidade dos resultados experimentais, e eliminar eventuais erros sistemáticos e instrumentais que podem ocorrer nestes experimentos<sup>(8)</sup>.

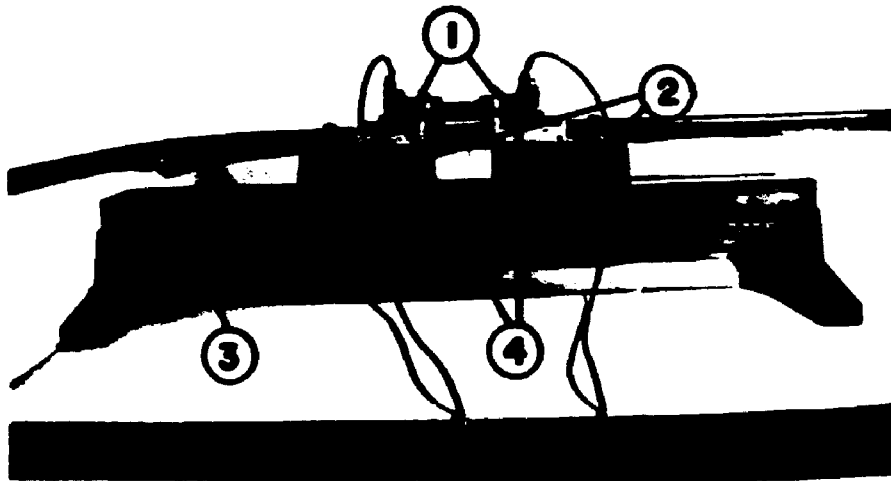




Legenda :

- ① - Pico emitido
- ② - Pico recebido
- ③ - Picos refletidos
- Tt - Tempo de trânsito

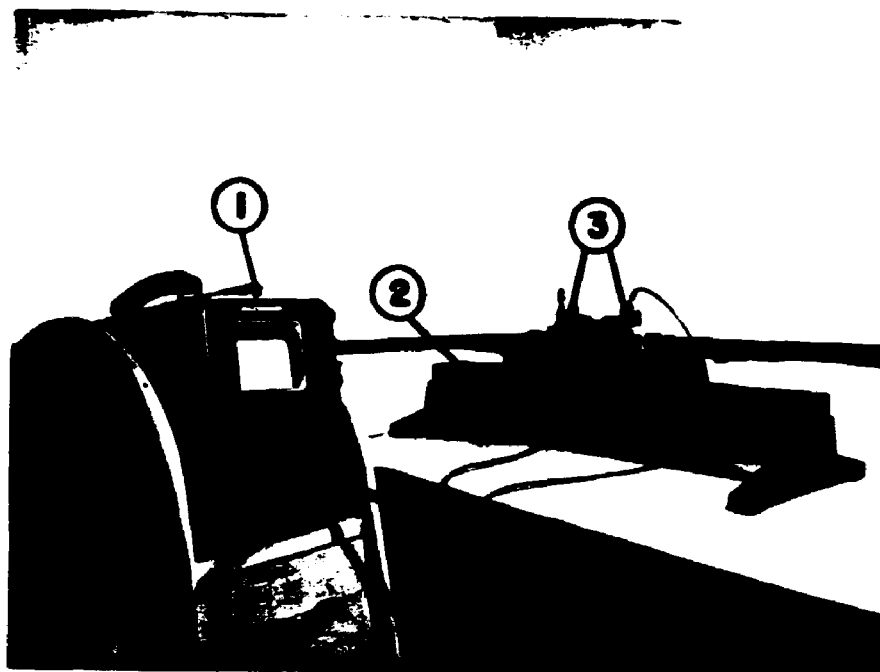
FIGURA 10 - Leitura do tempo de trânsito



*Legenda :*

- ① - *Transdutores*
- ② - *Blocos deslizantes*
- ③ - *Base de madeira*
- ④ - *Suporte de alumínio*

**FIGURA 11** - *Dispositivo utilizado na determinação do tempo de trânsito do pulso ultra-sônico*



*Legenda :*

- ① - *Detetor ultra-sônico de falhas*
- ② - *Base de madeira*
- ③ - *Transdutores*

*FIGURA 12 - Disposição dos equipamentos utilizados na determinação do tempo de trânsito do pulso ultra-sônico*

## 2.5 - IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS

O dispositivo utilizado para a irradiação das amostras no reator, é constituído do tubo de irradiação, tubo flexível e do tubo suporte, que são descritos a seguir:

- 1 - TUBO DE IRRADIAÇÃO - É um tubo de alumínio usinado com diâmetro interno de 39 mm e comprimento de 2500 mm. Na parte superior do tubo há uma flange de aço inoxidável fixada com parafusos, por onde as amostras são introduzidas.
- 2 - TUBO FLEXÍVEL - É um tubo de borracha com 10000 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro, com um conector rosqueado na peça de aço inox que está na parte superior do tubo de irradiação. Na extremidade superior há um tubo em "T" provido com manômetro para injeção de gás. O tubo também é utilizado para fazer vácuo.
- 3 - TUBO SUPORTE - É um tubo de alumínio com comprimento total de 8000 mm, onde são fixados os tubos de irradiação e o flexível. Sua função é a de dar rigidez ao conjunto e permitir a introdução do tubo de irradiação no caroço do reator, na posição desejada.

O dispositivo utilizado na irradiação é mostrado na figura 13, e o detalhamento do tubo de irradiação na figura 14.

As amostras foram fixadas em um suporte de alumínio, que é parafusado a uma haste. Para dar maior rigidez

