

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

WALTER CAIAFFA HEHL

*Orientador: Paulo Sarriva de Toledo*

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ULTRA-SÔNICAS NO ESTUDO DA INFLUÊNCIA  
DA TEMPERATURA SOBRE AS CONSTANTES ELÁSTICAS DO CIMENTO E  
CONCRETO UTILIZADOS EM VASOS DE PRESSÃO DE REATORES NUCLEARES

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS 1970 SÃO PAULO BRASIL

11979

**A meus pais**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço:

ao Professor Doutor Paulo Saraiva de Toledo, Chefe da Divisão de Física de Reatores do Instituto de Energia Atômica, pelo incentivo, apoio e orientação constante, deste trabalho;

ao Instituto de Energia Atômica, na pessoa de seu Diretor, Professor Doutor Rômulo Ribeiro Pieroni, pelas facilidades oferecidas durante o tempo de trabalho neste Instituto;

aos integrantes do Controle Tecnológico de Concreto L. A. Falcão Bauer, / principalmente à Engenheira Maria Noronha, pela cooperação recebida nos estudos feitos neste laboratório;

à Senhorita Terezinha Caires, Secretária da Divisão de Física de Reatores pelo trabalho de datilografia, cuja complexidade foi aumentada pela necessidade do emprêgo de duas esferas;

à Senhora Terezinha de O. da Silveira Santos, Secretária da Diretoria do Instituto de Energia Atômica, pela valiosa colaboração na impressão deste trabalho;

aos integrantes da Oficina Gráfica do Instituto de Energia Atômica pela impressão e montagem desta dissertação;

aos meus colegas de trabalho que, direta ou indiretamente, me auxiliaram.

## ÍNDICE

	Página
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b>	
I.1 - Objetivo do trabalho. . . . .	1
<b>CAPÍTULO II - CONCRETO PARA VASOS DE PRESSÃO DE READORES</b>	
II.1 - Concreto protendido. . . . .	4
II.2 - Emprêgo do concreto protendido . . . . .	6
II.3 - Sistema de isolamento térmico para concreto em vasos de pressão . . . . .	8
<b>CAPÍTULO III - ESTRÚTURA DO CONCRETO</b>	
III.1 - Generalidades . . . . .	11
III.2 - Resistência mecânica do gel cimento . . . . .	13
III.3 - Água prêsa na pasta de cimento hidratado. . . . .	14
III.4 - Comportamento do cimento ao calor . . . . .	15
III.4.1 - Ensaio em laboratório. . . . .	16
III.4.1.A - Tratamento térmico. . . . .	16
III.4.1.B - Ensaio físico . . . . .	16
III.4.1.C - Retração após tratamento térmico. . . . .	17
III.4.1.D - Desidratação. . . . .	19
<b>CAPÍTULO IV - ENSAIOS PELO MÉTODO DO ULTRA-SOM NO CONCRETO</b>	
IV.1.1 - Considerações gerais . . . . .	25
IV.1.2 - Revisão histórica. . . . .	29
IV.1.3 - Introdução às técnicas de ensaios ultra-sôni- cos para determinação de constantes elásticas . . . . .	32
IV.2 - Método da ressonância. . . . .	34
IV.2.1 - Método da ressonância longitudinal . . . . .	35
IV.2.2 - Método da ressonância transversal. . . . .	38
IV.2.3 - Método da ressonância a torção . . . . .	42
IV.3 - Identificação da ressonância . . . . .	43

IV.4 - Medida do coeficiente de atenuação. . . . .	44
IV.5 - Medida do coeficiente de Poisson. . . . .	45
IV.6 - Ensaio de concreto para método de ressonância	46
IV.6.1 - Reprodutibilidade dos resultados. . . . .	46
IV.6.2 - Efeito do tamanho do corpo de prova . . . .	47
IV.6.3 - Efeito da idade e condições de cura . . . .	48
IV.6.4 - Efeito da composição. . . . .	50
IV.6.5 - Relações com o módulo dinâmico. . . . .	51
IV.7 - Técnica de pulso . . . . .	53
IV.7.1 - Técnicas de produção de pulso . . . . .	53
IV.7.2 - Reflexão e transmissão de pulsos. . . . .	55
IV.7.3 - Efeitos da propagação do pulso. . . . .	57
IV.7.4 - Aplicação da técnica de pulso para ensaios do concreto. . . . .	58
IV.7.5 - Relações entre a velocidade de onda longitu dinal e algumas propriedades do concreto. .	59
CAPÍTULO V	
CONCLUSÕES. . . . .	67
UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS NOS EFEITOS DE TEMPERATURA NO CIMENTO E CONCRETO. . . . .	68
APÊNDICE 1 . . . . .	70
APÊNDICE 2. . . . .	71
APÊNDICE 3. . . . .	72
APÊNDICE 4. . . . .	73
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA E CITADA. . . . .	74
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA . . . . .	75

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### I.1 - OBJETIVO DO TRABALHO

Com a necessidade da construção de uma central nuclear no Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e as Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRÁS) assinaram um convênio para a realização deste projeto, onde a construção e operação estão a cargo das Centrais Elétricas de Furnas enquanto que à CNEN compete, além do fornecimento dos elementos / combustíveis, todas as atividades relacionadas com a análise da segurança da central nuclear. Esta central fornecerá energia para a região centro-sul e terá uma potência de 500 Mwe.

Dos tipos de centrais existentes, em operação comercial, foram eliminados vários tipos e como soluções, foram admitidos à concorrência internacional, as centrais com reatores nucleares dos tipos PWR, BWR e SGHWR. Qualquer destes tipos de reatores, admite um vaso de pressão construído em concreto protendido, visto que este processo preenche as finalidades / de um vaso de reator, isto é, tem boa resistência à pressão; o concreto funciona também como uma proteção biológica e apresenta ainda vantagens como: a) não estar restrito às dimensões de chapas de aço encontradas no mercado; b) não apresentar problemas de soldagem das chapas; c) e, principalmente, o vaso poder ser construído no próprio local, evitando assim o transporte que é muito difícil, visto as grandes dimensões e pesos das unidades se construídas na fábrica.