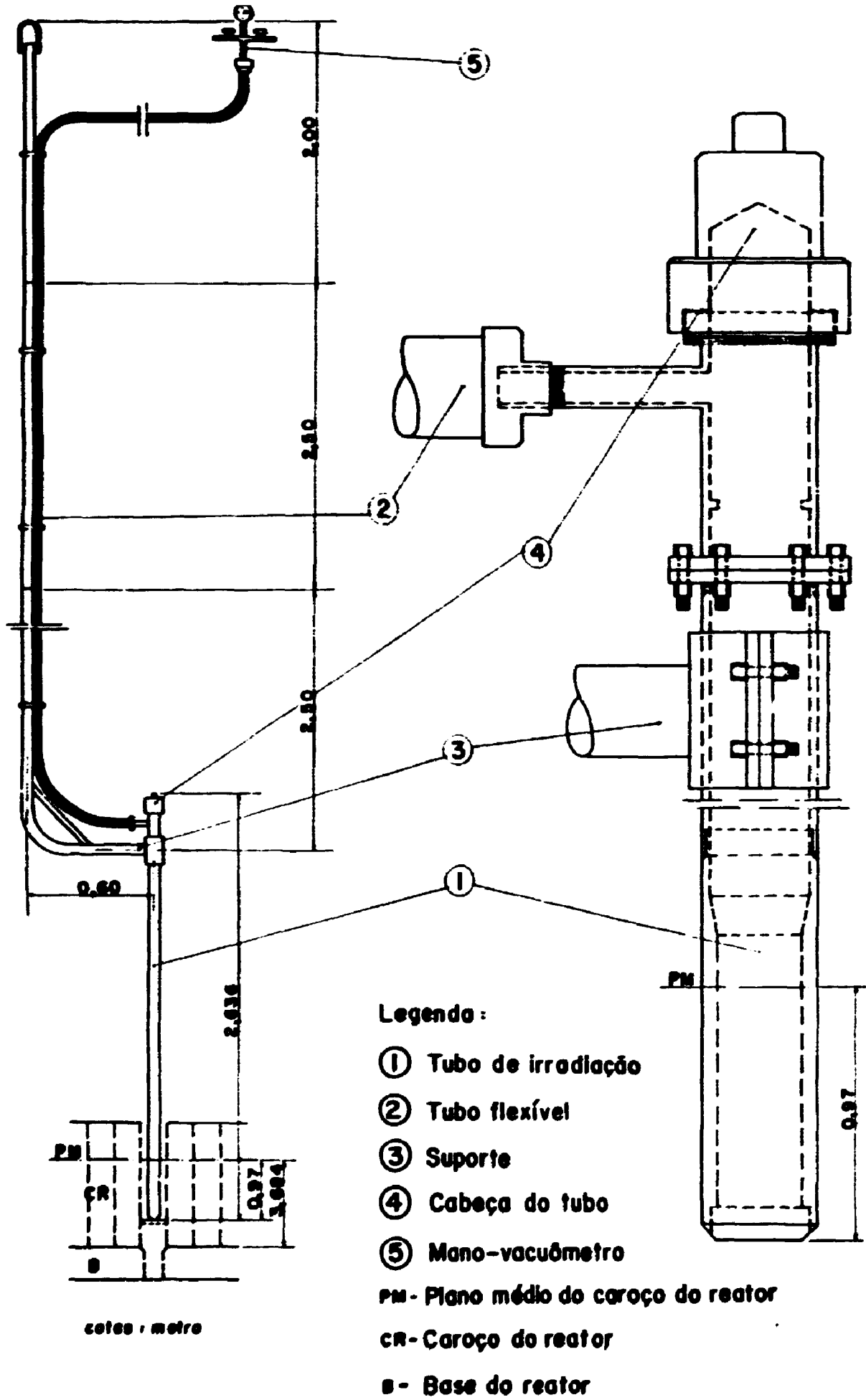


FIGURA 13 - Equipamento utilizado na irradiação

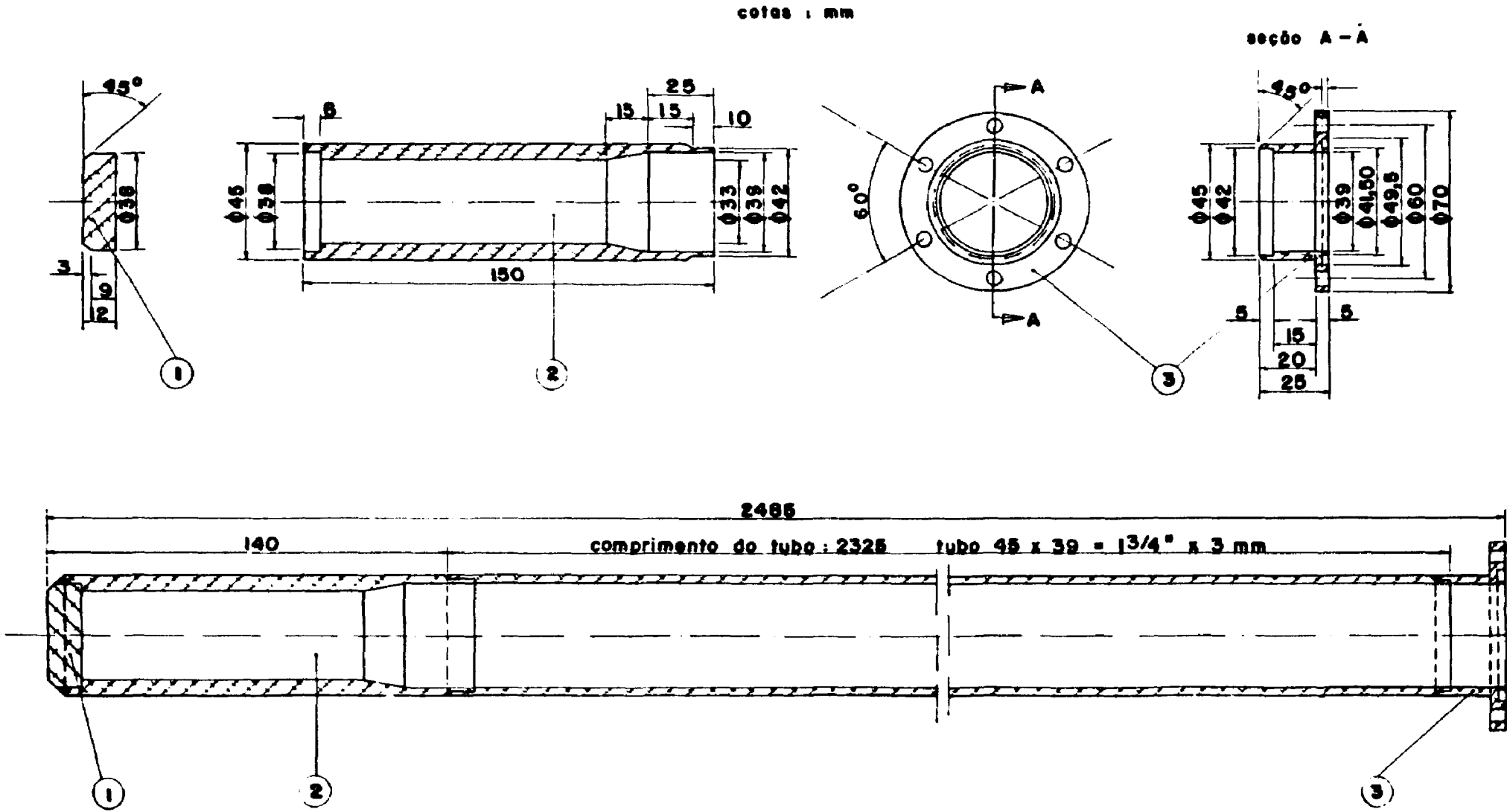


FIGURA 14 - Detalhamento do tubo de irradiação

mecânica ao conjunto, as amostras foram amarradas com arame de alumínio. Este conjunto foi em seguida colocado no interior do tubo de irradiação. Na amostra localizada no plano médio do caroço do reator, colocou-se um termopar acoplado a um registrador, o que permitiu a monitoração constante da temperatura durante o período de irradiação, em vista da importância do tratamento térmico cíclico na mudança estrutural das amostras.

A fixação das amostras no tubo de irradiação é mostrada na figura 15.

A irradiação foi realizada no caroço do reator de pesquisas IEA - R1, de 2 MW de potência, na posição 24. Esta posição é mostrada na figura 16. A atmosfera era de argônio, com pressão inicial de 1 Kgf/cm<sup>2</sup>. O tempo total de irradiação foi de 474 h 4 27 min., com os seguintes fluxos médios instantâneos:

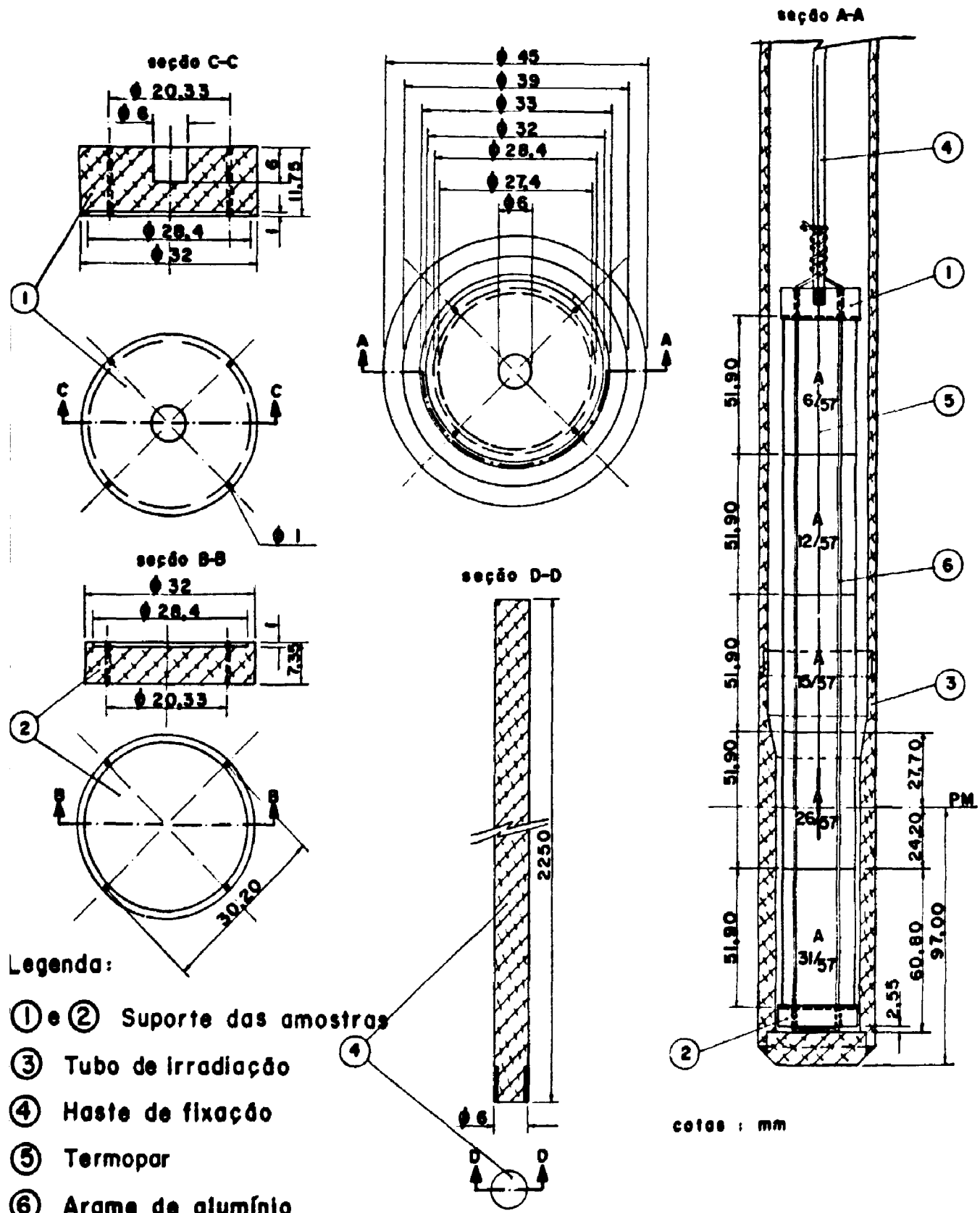
$$\begin{aligned} \text{nêutrons rápidos} & : 4,22 \times 10^{12} \text{ n / s cm}^2 \\ \text{nêutrons térmicos} & : 6,80 \times 10^{12} \text{ n / s cm}^2 \end{aligned}$$

e com os seguintes valores para os fluxos integrados:

$$\begin{aligned} \text{nêutrons rápidos} & : 7,20 \times 10^{18} \text{ n / cm}^2 \\ \text{nêutrons térmicos} & : 1,16 \times 10^{19} \text{ n / cm}^2 \end{aligned}$$

Na figura 17 pode ser visto o fluxo instantâneo a que as amostras foram submetidas, e na figura 18 o fluxo integrado em cada amostra.

A temperatura nas amostras variou de  $25 \pm 2$  °C a  $120 \pm 5$  °C durante o período de irradiação. Esta variação foi decorrente principalmente do aquecimento gama.



Legenda:

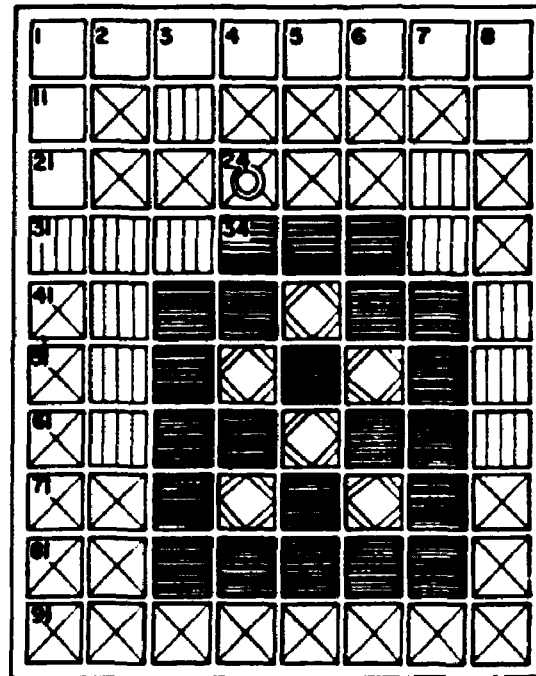
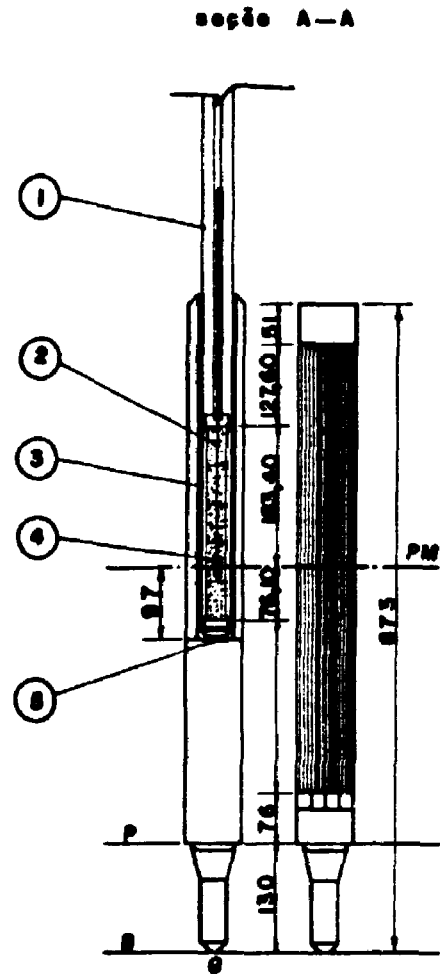
- ① e ② Suporte das amostras
- ③ Tubo de Irradiação
- ④ Haste de fixação
- ⑤ Termopar
- ⑥ Arame de alumínio

PM-Plano médio do caroço do reator

A - Amostra

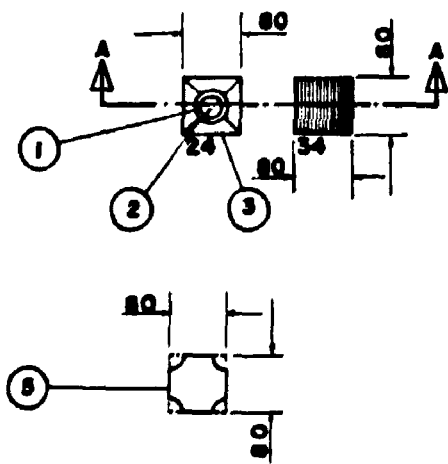
FIGURA 15 - Fixação das amostras no tubo de Irradiação





Representação esquemática do carga de reator de pesquisas IEA-R1

Legenda:



cofas em mm

- Posição de irradiação (24)
- Caixa de irradiação
- Elemento combustível
- Barra de controle
- Elemento refletor
- Placa matriz
- Tubo de irradiação
- Amostras
- Peças centralizadoras
- Termopar
- Circulação de água

PM—Plano médio do corpo do reator

P— Placa matriz

G— Grell

B— Base do reator

FIGURA 16 — Posicionamento das amostras no caroço do reator de pesquisas IEA-R1

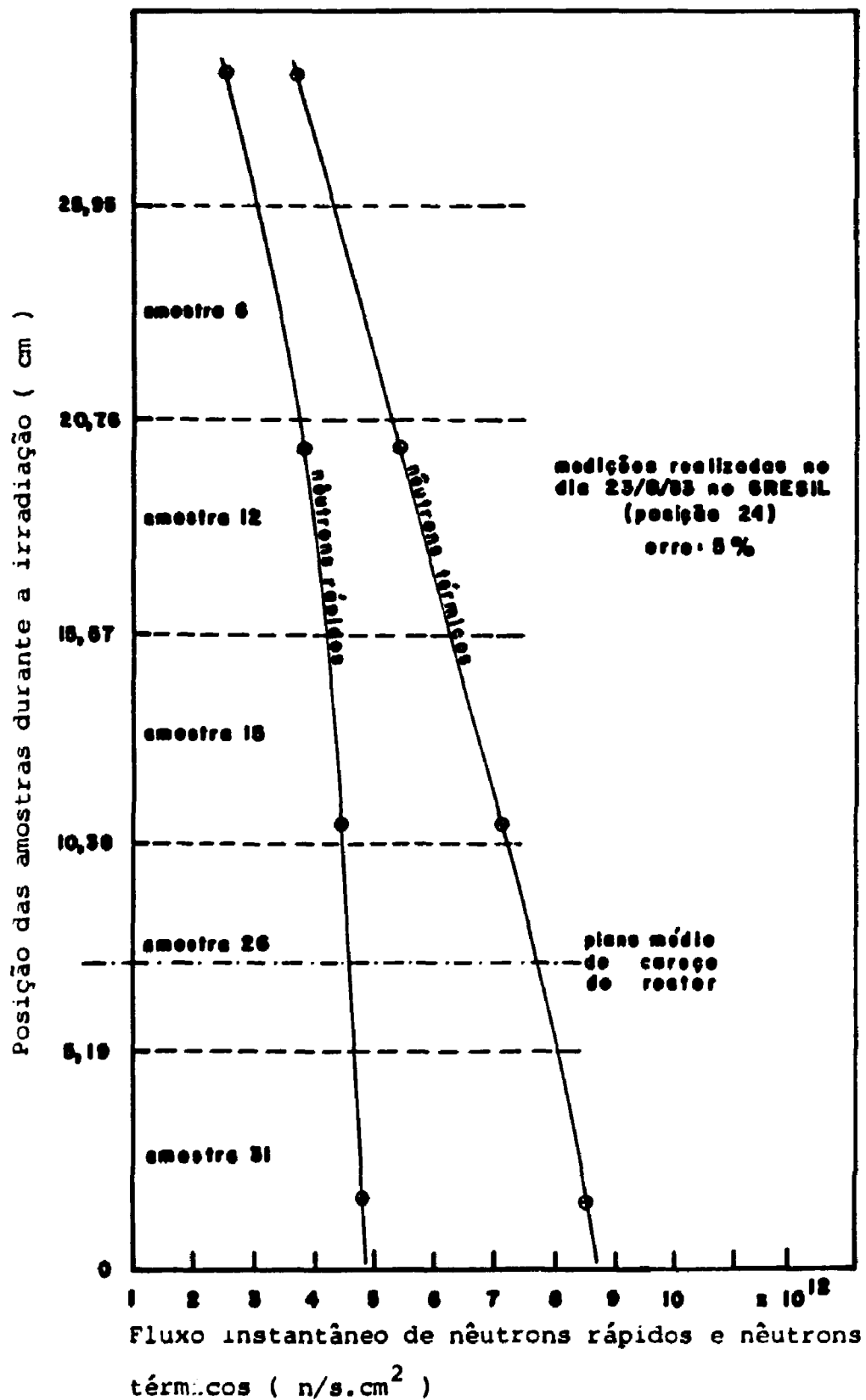


FIGURA 17 - Fluxo instantâneo de nêutrons rápidos e nêutrons térmicos nas amostras durante a irradiação

<b>A-6</b>	<p style="text-align: center;">Amostra 6</p> <p>Fnr : <math>5,9 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p> <p>Fnt : <math>8,8 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p>	
<b>A-12</b>	<p style="text-align: center;">Amostra 12</p> <p>Fnr : <math>6,8 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p> <p>Fnt : <math>9,4 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p>	
<b>A-15</b>	<p style="text-align: center;">Amostra 15</p> <p>Fnr : <math>7,4 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p> <p>Fnt : <math>1,2 \cdot 10^{19}</math> n/cm<sup>2</sup></p>	<p>Legenda:</p> <p>Fnr : Fluxo integrado médio de nêutrons rápidos</p> <p>Fnt : Fluxo integrado médio de nêutrons térmicos</p>
<del>PM</del> <b>A-26</b>	<p style="text-align: center;">Amostra 26</p> <p>Fnr : <math>7,8 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p> <p>Fnt : <math>1,3 \cdot 10^{19}</math> n/cm<sup>2</sup></p>	<p>PM : Plano médio do caroço do reator</p>
<b>A-31</b>	<p style="text-align: center;">Amostra 31</p> <p>Fnr : <math>8,2 \cdot 10^{18}</math> n/cm<sup>2</sup></p> <p>Fnt : <math>1,5 \cdot 10^{19}</math> n/cm<sup>2</sup></p>	<p>A : Amostras</p>

FIGURA 18 - Fluxo integrado médio de nêutrons rápidos e nêutrons térmicos em cada amostra no caroço do reator de pesquisas IEA - R1

Pelo fato de o reator não operar continuamente, as amostras foram submetidas a sessenta e um (61) ciclos térmicos.

No final do período de irradiação, a pressão no tubo era de  $3,5 \text{ Kg / cm}^2$ , aproximadamente. Isto provavelmente em decorrência da perda de água das amostras de cimento, provocado pela radiação gama. A análise deste gás com espectrometria de massa acusou a presença de N (14,44 %), O (10,12 %) e H (4,7 %), além do argônio.

## 2.6 - EFEITOS TÉRMICOS

Amostras submetidas à irradiação estão sujeitas a gradientes de temperatura, provocados principalmente pelo aquecimento causado pela radiação gama.

Experimentos prévios mostram que no concreto comum, o comprimento médio de relaxação para raios gama é cerca de 15 cm, aproximadamente<sup>(27)</sup> O comprimento médio de relaxação é a distância percorrida pela radiação em um determinado meio, até que sua energia seja reduzida por um fator de 2<sup>(27)</sup>

O diâmetro das amostras utilizadas neste trabalho é de  $27,3 \pm 0,1 \text{ mm}$ , e nestas condições, pode-se admitir que elas foram aquecidas uniformemente.

Para simular os efeitos térmicos provocados pela radiação gama, e conseqüentemente separá-los dos efeitos da radiação neutrônica, utilizou-se um forno de microondas com

modificações no seu circuito eletrônico, para permitir o controle da temperatura nos níveis desejados:  $25 \pm 2$  °C a  $120 \pm 5$  °C.

Submeteram-se as amostras ao mesmo período de tempo (474 h e 27 min.) e ao mesmo número de ciclos de temperatura sofridas pelas amostras no reator, a fim de simular com a maior precisão possível os ciclos de aquecimento das amostras irradiadas.

### CAPÍTULO 3

#### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### 3.1 - AMOSTRAS SUBMETIDAS À IRRADIAÇÃO

Estas amostras, logo que se encerrou o ciclo de irradiação, apresentaram níveis de radiação superiores a 1 R (amostras situadas no interior do tubo de irradiação e submerso na água a aproximadamente 1 m do nível da piscina). Devido a este fato, os resultados referentes a estas amostras não saturadas, foram obtidos após um período de decaimento radioativo de cinco meses, e após a ressaturação das amostras (UR = 100 %).

As doses recebidas por cada amostra variaram

de acordo com a sua localização no caroço do reator (figuras 17 e 18), e a variação final nos parâmetros de cada amostra é mostrada na tabela 4. A média final dos valores obtidos nas amostras é mostrada na tabela 5 e nas figuras 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28, e as variações percentuais constam da tabela 6.

No tubo de irradiação foram colocadas cinco amostras, conforme pode ser visto na figura 17. A amostra 31, situada na parte inferior do tubo de irradiação, e que recebeu as maiores doses, sofreu danos mais pronunciados. As trincas sofridas em consequência da radiação neutrônica e principalmente da variação da temperatura causada pela radiação gama, causaram a sua divisão em quatro partes, o que impossibilitou que fossem realizadas medições nesta amostra, após o período de irradiação (474 h e 27 min.). Devido a este fato, os resultados apresentados nas tabelas 5, 6 e nas figuras citadas acima, referem-se à média de valores em quatro amostras.

### 3.2 - AMOSTRAS SUBMETIDAS AO RECOZIMENTO TÉRMICO CÍCLICO

Estas amostras foram medidas diariamente durante o período de testes (simulação do aquecimento gama), e as variações observadas nos parâmetros são visualizadas nas figuras 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28. As médias finais dos valores obtidos nas amostras são mostradas na tabela 6 e figuras citadas acima. Estes valores foram obtidos imediatamente após o término dos ciclos térmicos, e após a sua res-

PARÂMETRO	AMOSTRA	VAL. INICIAL	AR'S IRRADIAÇÃO	
			SEM IRRADIAÇÃO	40° IRRADIAÇÃO
COMPRIMENTO (mm)	6	51,90	52,00	51,90
	12	51,90	51,70	51,67
	15	51,90	52,10	52,05
	25	51,90	51,70	51,85
DIÂMETRO (mm)	6	27,60	27,60	27,60
	12	27,60	27,30	27,30
	15	27,72	27,30	27,20
	25	27,55	27,30	27,40
MASSA (g)	6	57,760	57,978	58,057
	12	58,917	58,582	61,709
	15	58,855	59,202	59,787
	25	58,115	57,019	61,756
FREQUÊNCIA DE RESONÂNCIA (KHz)	6	31,841 ± 0,212	28,543 ± 0,226	27,655 ± 0,142
	12	31,718 ± 0,202	28,000 ± 0,227	27,421 ± 0,170
	15	31,671 ± 0,216	28,300 ± 0,222	28,027 ± 0,160
	25	31,627 ± 0,225	19,780 ± 0,204	27,628 ± 0,157
TEMPO DE TRANSITO (μs)	6	14,400 ± 0,419	21,020 ± 0,000	16,700 ± 0,527
	12	14,000 ± 0,376	21,050 ± 0,288	17,070 ± 0,534
	15	14,470 ± 0,443	21,000 ± 0,000	17,000 ± 0,265
	25	13,700 ± 0,509	21,405 ± 0,100	16,500 ± 0,514
VOLUME (cm <sup>3</sup> )	6	20,270	21,110	21,110
	12	21,050	20,262	20,701
	15	20,270	20,426	21,014
	25	20,268	20,262	21,001
MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	6	1,301	1,270	1,269
	12	1,350	1,737	1,222
	15	1,337	1,662	1,277
	25	1,344	1,751	1,330
VELOCIDADE DE PULSO (cm/s)	6	2,404 ± 0,107	2,465 ± 0,000	2,111 ± 0,008
	12	2,488 ± 0,093	2,433 ± 0,022	2,075 ± 0,187
	15	2,522 ± 0,111	2,481 ± 0,000	2,255 ± 0,041
	25	2,782 ± 0,070	2,302 ± 0,000	2,120 ± 0,102
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MÓDULO DA FREQUÊNCIA DE RESONÂNCIA) (t/cm <sup>2</sup> )	6	211,428 ± 2,502	22,465 ± 2,250	108,254 ± 1,000
	12	210,474 ± 2,611	21,221 ± 2,197	120,211 ± 2,027
	15	212,405 ± 2,241	20,784 ± 4,012	121,000 ± 2,020
	25	212,782 ± 2,000	22,510 ± 4,123	101,500 ± 1,281
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MÓDULO DA VELOCIDADE DE PULSO) (t/cm <sup>2</sup> )	6	244,258 ± 2,622	102,669 ± 0,000	121,000 ± 2,452
	12	220,142 ± 2,022	102,005 ± 2,722	124,700 ± 2,284
	15	242,224 ± 2,222	101,917 ± 0,000	122,221 ± 4,515
	25	225,252 ± 2,000	22,474 ± 1,297	122,200 ± 2,142