Na Divisão de Física de Reatores (DFR) do Instituto de Energia Atômica / (IEA), pretende-se desenvolver um programa amplo de estudo da influência

de temperatura, gradientes de temperatura, radiações nucleares sôbre as propriedades de materiais metálicos ou não, de importância para componentes e estruturas de centrais nucleares.

Numa primeira fase do programa de pesquisa, será dada ênfase especial aos efeitos de temperatura e gradientes de temperatura nas propriedades do / cimento e concreto armado e protendido.

Ao lado dos ensaios destrutivos clássicos, serão considerados, em particular, os que utilizam as técnicas associadas aos ensaios não destrutivos e, entre estas, serão especialmente consideradas as do denominado método de ultra-som.

A implantação definitiva de um projeto de pesquisas desta envergadura, necessita um estudo detalhado da literatura existente sôbre o assunto, estudo êste que constitui o objetivo desta dissertação.

A necessidade dêste estudo detalhado se apresentou quando se verificou / que as condições de trabalho dos vasos de pressão de reatores nucleares, em concreto protendido, existentes ou em construção, eram severamente limitadas, em especial no que dizia respeito à temperatura máxima de trabalho do concreto, surpreendentemente baixa. Como, na literatura disponível, nada foi encontrado que justificasse claramente tal limitação, foi realizado um estudo razoavelmente completo das propriedades do cimento e concreto, quer do ponto de vista do mecanismo de endurecimento e de resistência a esforços mecânicos, quer do ponto de vista da variação de suas propriedades com a temperatura.

Correlacionando os resultados de experiências recentes - e apresentadas / no capítulo III - aventou - se uma explicação para aquela limitação severa da temperatura do concreto protendido de vasos de pressão de reatores.

Tratando-se de uma hipótese, ela deverá ser provada experimentalmente, através de uma série prolongada de ensaios quer destrutivos, clássicos, /

quer não destrutivos.

Deixando de lado a apresentação dos ensaios destrutivos, clássicos, será apresentado no capítulo IV os métodos de ensaios não destrutivos ultra-sônicos. E, no capítulo V, conclue-se pela necessidade de serem utilizados ambos para os ensaios que estão sendo programados para serem executados no desenvolvimento do projeto completo, com duração certamente superior a um ano. Finalmente, ainda neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Espera-se que desta dissertação, voltada para a apresentação dos efeitos da temperatura sobre as propriedades do cimento e concreto e para a dos métodos ultra-sônicos em ensaios ultra-sônicos aplicados à determinação/das constantes elásticas destes materiais, possa contribuir: a) para o planejamento das experiências a serem realizadas; b) para a interpretação dos resultados a serem obtidos futuramente; c) para a compreensão / das especificações que a CNEN deverá analisar e aprovar, sob o ponto de vista essencial da segurança, de centrais nucleares onde sejam utilizados vasos de pressão de concreto protendido.



## CAPÍTULO II

### CONCRETO PARA VASOS DE PRESSÃO DE REATORES

#### II.1 - CONCRETO PROTENDIDO

É a denominação técnica de uma estrutura de concreto, onde o "refôrço" / usado para que o concreto trabalhe à tração é feito por cabos de aço sob tensão.

O concreto tem grande resistência à compressão (por volta de  $300 \text{ kgf/cm}^2$ ), porém sua resistência à tração é bastante pequena ( $20 \text{ kgf/cm}^2$ ), praticamente desprezível. Utiliza-se, no concreto armado comum, uma armadura / que reaje aos esforços de tração aos quais a estrutura está submetida. Neste caso, a armadura de ferro é feita com barras racionalmente dispostas, que dá à estrutura uma resistência à tração adicional, resistência / esta dada pelo ferro. Esta ferragem é disposta no setor onde a estrutura trabalha à tração (FIG. II.1.1), pois uma viga apoiada em dois pontos / (A e B), está sujeita à compressão na parte superior e à tração na parte inferior.

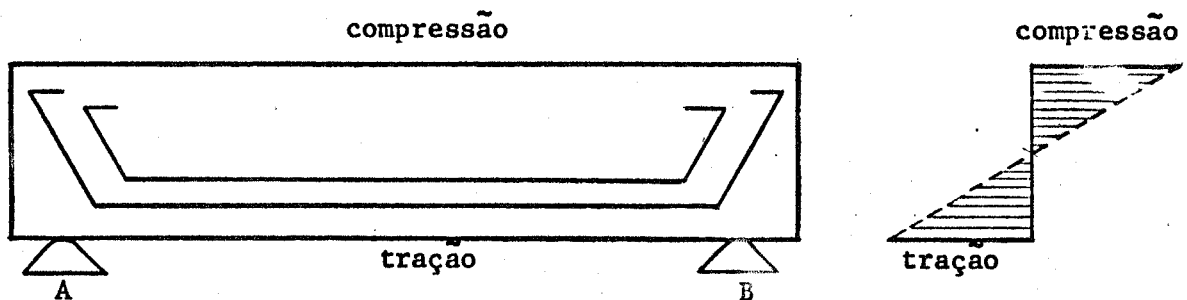


FIGURA II.1.1 - Posição esquemática das ferragens em uma viga de concreto armado e diagrama de tensões.

Com o aparecimento do sistema de protensão para estruturas de concreto, elas não sã ganharam em rendimento e simplicidade, como também em elegância. A protensão é feita, dando-se a cabos de aço, colocado no interior da peça ou da estrutura, uma tensão adicional, que equilibra a solicitação à tração. Este cabo é colocado numa camisa de aço fundida / junto com o concreto (FIG. II.1.2).

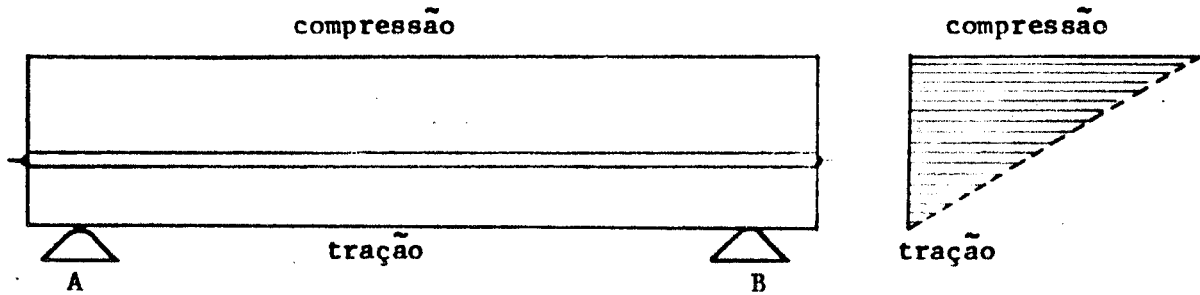


FIGURA II.1.2 - Colocação esquemática de um cabo de protensão, e diagrama de tensões com protensão.

O concreto tem um comportamento, quando solicitado à compressão, de acordo com o gráfico II.1.1.a,

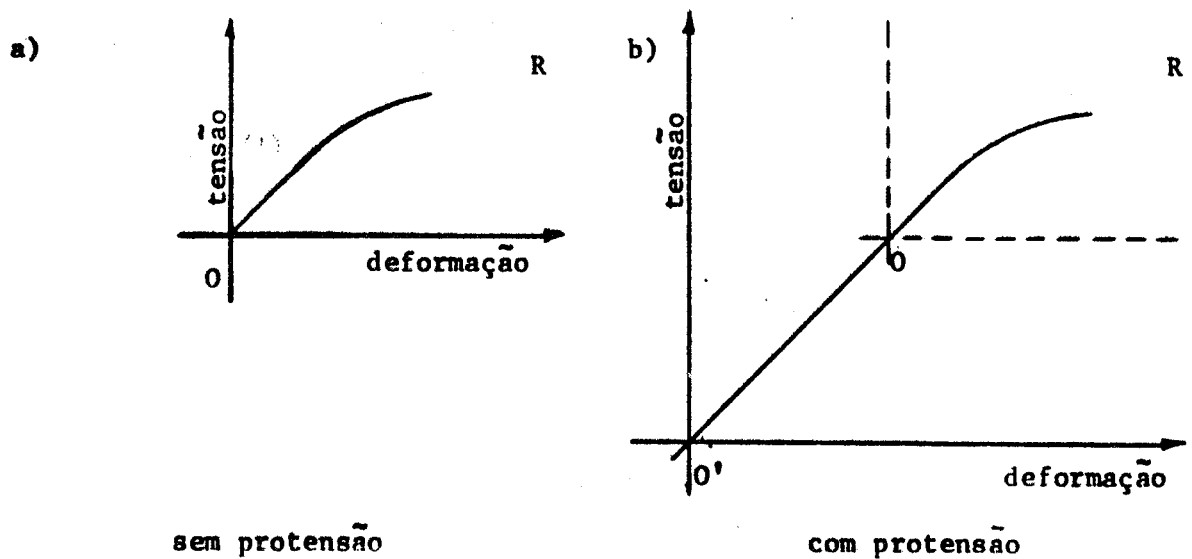


GRÁFICO II.1.1 - Curvas tensão-deformação do concreto: a) sem protensão e b) com protensão.

Dando-se ao concreto uma solicitação inicial de compressão, isto é, uma protensão, êle adquire uma tensão, e logo uma deformação, que chamamos / de tensão de protensão e é praticamente uma tensão negativa. Isto se vê no (GRÁFICO II.1.1.b); o ponto 0' é deslocado segundo a reta da deformação elástica.

Resumindo, então, o concreto é posto sob uma solicitação de compressão, à qual êle tem grande resistência, o que equilibrará a solicitação de tração a que êle será submetido quando a estrutura estiver submetida às cargas externas. Isto faz com que estruturas de concreto protendido trabalhem sempre no regime elástico.