OBSERVAÇÃO: Os fluxos integrados a que se referem foram submetidos a:

VALORES RÁPIDOS (n/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>18</sup> )	VALORES LÂMINAS (n/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>18</sup> )	AMOSTRA	VALORES RÁPIDOS (n/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>18</sup> )	VALORES LÂMINAS (n/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>18</sup> )
5,20	2,00	15	7,40	1,20
6,00	2,40	25	7,20	1,70

TABELA 4 - Variação dos parâmetros das amostras submetidas à irradiação



TABELA 5

Valores dos parâmetros medidos nas amostras submetidas à irradiação e ao resfriamento térmico cíclico

PARÂMETRO	UNIDADE	AMOSTRAS SUBMETIDAS À IRRADIAÇÃO			AMOSTRAS NÃO IRRADIADAS		
		VALOR INICIAL ( AMOSTRAS SA- TURADAS : 100 % )	APÓS IRRADIAÇÃO		VALOR INICIAL ( AMOSTRAS SA- TURADAS : 100 % )	APÓS RESFRIAMENTO TÉRMICO CÍCLICO	
			SEM IRRADIAÇÃO	APÓS IRRADIAÇÃO		SEM IRRADIAÇÃO	APÓS IRRADIAÇÃO
TEMPERATURA	°C	27,4 ± 0,16	27,58 ± 0,15	27,43 ± 0,21	27,27 ± 0,10	27,28 ± 0,10	27,15 ± 0,13
UMIDIDADE	%	51,90 ± 0	51,68 ± 0,21	51,20 ± 0,11	51,20 ± 0,04	51,20 ± 0,06	51,63 ± 0,09
ASSA	g	52,18 ± 1,10	52,12 ± 0,31	52,28 ± 1,42	52,22 ± 1,23	52,22 ± 0,21	52,25 ± 0,24
REQUISI- TA DE ESSE- NCIA	mg	21,72 ± 0,09	21,54 ± 1,12	22,47 ± 0,60	22,20 ± 1,15	22,51 ± 0,20	22,22 ± 0,22
CAPU- E TRAY- LITE	g	14,16 ± 0,33	14,14 ± 0,27	14,22 ± 0,22	14,50 ± 0,18	14,42 ± 0,25	14,22 ± 0,22
CLUBE	cm <sup>3</sup>	20,69 ± 0,36	20,62 ± 0,40	20,66 ± 0,44	20,21 ± 0,22	20,75 ± 0,21	20,24 ± 0,12
ASSA ESPECÍ- FICA	g/cm <sup>3</sup>	1,93 ± 0,02	1,71 ± 0,04	1,27 ± 0,06	1,22 ± 0,02	1,26 ± 0,02	1,22 ± 0,02
TEMPE- RATURA DE 1650	K/s	2,67 ± 0,02	2,44 ± 0,04	2,09 ± 0,05	2,59 ± 0,04	2,42 ± 0,06	2,20 ± 0,14
E (Fr)	t/cm <sup>2</sup>	213,12 ± 0,27	25,16 ± 6,74	122,00 ± 2,22	226,22 ± 5,00	22,22 ± 6,47	122,22 ± 6,47
E (Tp)	t/cm <sup>2</sup>	222,46 ± 13,24	101,22 ± 1,20	124,22 ± 2,22	222,22 ± 2,22	22,22 ± 6,22	122,22 ± 2,22

NOTAÇÃO :

E<sub>d</sub> (Fr) : Módulo de elasticidade dinâmico calculado pelo método da frequência de ressonância

E<sub>d</sub> (Tp) : Módulo de elasticidade dinâmico calculado pelo método da velocidade de pulso

Os valores acima representam a média de valores medidos em quatro amostras.

TABELA 6

*Variações percentuais nos parâmetros das amostras submetidas à irradiação e ao recozimento térmico cíclico.*

PARÂMETRO	AMOSTRAS IRRADIADAS		AMOSTRAS NÃO IRRADIADAS SUBMETIDAS AO RECOZIMENTO TÉRMICO CÍCLICO	
	SEM SATURAÇÃO	APÓS RES-SATURAÇÃO	SEM SATURAÇÃO	APÓS RES-SATURAÇÃO
COMPRIMENTO	- 0,04	- 0	- 0,39	- 0,02
DIÂMETRO	- 0,22	- 0,04	- 0,55	- 0,29
MASSA	- 11,91	+ 2,03	- 17,79	- 0,07
FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA	- 32,72	- 13,52	- 39,41	- 8,94
TEMPO DE TRÂNSITO	+ 50,00	+ 19,21	+ 47,59	+ 11,72
VOLUME	- 0,49	- 0,07	- 1,52	- 0,56
MASSA ESPECÍFICA	- 11,40	+ 2,07	- 16,58	0
VELOCIDADE DE PULSO	- 33,51	- 16,08	- 32,12	- 10,61
Ed ( Fr )	- 59,91	- 23,54	- 69,07	- 17,45
Ed ( Vp )	- 60,73	- 28,23	- 61,37	- 18,07

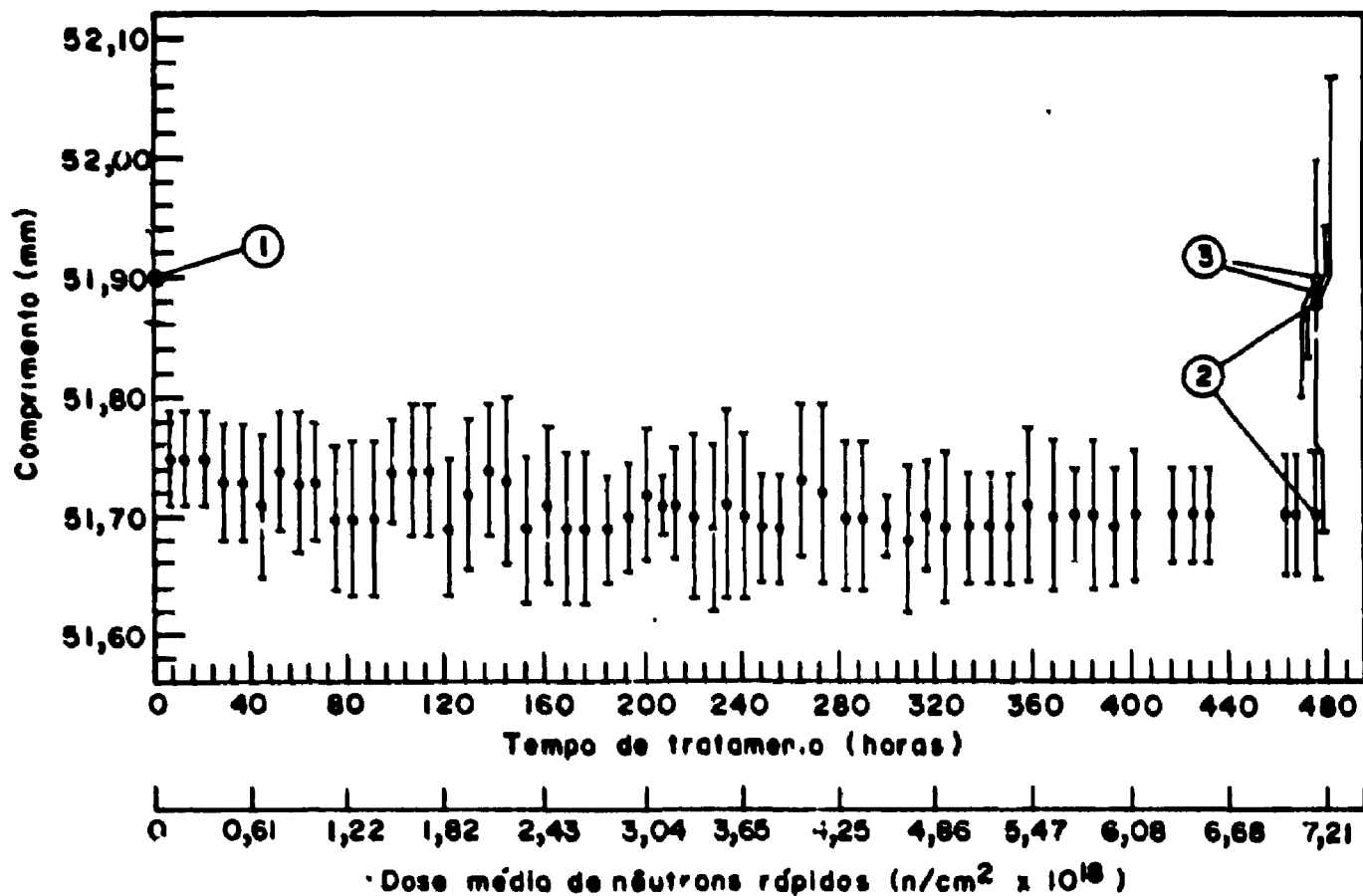
**NOTAÇÃO :**

*Ed (Fr) - Módulo de elasticidade dinâmico calculado pelo método da frequência de ressonância*

*Ed (Vp) - Módulo de elasticidade dinâmico calculado pelo método da velocidade de pulso*

*( - ) - Redução percentual*

*( + ) - Aumento percentual*

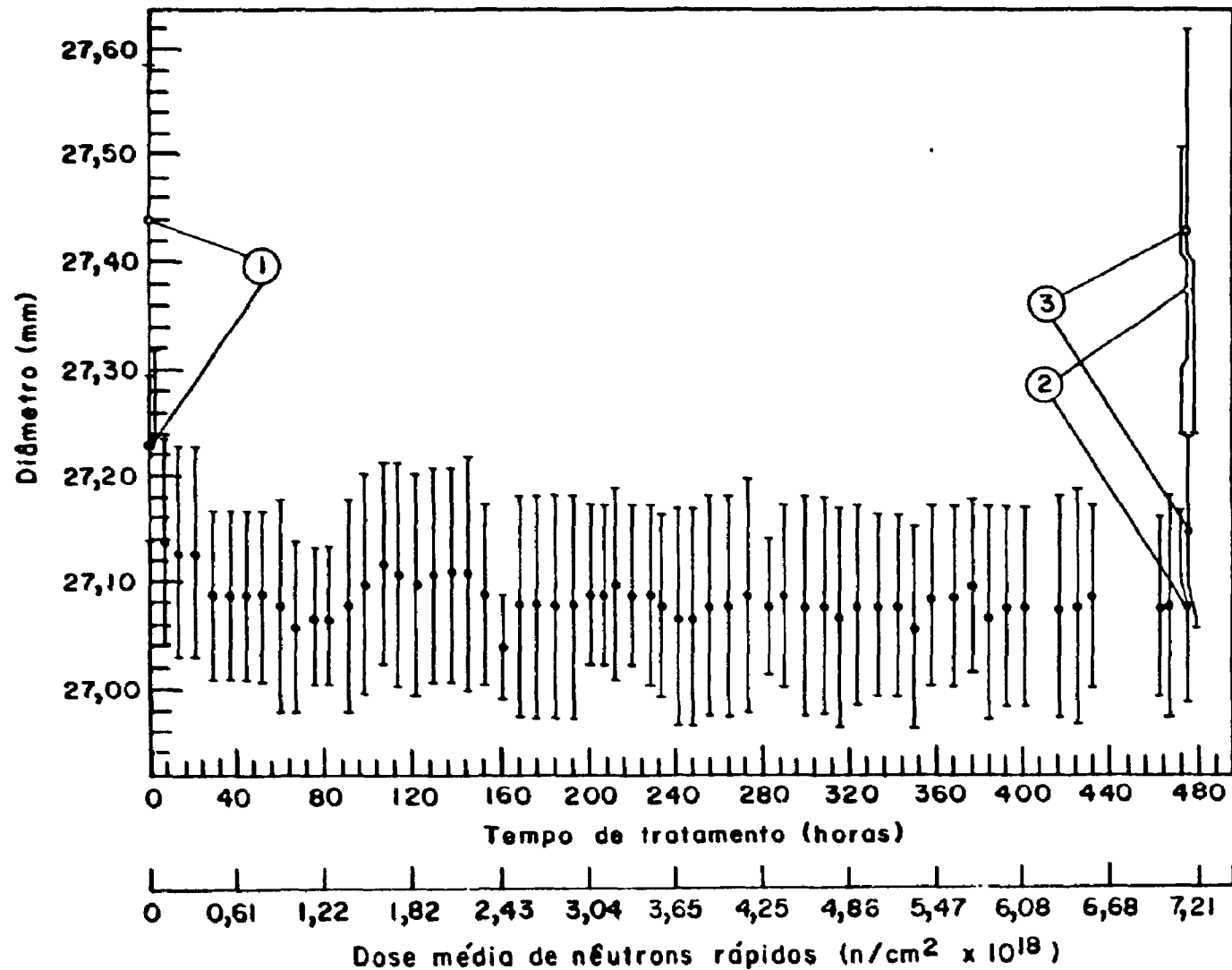


Legenda:

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO:** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras.