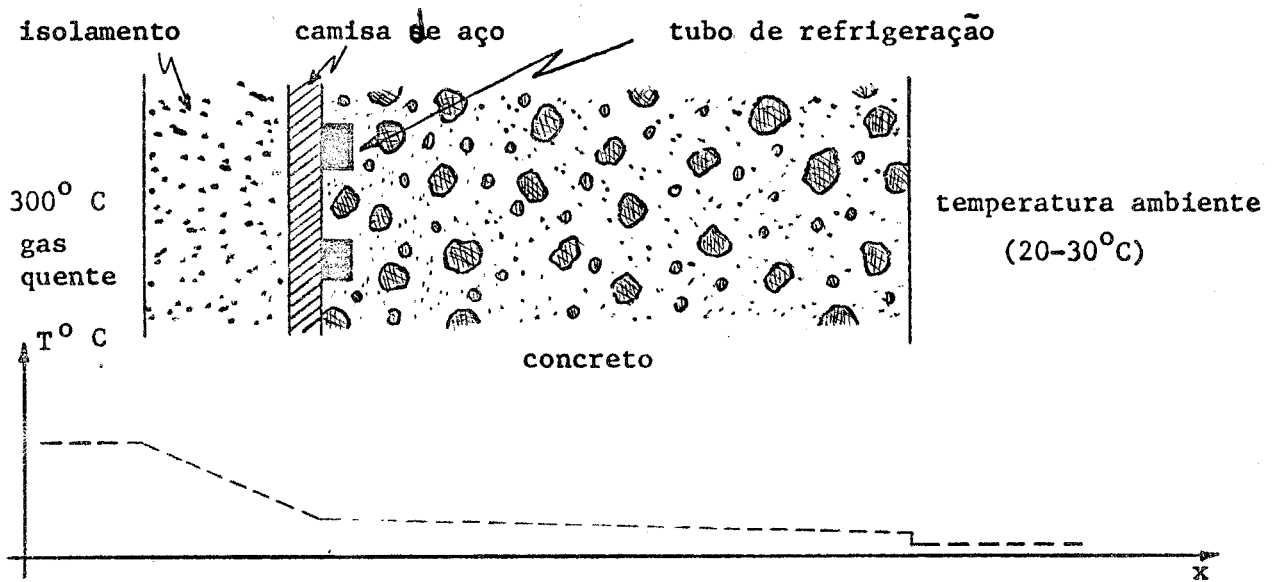
Empregando-se o concreto protendido para a construção de vasos de pressão, essa estrutura, devido à pressão interna do fluido existente no interior do vaso, trabalhará na face externa à tração e, portanto, os cabos de protensão devem ser colocados mais externamente possível dentro / da parede do vaso. Esta colocação também auxilia a proteção dos cabos de aço contra bombardeamento de neutrons.

## II.2 - EMPREGO DO CONCRETO PROTENDIDO

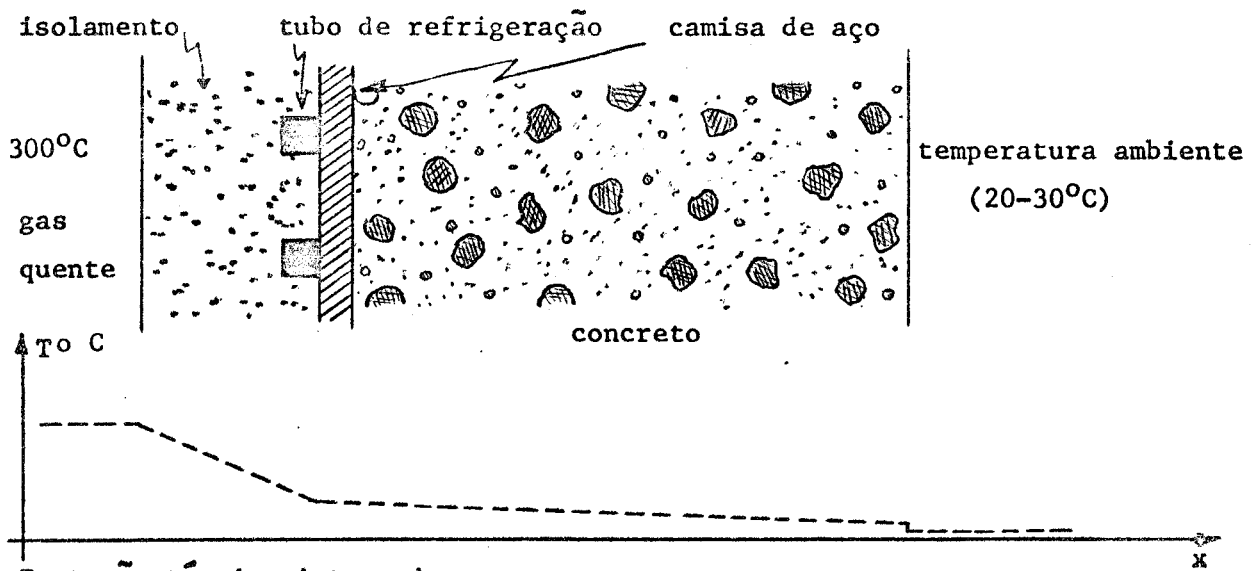
O estudo da influência da temperatura e de gradiente de temperatura no / cimento e concreto, se faz necessário, tendo em vista o emprego deste material em vasos de pressão de reatores.

Êstes vasos de pressão, atualmente construídos em concreto protendido / não só funcionam como recipiente para o denominado caroço do reator, como também para o circuito primário, no caso de uma central mais compacta, / pois êste é colocado dentro do vaso de pressão. Isto solicita do concreto um comportamento adequado, sob um gradiente térmico, onde na face interna, antes do isolante há uma temperatura em torno de 300°C e na face externa a temperatura ambiente (20°-30°C). Por estudos anteriores, em / projetos para reatores a alta temperatura na Inglaterra, Alemanha, França e Estados Unidos, fixou-se uma temperatura máxima, a qual o concreto

pode trabalhar, que é da ordem de  $100^{\circ}\text{C}$  (FIG. II.2.1),



Proteção convencional contra aquecimento do concreto.



Proteção térmica integrada

FIGURA II.2.1 - Isolamento térmico do concreto protendido em vasos de pressão de reatores [9].

Um sistema de refrigeração para manter a temperatura do concreto abaixo de 100°C, faz-se necessário. Este sistema de refrigeração, não só encarece bastante o custo do vaso de pressão, como também dá maior complexidade ao sistema de segurança. De fato, uma falha em tal sistema elevaria a temperatura na estrutura de concreto protendido, ultrapassando-se aquele limite de 100°C, se o reator continuasse funcionando.

É importante que a temperatura máxima, a qual o concreto possa trabalhar, seja aumentada. Isto só poderá ser feito após análise experimental, por meio de ensaios, quer destrutivos ou não do comportamento das estruturas consideradas quando submetidas às condições reais de tensões e temperaturas.

Conforme já adiantamos no capítulo anterior, a limitação de 100°C na temperatura de trabalho dos vasos de pressão atuais é surpreendentemente / baixa. Se, através dos resultados de ensaios em corpos de prova, e, posteriormente, em modelos de estruturas, fôr possível se justificar um aumento desta temperatura máxima, os ganhos serão vários, decorrente, essencialmente, da simplificação e conseqüente barateamento dos sistemas / de refrigeração e de isolamento térmico. Mesmo se mantida aquela temperatura máxima, a certeza de a estrutura poder trabalhar, com segurança, / em temperatura mais elevada, levaria a um sistema de proteção contra falha no sistema de resfriamento mais simples, mantido o mesmo grau de segurança do reator com um menor dispêndio. Para a implantação de centrais nucleares no Brasil, tais ganhos seriam importantes pois, mesmo que as primeiras centrais não utilizem vasos de concreto protendido, é quase / certo que o façam as demais, a serem instaladas em progressão crescente / principalmente a partir de 1980.

### II.3 - SISTEMA DE ISOLAMENTO TÉRMICO PARA CONCRETO EM VASOS DE PRESSÃO

Atualmente, para vasos de pressão de reatores, a temperatura máxima de trabalho do concreto é 100°C e isolamentos são necessários para se manter o concreto abaixo desta temperatura.

Dos métodos mais usados tem-se (FIG. II.3.1).

1 - Cimento com "PUMICE STONE", que é uma pedra vulcânica (Pedra Pomes), com textura vacuolar; tem pouca condutividade térmica, devido aos vazios, porém é de difícil aplicação no vaso e bastante frágil.

2 - Fôlhas de metal ondulado também são usadas para isolamento térmico .

Os espaços que se formam entre as diversas camadas de fôlhas, barram a condução de calor, diminuindo a temperatura máxima do concreto. Essas fôlhas apresentam como desvantagens: a) o revestimento em superfícies / côncavas e b) na eventualidade de se produzir fissuras sucessivas nas fôlhas metálicas, o caráter isolante do conjunto seria severamente diminuído, com o conseqüente aumento da temperatura no concreto.

3 - Outro sistema usado, é o isolamento feito com lã de vidro e placas / de metal, formando um sanduiche. Sua principal desvantagem é o preço elevado.

4 - O sistema mais usado no isolamento de vasos de pressão, são as chamadas paredes de água ou gás. Sobre as paredes de concreto ordinário / (normal), é colocado um revestimento de concreto resistente a altas temperaturas e entre êsses dois concretos, existem tubulações onde corre / água refrigerante ou gás. O concreto especial, encarece muito o custo de um vaso de pressão, é usado um concreto pesado.

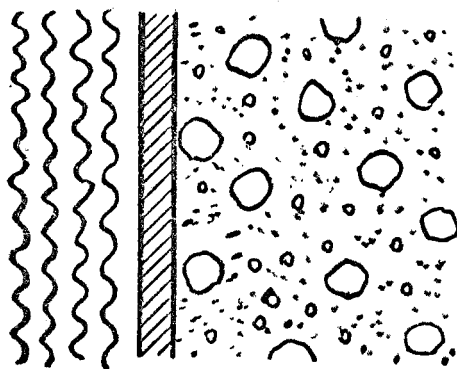


FIGURA II.3.1 - a) Fôlhas de metal ondulado como isolamento.

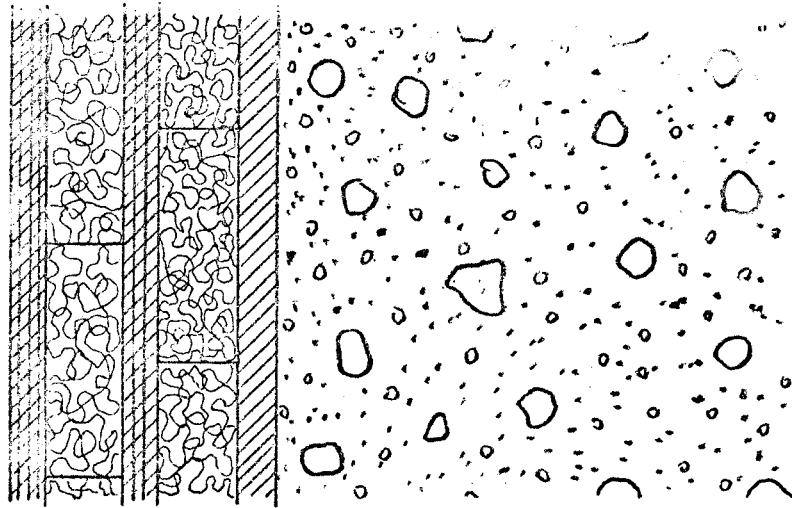


FIGURA II.3.1 - b) Sanduiche de lâ de vidro e placa de metal usado como isolamento.

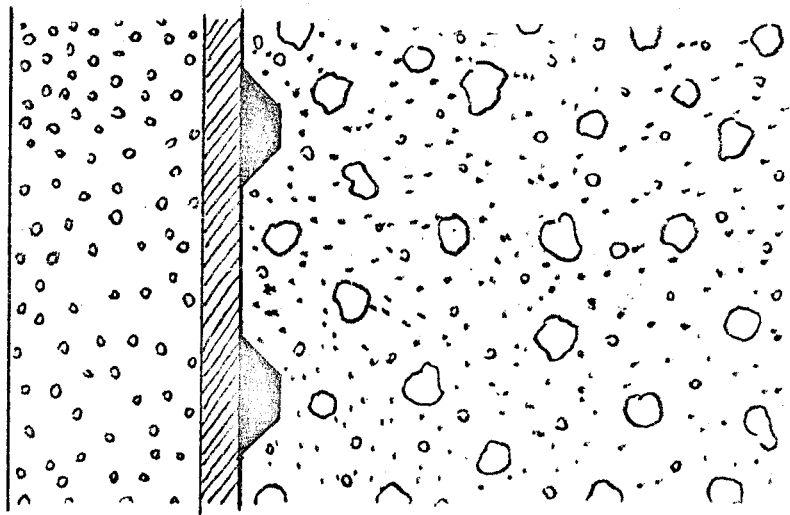


FIGURA II.3.1 - c) Paredes de gás (ou água) usadas como isolamento, junto com concreto pesado.