FIGURA 19 - Variação no comprimento das amostras

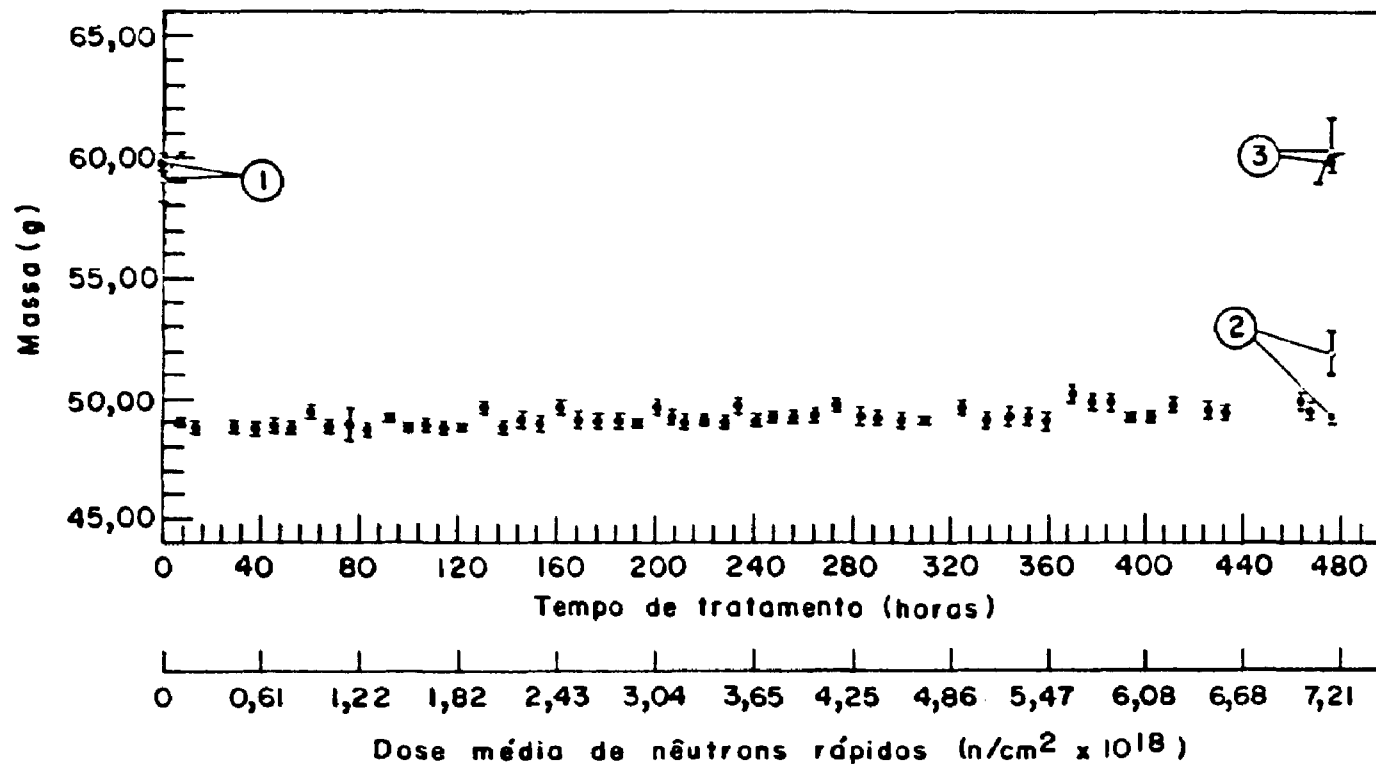


LEGENDA :

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO:** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras.

FIGURA 20 - Variação no diâmetro das amostras

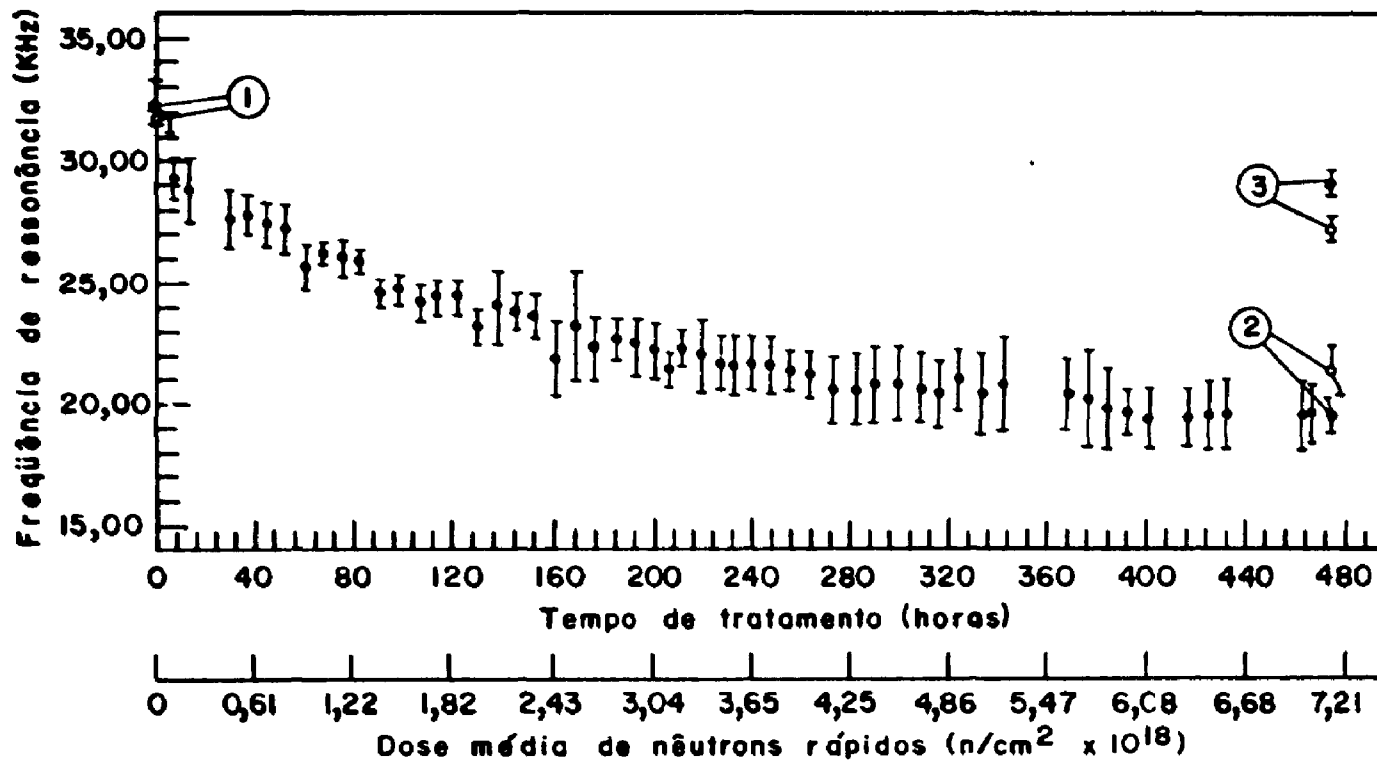


Legenda:

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após resaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

OBSERVAÇÃO: Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras.

FIGURA 21 - Variação na massa das amostras

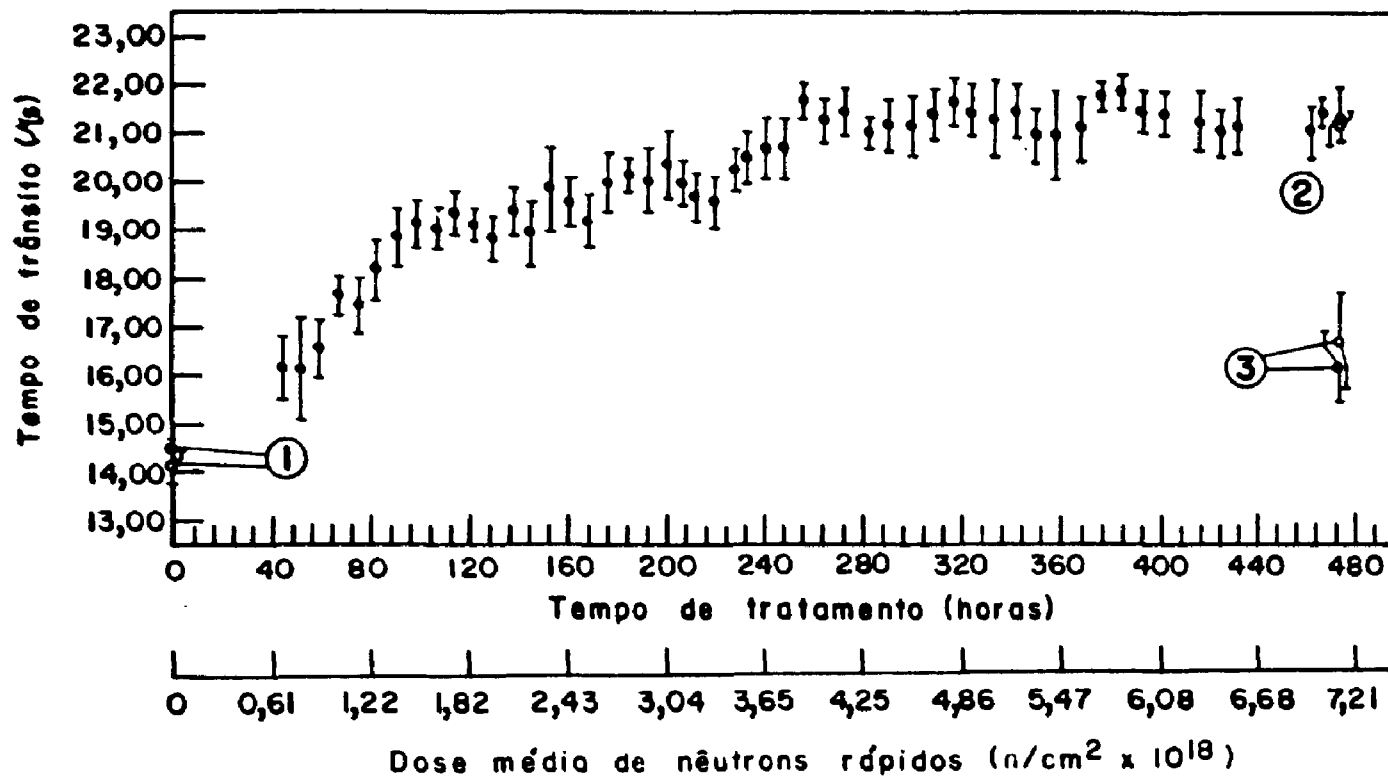


**LEGENDA:**

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO:** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras.

**FIGURA 22 -** Variação na frequência de ressonância das amostras

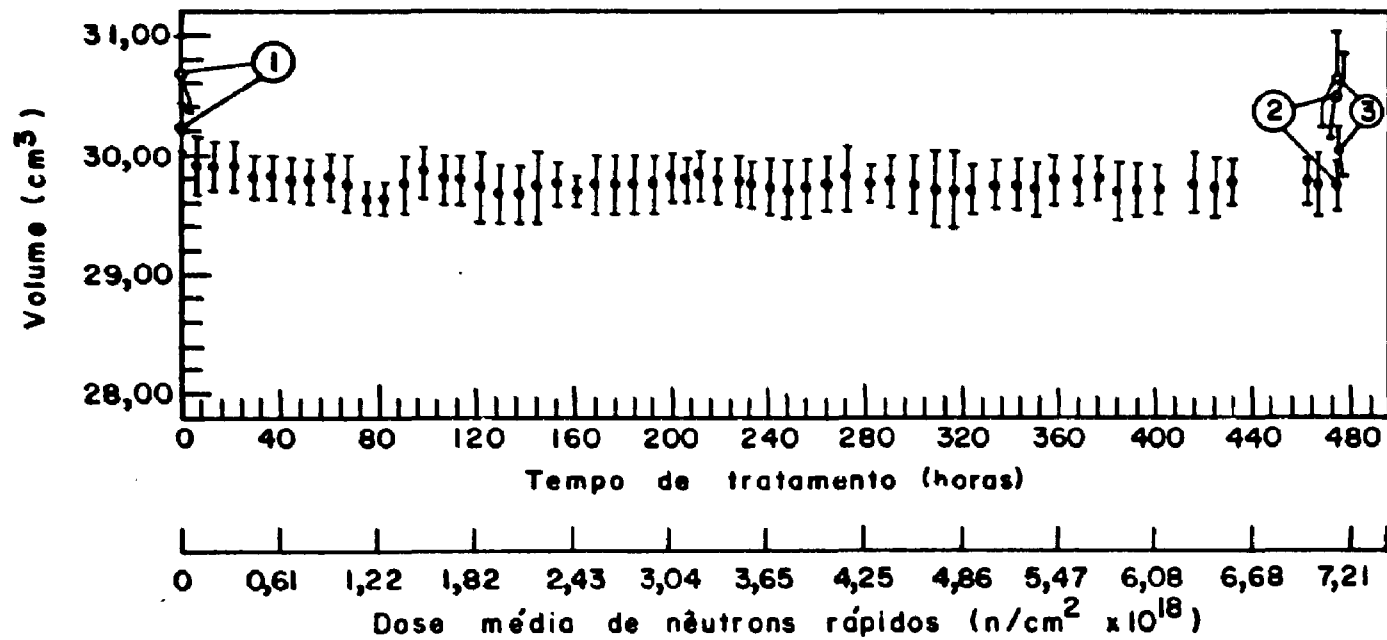


Legenda:

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após resaturação (UR=100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO:** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras

FIGURA 23 - Variação no tempo de trânsito das amostras



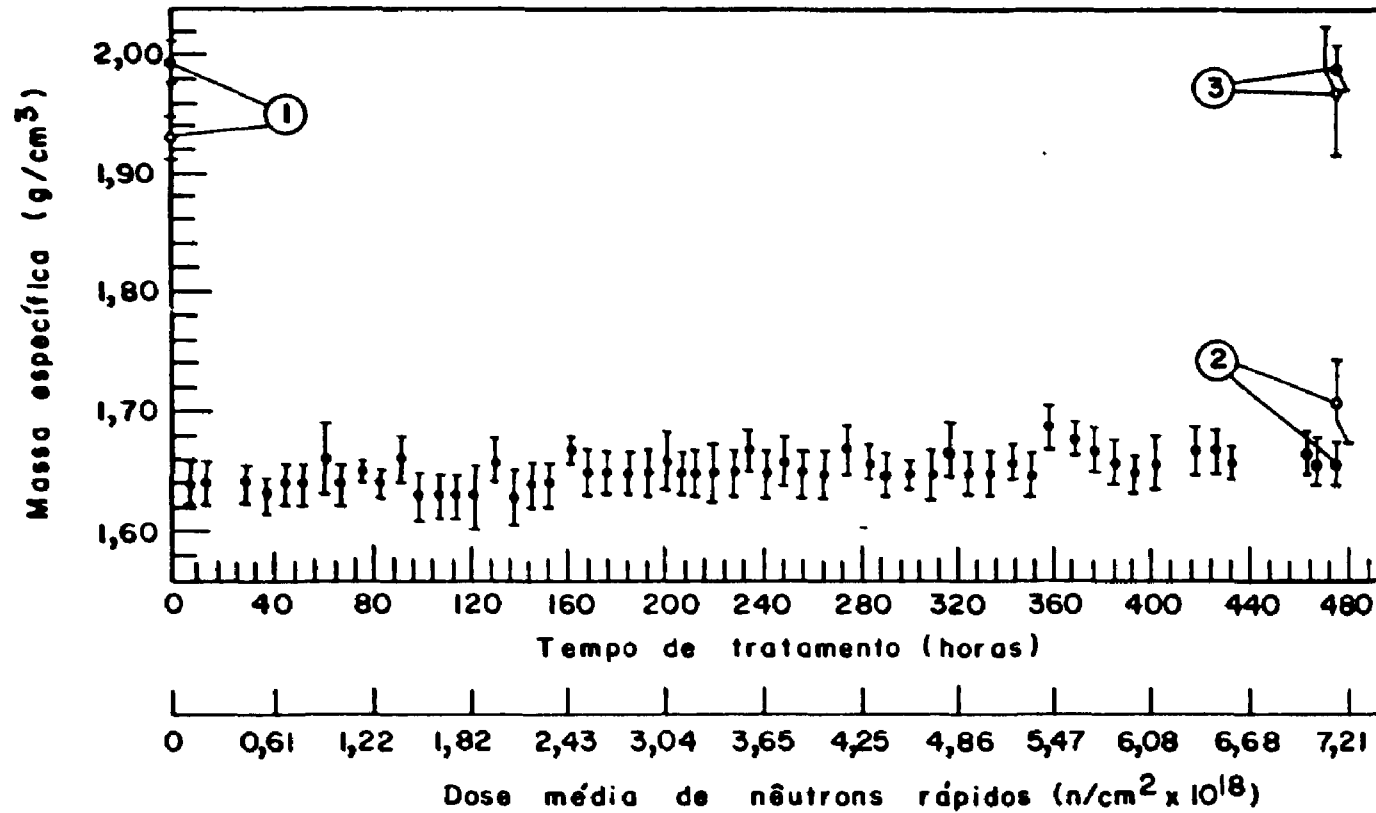
Legenda:

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO:** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras

FIGURA 24 - Variação no volume das amostras



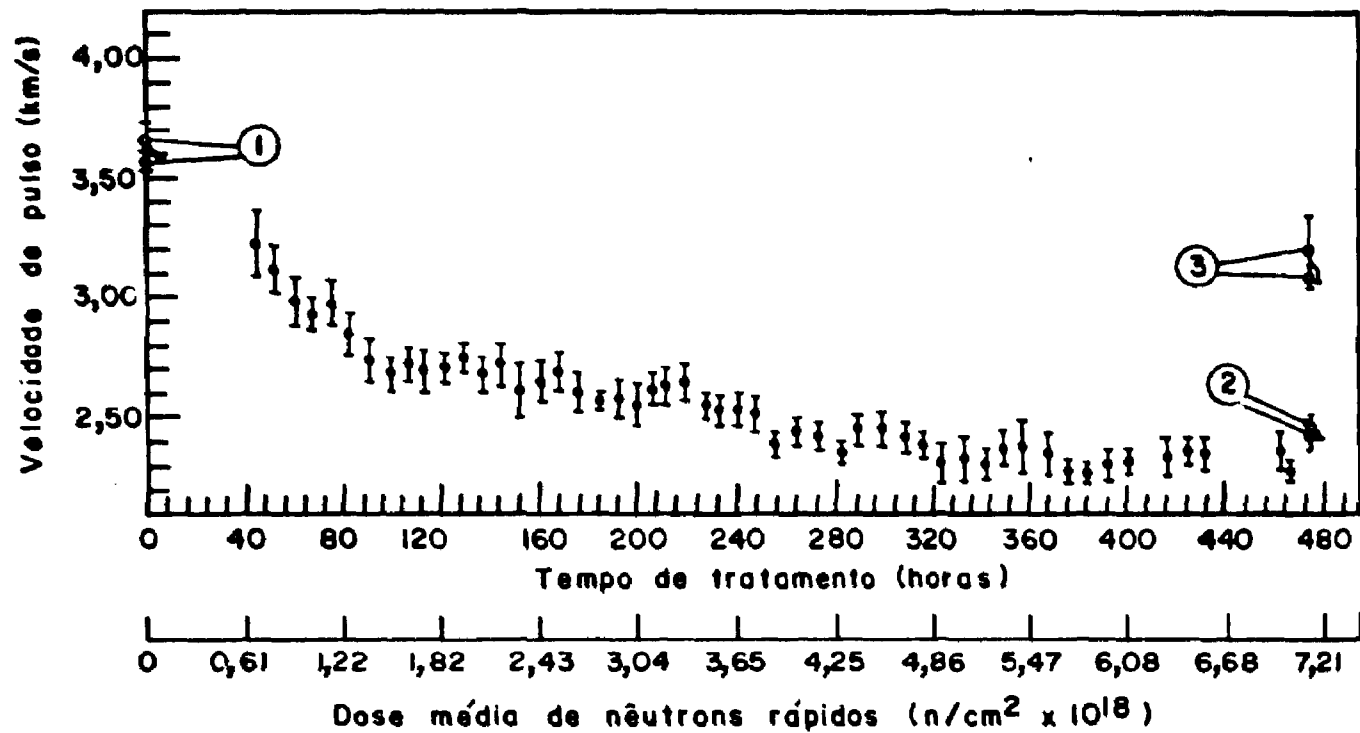


Legenda:

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO** : Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras

FIGURA 25 - Variação na massa específica das amostras

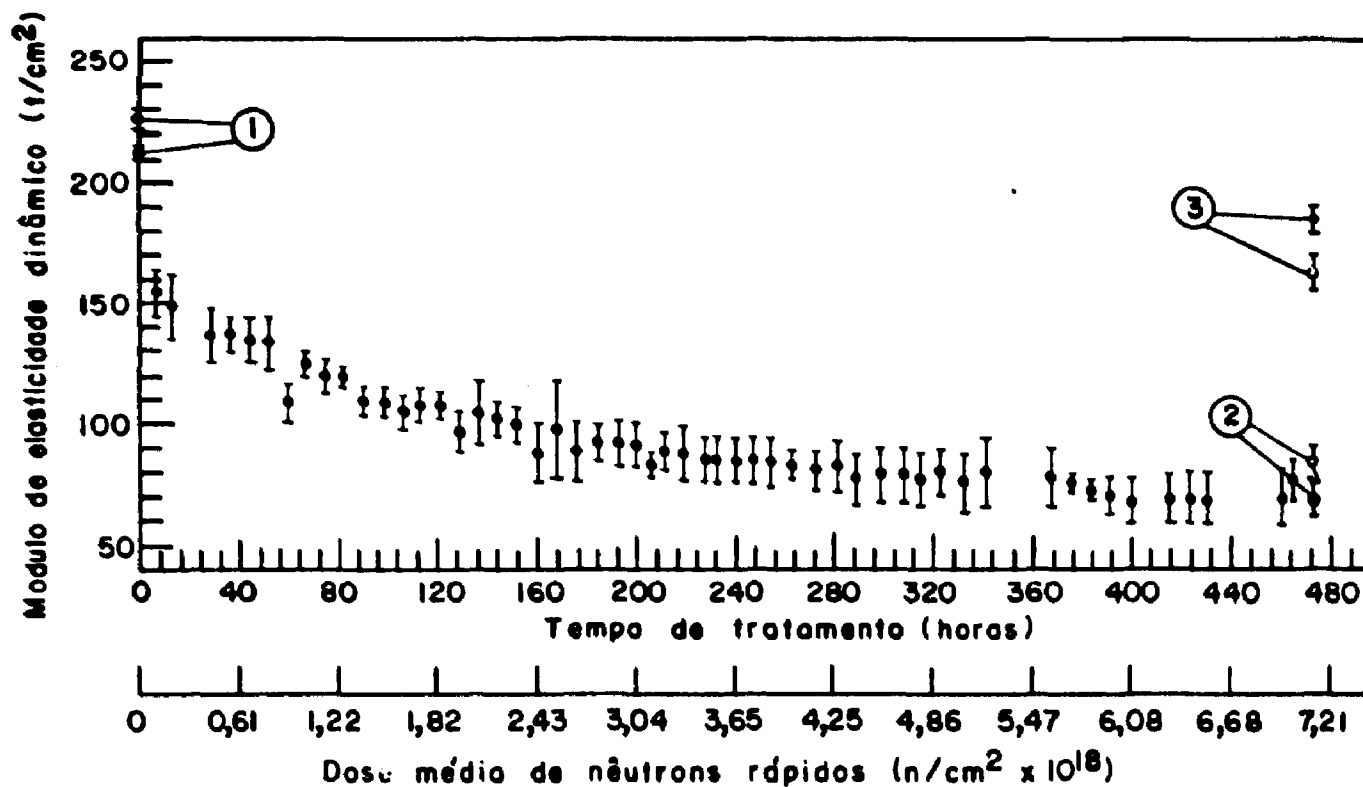


Legenda :

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO :** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras

FIGURA 26 - Variação na velocidade de pulso das amostras

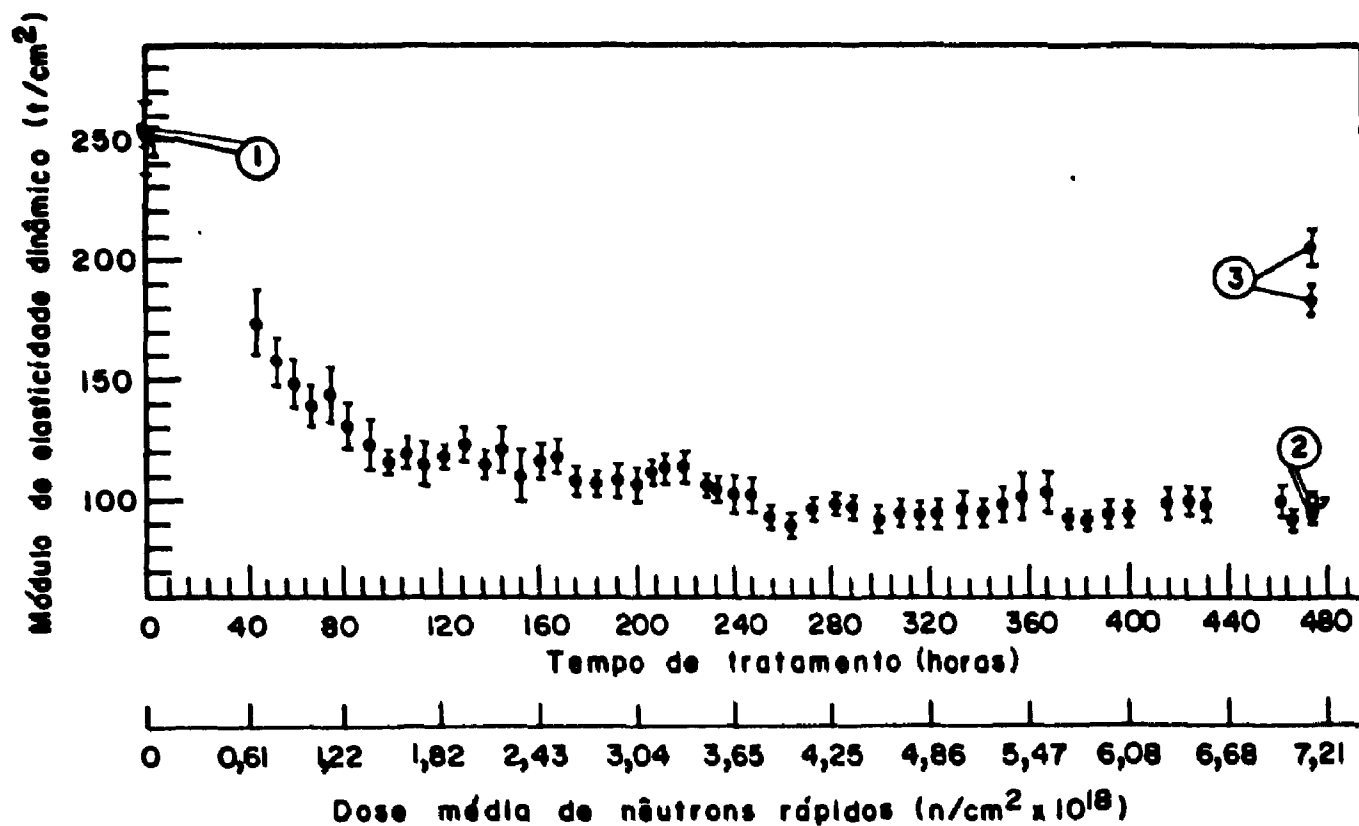


Legenda :

- ① - Valor inicial (UR = 100%)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após ressaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

OBSERVAÇÃO: Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras.

FIGURA 27 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico das amostras (método da frequência de ressonância)



Legenda:

- ① - Valor inicial (UR = 100 %)
- ② - Após tratamento
- ③ - Após resaturação (UR = 100%)
- - Amostras submetidas à irradiação
- - Amostras não irradiadas submetidas ao tratamento térmico cíclico

**OBSERVAÇÃO:** Os pontos experimentais representam a média de valores em quatro amostras.

FIGURA 28 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico das amostras (método da velocidade de pulso)

saturação. As variações percentuais nos diversos parâmetros são mostrados na tabela 6. Os valores apresentados nas tabelas e figuras citadas, referem-se à média de valores obtidos em quatro amostras.

Os resultados apresentados em percentuais (tabela 6), tanto nas amostras irradiadas quanto naquelas submetidas ao recozimento térmico cíclico, referem-se a comparações efetuadas com valores obtidos nas amostras antes de serem submetidas aos respectivos tratamentos (valores iniciais UR = 100 %) e após estes testes, com as amostras sem saturação e também ressaturadas (UR = 100 %) (tabela 4).

A ressaturação das amostras após os testes deve-se ao fato de que as medidas iniciais foram realizadas nestas condições, e portanto, para um estudo comparativo mais preciso, as amostras foram recolocadas nas mesmas condições iniciais. Assim sendo, as variações observadas nas comparações efetuadas, refletem bem as mudanças ocorridas nas amostras, devido aos tratamentos a que foram submetidas.

#### CAPÍTULO 4

##### INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os testes com as amostras irradiadas (sem resaturação) foram feitos após um período de decaimento radioativo de cinco meses, durante o qual, possivelmente, as amostras reabsorveram umidade devido a evaporação da água das amostras existentes no dispositivo de irradiação estanque, e também ocorrendo rearranjos dos defeitos da irradiação neutrônica na estrutura cristalina. Todavia, o estudo comparativo é válido se considerarmos que todas as amostras provieram do mesmo lote inicial, portanto, com o mesmo tempo de cura (15 meses), e supondo que as amostras irradiadas foram afetadas igualmente durante o período de decaimento radioativo.

As amostras de controle, que foram mantidas nas condições iniciais, ou seja, em câmara de saturação ( UR = 100%) e temperatura na faixa de  $23 \pm 2$  ° C, não apresentaram variações em seus parâmetros durante o tempo de realização dos ensaios. Portanto, podemos afirmar que as variações nos parâmetros das amostras submetidas aos ensaios são devidos aos efeitos da irradiação neutrônica e irradiação gama (amostras irradiadas), bem como da variação de temperatura nas amostras submetidas ao recozimento térmico cíclico (amostras não irradiadas). Este procedimento experimental permitiu subtrair os efeitos térmicos e pôr em evidência os efeitos da irradiação nas amostras irradiadas.

Das comparações efetuadas com os valores obtidos inicialmente (amostras saturadas, UR = 100%), e após os tratamentos realizados (irradiação e recozimento térmico cíclico) sem saturação e após a ressaturação, observamos que:

1 - Todas as amostras apresentaram pequenas variações nas suas dimensões lineares.

Nas amostras irradiadas observamos que no diâmetro, após a ressaturação, houve um decréscimo de 0,04 %, e o comprimento permaneceu inalterado.

Nas amostras não irradiadas, houve redução no diâmetro da ordem de 0,29 %, (vide tabela 5 e 6, e figuras 19 e 20).

Deste modo concluímos que as dimensões lineares praticamente permaneceram inalteradas, indicando que as variações ocorridas foram estruturais, conforme nos mostram a análise dos itens subseqüentes:

2 - Nas amostras submetidas ao recozimento térmico cíclico no forno de microondas, a variação de massa foi grande, e esta foi mais pronunciada nos primeiros ciclos devido a eva

poração da água de amassamento, variando daí em diante apenas em função da umidade relativa do ar. Observou-se que nas amostras sem saturação houve um decréscimo de 17,97 %, ao passo que, após a ressaturação a massa praticamente voltou às condições iniciais (redução de 0,07 %).

Nas amostras irradiadas a irradiação gama e neutrônica exerceram influência análoga, tendo sido observado que nas amostras sem saturação houve uma redução de massa da ordem de 11,91 %.

Quando estas foram ressaturadas, notou-se, entretanto, que em relação às condições iniciais houve um acréscimo de 2,03 %.

Salientamos também que os recozimentos cíclicos no forno de microondas tiveram a finalidade principal de por em evidência os efeitos da radiação neutrônica nas amostras, o que foi conseguido na comparação das amostras após a ressaturação, conforme valores acima e constantes da tabela 6. Deste modo podemos dizer que todos os tratamentos térmicos e de irradiação causaram variações na massa e massa específica, e que são mostradas na tabela 5, figuras 21 e 22, com as variações percentuais na tabela 6;

- 3 - A frequência de ressonância e o tempo de trânsito do pulso ultrasônico, que são parâmetros sensíveis às mudanças estruturais, mostraram variações mensuráveis durante todo o período de recozimento térmico cíclico (amostras não irradiadas), e também no resultado final das amostras irradiadas (vide figuras 22 e 23).

Assim sendo, nas amostras não irradiadas, sem saturação, a frequência de ressonância sofreu redução de 39,41 %, ao passo que após a ressaturação o percentual de redução permaneceu em 8,94 %.

Já nas amostras irradiadas, o mesmo parâmetro sofreu redução de



32,72 % nas amostras sem saturação, sendo que após a ressaturação esta redução, em relação aos valores iniciais, permaneceu em 13,52 %.