## CAPÍTULO III

### ESTRUTURA DO CONCRETO

#### III.1 - GENERALIDADES

Denomina-se concreto hidráulico ao material de construção derivado da / mistura de aglomerante, materiais inertes e água. Quando recém misturado, deve apresentar condições de plasticidade, que facilitem seu emprêgo e o perações de manuseio, necessários ao lançamento nas fôrmas e, com o tempo, adquira, por reações químicas entre o aglomerante e a água, coesão e resistência.

Como aglomerante, usa-se o cimento, que é material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, porém, praticamente sem cal livre. Estes silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com a água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que então oferece elevada resistência mecânica, especialmente à compressão.

Como material inerte, ou agregado, usam-se normalmente pedras britadas, / cascalho de rios e as areias em geral. As pedras e cascalhos são denominados agregados graúdos e as areias, agregados miudos.

Outros constituintes ou aditivos, podem ser misturados no concreto, destinados a melhorar ou dar propriedades especiais ao conjunto, tais como impermeabilidade da massa, diminuição do calor de hidratação, aumento da durabilidade, maior plasticidade quando fresco, rápido aumento da resistência quando endurecido.

Ao conjunto de cimento mais água, denomina-se pasta que, com a adição do agregado miudo, transforma-se em argamassa; finalmente, o concreto é-ob-



tido com a adição do agregado graúdo à argamassa.

A pasta tem a função de envolver os agregados enchendo os vazios formados entre as pedras e dar ao concreto possibilidade de manuseio quando / recém misturado. Também aglutina os agregados no concreto endurecido, dando um conjunto com certa impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos e durabilidade ante aos agentes agressivos.

A função do agregado é contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, ao desgaste, reduzir a variação de volume e o custo.

Fatores tais como a seleção cuidadosa dos materiais (tipo, qualidade e uniformidade), proporção correta do cimento em relação à água e agregados, manipulação adequada da mistura, e a cura cuidadosa, influem na qualidade do concreto.

Entende-se por cura do concreto, o tempo necessário para que adquira suas propriedades finais quando endurecido. A cura pode ser feita na água ou no ar; sendo que, a cura na água, é a mais usada, e também dá ao concreto melhor qualidade nas propriedades.

Muitas das propriedades mecânicas do cimento endurecido e concreto, aparentam depender não tanto da composição química do cimento hidratado como da estrutura física dos produtos de hidratação, existente no nível / das dimensões coloidais /1/.

Por esta razão é importante se ter um bom conhecimento das propriedades / do cimento gel (cement gel).

A pasta fresca de cimento é um arranjo plástico de partículas de cimento na água; porém uma vez que a pasta tenha fixado seu volume, permanece / praticamente constante. Em qualquer estágio de hidratação a pasta endurecida consiste de hidratos de vários componentes, chamados geralmente /

de gel; cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ , outros componentes, cimento não hidratado e um resíduo de água preenchendo os espaços na pasta. Estes vazios são / chamados poros capilares, mas entre o gel mesmo existe vazios intersticiais, chamados poros do gel. Há portanto duas classes distintas de poros, (porosidade - espaço ocupado pela água evaporável) /10/.

Como os produtos de hidratação são coloidais, durante a hidratação, a área da superfície aumenta muito e uma grande quantidade de água livre é adsorvida nesta superfície. Não se permitindo nenhum movimento de água, entrando ou saindo, na pasta de cimento, as reações de hidratação usam a água adicionada e portanto somente uma pequena quantidade dela sobra para a saturação da superfície do sólido. Assim a umidade relativa na pasta decresce. Isto é conhecido como auto dissecação (self desiccation). Desde que o gel somente pode se formar no espaço preenchido com água, a auto dissecação produz uma baixa hidratação comparada com a pasta curada na água. Contudo na pasta auto dissecada com relação água-cimento, em peso (A/C), maior que 0,5 a quantidade de água adicionada é suficiente / para que a hidratação se processe no mesmo ritmo quando há cura na água.

### III.2 - RESISTÊNCIA MECÂNICA DO GEL CIMENTO

Há duas teorias clássicas para explicar o endurecimento ou ganho de resistência do cimento. Uma por H. Le Chatelier em 1882, considera que os produtos de hidratação do cimento têm solubilidade mais baixa que os componentes originais, que são os precipitados hidratados da solução super saturada. O precipitado é uma forma de cristais alongados entrelaçados / com altas propriedades de adesão e coesão.

A teoria coloidal proposta por W. Michaëlis em 1893, diz que o aluminato cristalino e o hidróxido de cálcio, dão a resistência inicial. A água de saturação, que reage com os silicatos e forma um silicato hidratado de cálcio, quase insolúvel, forma u'a massa gelatinosa. Esta massa endurece gradualmente com a perda da água /1/.

O termo gel cimento é considerado, por conveniência, incluindo hidróxido de cálcio cristalino. Gel, então significa a massa coesiva de cimento hidratado nesta pasta densificada, incluindo-se os "poros gel", sendo a porosidade ao redor de 28%.

Pensa-se atualmente que duas principais fontes de coesão são responsáveis pela retenção da água, a primeira, é do tipo de atração física entre as superfícies sólidas separadas entre si, pelos "poros gel" (15-20 Å), esta atração é comumente conhecida como a força de Van der Waals.