Com relação ao tempo de trânsito do pulso ultra-sônico, foi observado um acréscimo de 47,59 %, nas amostras não irradiadas e sem saturação, sendo que após a ressaturação este acréscimo permaneceu em 8,94 %.

Já nas amostras irradiadas, o aumento observado nas amostras sem saturação foi da ordem de 50 %, sendo que após a ressaturação este acréscimo fixou-se em 19,21 %.

Analisando os valores obtidos após a ressaturação das amostras, concluímos que tanto a irradiação neutrônica quanto os ciclos térmicos (radiação gama e recozimento térmico cíclico) contribuíram para a formação de poros e microfissuras nas amostras.

As variações destes parâmetros são mostradas nas figuras 22 e 23, bem como na tabela 5, e as variações percentuais na tabela 6:

4 - Com relação ao módulo de elasticidade dinâmico observamos que, utilizando-se o método da frequência de ressonância, nas amostras não irradiadas, sem saturação, houve um acréscimo de 69,07 % em relação ao parâmetro inicial, ao passo que após a ressaturação, este decréscimo fixou-se em 17,45 %.

Nas amostras irradiadas sem saturação, esta redução foi de 59,91 %, fixando-se em 23,54 % após serem ressaturadas.

Utilizando-se o método da velocidade de pulso, notamos procedimento análogo, sendo que para as amostras não irradiadas a redução observada foi de 61,37 %, fixando-se esta em 18,07 % após a ressaturação das amostras.

Quanto às amostras irradiadas, não saturadas, observou-se uma redução de 60,73 %, ao passo que após a ressaturação este valor

fixou-se em 28,23 %.

Observou-se que para ambos os métodos, nas amostras submetidas à irradiação, o decréscimo em relação aos valores iniciais foi maior que nas amostras não irradiadas, nas mesmas condições.

A variação do módulo de elasticidade dinâmico obtida pelos dois métodos é mostrada na tabela 5, figuras 27 e 28, e a variação percentual na tabela 6.

5 - Embasados nos resultados obtidos, podemos tecer as seguintes considerações:

A - Conforme observado após a ressaturação, em todas as amostras ocorreu uma recuperação parcial no comprimento, diâmetro, massa, volume, massa específica e módulo de elasticidade ( vide tabela 5 e 6 ).

Observamos também que nas amostras irradiadas ocorreu uma recuperação menor que naquelas submetidas ao recozimento térmico cíclico, indicando a existência de, danos da radiação neutrônica na estrutura das amostras, apesar do baixo fluxo integrado a que estas foram submetidas ( $7,20 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>).

B - A recuperação observada na massa e massa específica das amstras após a ressaturação, é atribuída ao preenchimento dos poros e fissuras das amostras com água.

Nas amostras irradiadas a absorção foi mais pronunciada ( vide tabela 5 ), e isto é outra indicação de que a radiação neutrônica contribuiu para uma mudança microestrutural das amostras. Tanto as amostras irradiadas como as não irradiadas apresentaram fissuras em sua superfície após os tratamentos térmicos a que foram submetidas.

C - A análise do módulo de elasticidade das amostras irradiadas e não irradiadas mostra que os ciclos térmicos contribuíram de modo decisivo para um decréscimo deste parâmetro. Porém,

uma comparação entre os dois tipos de amostras após a ressaturação, pôs em evidência os danos da radiação neutrônica nas amostras irradiadas, devido ao decréscimo do coeficiente de elasticidade aumentando conseqüentemente a fragilização e comprometendo a resistência do material. O comportamento do módulo de elasticidade avaliado através dos dois métodos (frequência de ressonância e velocidade de pulso) é coerente dentro do desvio experimental encontrado na literatura (35)

De um modo geral, pelos resultados obtidos podemos concluir que os efeitos térmicos nas amostras foram predominantes. Porém, quando estas foram ressaturadas, foi observado que mesmo para baixo fluxo integrado como o mencionado neste trabalho, a radiação neutrônica causou danos detectáveis nas amostras, o que é o escopo deste trabalho.

Apesar de não podermos assegurar como a radiação neutrônica interfere em uma estrutura complexa como a do cimento, pode ser concluído que dano devido a irradiação neutrônica ocorreu, uma vez que todos os parâmetros estudados mostraram uma recuperação menos favorável nas amostras irradiadas.

## SUGESTÕES

Partindo-se da experiência adquirida pode-se sugerir, para trabalhos futuros:

- 1 - Estudar a influência da radiação neutrônica em argamassas (cimento e areia) e também em amostras de concreto, utilizando-se técnicas ultra-sônicas;
- 2 - A aplicação destas técnicas no estudo de danos de irradiação em metais e ligas, utilizando-se principalmente o método da velocidade de pulso;
- 3 - Cálculo do módulo de elasticidade dinâmico em metais , utilizando-se o método da velocidade de pulso;
- 4 - Realizar irradiações com maior fluxo integrado no reator e no Cíclotron.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - POLIVKA, M.; DAVIES, H.S. Radiation effects and shielding  
In: ASTM. Significance of tests and properties of  
concrete and concrete making materials. 1.978.Cap. 26 ,  
p. 420-33. (ASTM-STP-169B).
- 02 - HELL, W.C. Aplicação de técnicas ultra-sônicas no es -  
tudo da influência da temperatura sobre as constantes  
elásticas do cimento e concreto utilizados em vasos de  
pressão de reatores nucleares.São Paulo,1.970. (Disserta  
ção de Mestrado, Escola Politécnica, USP).
- 03 - KELLY, B.T. & DAVIDSON, I. Irradiation effects on con-  
crete. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS.Prestressed  
concrete pressure vessel: conference on..., held in  
Westminster , 13-17 march, 1.967.London,1.968.p.173-5.
- 04 - BROWNE , R.D. Properties of concrete in reactor vessels  
sels. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS.Prestressed con  
crete pressure vessel: conference on...,held in West -  
minster, 13-17 March,1.967.London 1.968. p. 131-51.
- 05 - ELLEUCH,M.F.; DUBOIS, F.; RAPPENEAU, J. Comportement  
sous irradiation des betons speciaux de protection et de  
leurs constituants. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGEN  
CY.Peaceful uses of atomic energy proceedings of the 4th  
international conference on..., held in Geneva,6-16, Sep  
tember, 1.971. 1.972. v.10, p. 579-93.
- 06 - ALMEIDA, D.F.de Ensaio em estruturas de concreto ar -  
mado e protendido .São Paulo, INSTITUTO DE ENGENHARIA ,  
1.980. (Apostila do curso: patologia de estruturas de  
concreto armado e protendido).

- 07 - SPECIFICATION for prestressed concrete pressure vessel for nuclear reactor. London, British Standard Institution, 1.973. (BS-4975).
- 08 - LUCKI, G.; ROSA JÚNIOR, A.A. Estudo de Danos de Radiação por nêutrons rápidos em amostras de pasta de cimento Portland comum. In: Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Rio de Janeiro, 9 à 12 de Dezembro 1.984 - Rio de Janeiro, PUC, 1.984. p.270-4 (T-58)
- 09 - KITTEL, C. Introdução à física do estado sólido. 5ed. Guanabara dois, 1.978. p.521-3
- 10 - LUCKI, G. Danos de radiação em materiais. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Ago-Nov. 1.982. (Apostila de curso de pós-graduação, CTN-719).
- 11 - VLACK, L.H.V. Physical ceramics for engineers. Reading, Mass. Addison-Wesley, 1.964.
- 12 - THOMPSON, M.M. Defects and radiation damage in metals. Cambridge, Mass., Cambridge University, 1.969.
- 13 - MONTEIRO, P.J.M. Concrete for radiation shielding. Califórnia, University of Califórnia, s.d. (Relatório interno) .
- 14 - HILSDORF, H.K.; KROPP, J.; KOCK, H.J. The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. In: CONCRETE and concrete structures, Douglas Mc Henry International Symposium. Detroit, American Concrete Institute, 1.978. p.223-51. (SP-55).
- 15 - LAMARSH, J.R. Introduction to nuclear engineering. Cap. 3. interaction of radiation with matter. Reading, Mass. Addison-Wesley, 1.975. p.42-87.

- 16 - MC DOWALL, D.C. The effect of gamma irradiation on the creep properties of concrete. In: BENZLER, H. comp. An information exchange meeting on results of concrete irradiation programmes: proceedings of..., held in Brussels, April 19, 1.971. Luxembourg, 1.972. p. 55-69. (EUR-4751).
- 17 - CLARK, R.G. - Radiation damage to concrete. Richland, Wa. , Hanford Atomic Products, March, 1.958. (HW-56195).
- 18 - CRISPINO, E.; PIZZOTTI, C.; GASPARINI, R.; GUALTIERI, G. ; MONTAGNINI, A.; ROSI, F. Irradiation effects on reactor structural materials. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the 4th international conference on..., held in Geneva, 6 - 16 September, 1.971. 1.972 v.10, p. 563-78.
- 19 - GRAY, B.S. The effects of reactor radiation on cements and concrete. In: BENZLER, H. Comp. An information exchange meeting on results of concrete irradiation programmes : proceedings of..., held in Brussels, April 19, 1.971. Luxembourg, 1972, p. 17-39. (EUR - 4751)
- 20 - PEDERSEN, A. Radiation damage in concrete measurements on miniature specimens of cement mortar. In: BENZLER, H. comp. An information exchange meeting on results on concrete irradiation programmes, proceedings of ..., held in Brussels, April 19, 1.971. Luxembourg 1.972. p. 5-16. (EUR-4751).
- 21 - MACMASTER, R.C. Nondestructive testing handbook. New York, Ronald 1.959. v.2 Sec.50,51
- 22 - LEA, F.M. The chemistry of cement and concrete. 3ed. London Edward Arnold, 1.970.

- 23 - NEVILLE, A.M. Properties of concrete. 2ed. London, Pitman, 1.973.
- 24 - PETRUCCI, E. Materiais de construção. Porto Alegre, Globo, 1.979. Cap. 3, p. 330-44. (Manual do Engenheiro, 4).
- 25 - CZERNIN, W. Cement chemistry and physics for civil engineers. New York, Chemical Publishing, 1.962.
- 26 - KINGERY, W.D. Introduction to ceramics. 3ed. New York, Wiley, 1.965.
- 27 - GABARRA, M.H.C. Aplicações técnicas ultra-sônicas no estudo de efeitos de irradiação em cimento Portland comum de fabricação nacional. São Paulo, 1.983. (Dissertação de Mestrado, IPEN-CNEN/SP).
- 28 - LEITE, P.G.P. Ensaaios não destrutivos. 9ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1.979.
- 29 - WHITEHURST, E.A. Evaluation of concrete properties from sonic tests. Iowa, the Iowa State University, 1.966.
- 30 - ULTRASONIC flaw detector. Low frequency instrument. USIP 10 w/nf. Luxemburger, Germany, Krautkramer, s.d. (Operating instructions).
- 31 - LONG ; KURTZ ; SANDENAW. A CI Journal, Proceedings. V.41, nº 03, Jan. 1.945, pp. 217-32.
- 32 - JONES, R. Non destructive testing of concrete. Cambridge Mass., Cambridge University, 1.962.
- 33 - ENSAIOS de cimento Portland. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: Materiais para concreto e concreto armado, especificações e métodos de ensaios. s.d. p. 37-50 (ABNT-MB-1/79).



- 34 - TROXELL, G.E. & DAMIS, H.E. Introdução a execução e ensaio do concreto simples. Porto Alegre, Globo, 1.977. Cap. 5, p.533-620. (Manual do Engenheiro, 2).
- 35 - WHITEHURST, E.A.; MALHOTRA, V.M. Nondestructive tests . In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Significance of tests and properties of concrete making materials. 1.978. Cap. 15, p.200-25. (ASTM-STP-169B).