A segunda fonte do tipo de coesão, são as ligações químicas. Desde que o cimento gel é o limite do tipo "swelling", isto é, as partículas não se dispersam por adição de água, parece que as partículas estão atraídas por forças químicas. Esta força é mais forte que a de Van der Waals, porém esta ligação química cobre somente uma pequena fração da fronteira das partículas gel.

Não se pode estimar a importância relativa das ligações químicas e físicas, porém não se tem dúvida que ambas contribuem para o endurecimento da pasta, /1/.

### III.3 - ÁGUA PRESA NA PASTA DE CIMENTO HIDRATADO

A pasta de cimento é higroscópica, ganhando características hidrófilas com a presença de poros microscópicos. A água retida no cimento depende da umidade do ambiente. Especialmente em poros capilares, devido ao seu tamanho particularmente pequeno, a adsorção de água se dá mesmo em ambiente com umidade abaixo de 45%.

A água retida na pasta de cimento, tem vários graus de retenção; tem-se desde água livre, até a água combinada quimicamente, formando uma parte de componentes hidratados. Entre estas duas, existe a água gel retida em uma imensa variedade de modos: a) a água retida pelas partículas gel, é chamada água de adsorção; b) a água retida entre as superfícies de cer-

tos planos cristalinos é chamada água zeolítica; c) a água do reticulado é a água de cristalização que não está quimicamente associada com os componentes principais do reticulado.

A água livre ou evaporável é presa por capilaridade e está menos ligada/ que a água retida através de forças de ligação de origem física ou química. Tecnicamente não se tem meios de avaliar as quantidades relativas de água distribuídas desta maneira, porém uma divisão conveniente é se classificar em água evaporável e água não evaporável. Isto é conseguido pela secagem do cimento até se ter um equilíbrio (peso constante) a uma certa tensão de vapor. (Usualmente se usa  $8 \times 10^{-3}$  mm de Hg. Atualmente esta secagem é feita em câmara de vácuo, conectada com um filtro de umidade a /  $79^{\circ}\text{C}$ . Pode-se também secar a altas temperaturas em forno de  $105^{\circ}\text{C}$ ).

Estas águas geralmente têm uma tensão de vapor abaixo da pressão atmosférica e a maior parte delas é uma função da tensão do vapor da água no ambiente.

#### III.4 - COMPORTAMENTO DO CIMENTO AO CALOR

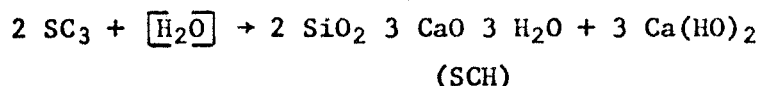
Cada vez mais se estuda o comportamento do cimento a temperaturas intermediárias geralmente inferiores a  $300^{\circ}\text{C}$  /2/.

A contribuição dos silicatos principalmente em um hidratado, é muito importante para a composição de um cimento. Dois silicatos são os mais ativos na composição do cimento: a) a alita ( $\text{SC}_3$ ) e b) a belita ( $\text{BSC}_2$ ) sendo que o silicato hidratado designado somente por (SCH), a alita é o / principal responsável pela coesão do produto obtido, /2/.

Os produtos da hidratação são amplamente estudados e se encontram uma documentação bem completa nos trabalhos de Brunauer e Coll /3/.

A estequiometria da hidratação da alita, depende de condições escolhidas,

mas em condições normais, é de acordo com a fórmula:



A natureza da água presente na fase (SCH) é ainda mal conhecida, porém / parece se dividir entre água adsorvida em equilíbrio com o ambiente (água evaporável ou livre) e uma água "estrutural" (ou não evaporável).

### III.4.1 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os ensaios e resultados que serão apresentados são bem recentes e foram / realizados por Lachaud /2/ e se referem exclusivamente ao comportamento / da alita.

#### III.4.1.A - TRATAMENTO TÉRMICO

Os ensaios foram realizados com cilindros tratados em um forno tubular, / sob corrente de Argônio com uma taxa de subida de temperatura de 150°C/h, seguida de uma estabilização durante 24 horas, para cada temperatura.

#### III.4.1.B - ENSAIO FÍSICO

Com o diâmetro bem definido dos cilindros (10 mm × 10 mm), permitiu-se seguir a evolução da coesão por ruptura de ensaio Brasileiro, à compressão, dos corpos de prova testados. É evidente que se encontrou uma certa dispersão nos resultados, dispersão esta indicada na tabela III.4.1 e gráfico III.4.1. ( Ensaio Brasileiro - Compressão diametral ).

Estes resultados, são suficientes para mostrar um domínio até 250°C onde as resistências são relativamente conservadas; além de 300°C ocorre a decomposição do Ca(OH)<sub>2</sub> e há uma perda de coesão importante. O aumento sen-

sível da dispersão acima de 100°C, é provavelmente indício de microfissuras.

É de se notar o caráter conservativo da coesão até 250°C; o sistema estudado compreende essencialmente duas fases: Ca(OH)<sub>2</sub> e a fase (SCH); nestas fases, o Ca(OH)<sub>2</sub> é caracterizado por um coeficiente de dilatação elevado, "C" (com ajuda do raio X, determina-se  $\frac{\Delta C}{C} \approx 7,5 \times 10^{-3}$  para 250°C), e para a fase (SCH), a saída da água é acompanhada de uma retração importante. A manutenção da coesão em tais condições, parece implicar num reajustamento das partículas (SCH) permitindo a conservação das forças de ligação.

TRATAMENTO °C	20°C	110°C	200°C	250°C	300°C	400°C
kgf/cm <sup>2</sup>	63	58	40	63	29	23
	63	52	64	44	47	36
	61	43	58	56	27	32
MÉDIA	62	51	51	54	34	30

TABELA III.4.1 - Dados obtidos após o tratamento térmico nos corpos de prova.

#### III.4.1.C - RETRAÇÃO APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO

A retração da alita pôde ser seguida por uma série de medidas antes e após o tratamento. A média dos resultados de três corpos de prova, é a dada pela tabela III.4.2.

Estes resultados estão representados no gráfico III.4.2. A retração registrada não corresponde somente ao comportamento da fase (SCH), mas a uma composição da dilatação do Ca(OH)<sub>2</sub> e da retração própria da fase dos silicatos.

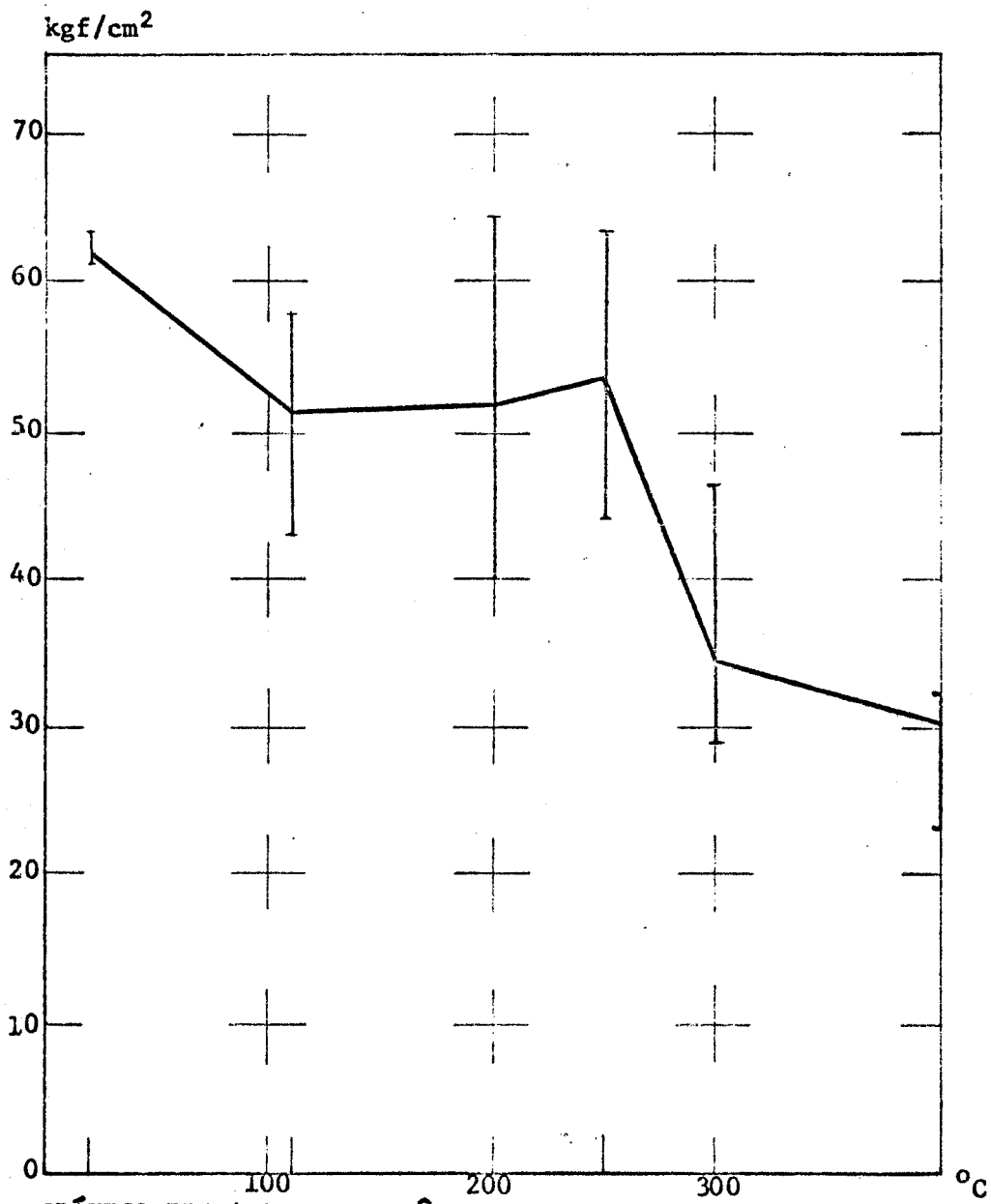


GRÁFICO III.4.1 - Resistências - ensaio Brasileiro.

TEMPERATURA	$\frac{\Delta R}{R}$
20°C	$2 \times 10^{-3}$
110°C	$8 \times 10^{-3}$
200°C	$12 \times 10^{-3}$
250°C	$14 \times 10^{-3}$
300°C	$17 \times 10^{-3}$
400°C	$32 \times 10^{-3}$

Secagem a Argônio a 20°C

TABELA III.4.2 - Retração após o tratamento

#### III.4.1.D - DESIDRATAÇÃO

Na tabela III.4.3 estão indicadas as perdas relativas de água de corpos / de prova de alita, secos sob Argônio a 20°C, perdas estas que, repetindo, / são devidas em quase sua totalidade à fase (SCH), /2/.

T°C	20	90	110	150	200	250	300	350	400	500
$\frac{\Delta P}{P}$	0,000	0,118	0,129	0,133	0,144	0,149	0,161	0,176	0,229	0,237

TABELA III.4.3 - Perdas relativas de água em corpos de prova de alita secos sob Argônio a 20°C.

O gráfico III.4.3, corresponde à curva desta tabela, e se nota bem a saída rápida da água pouco ligada (da fase (SCH)), uma região de inclinação mínima perto de 250°C e posteriormente a perda resultante da decomposição de  $\text{Ca(OH)}_2$ .



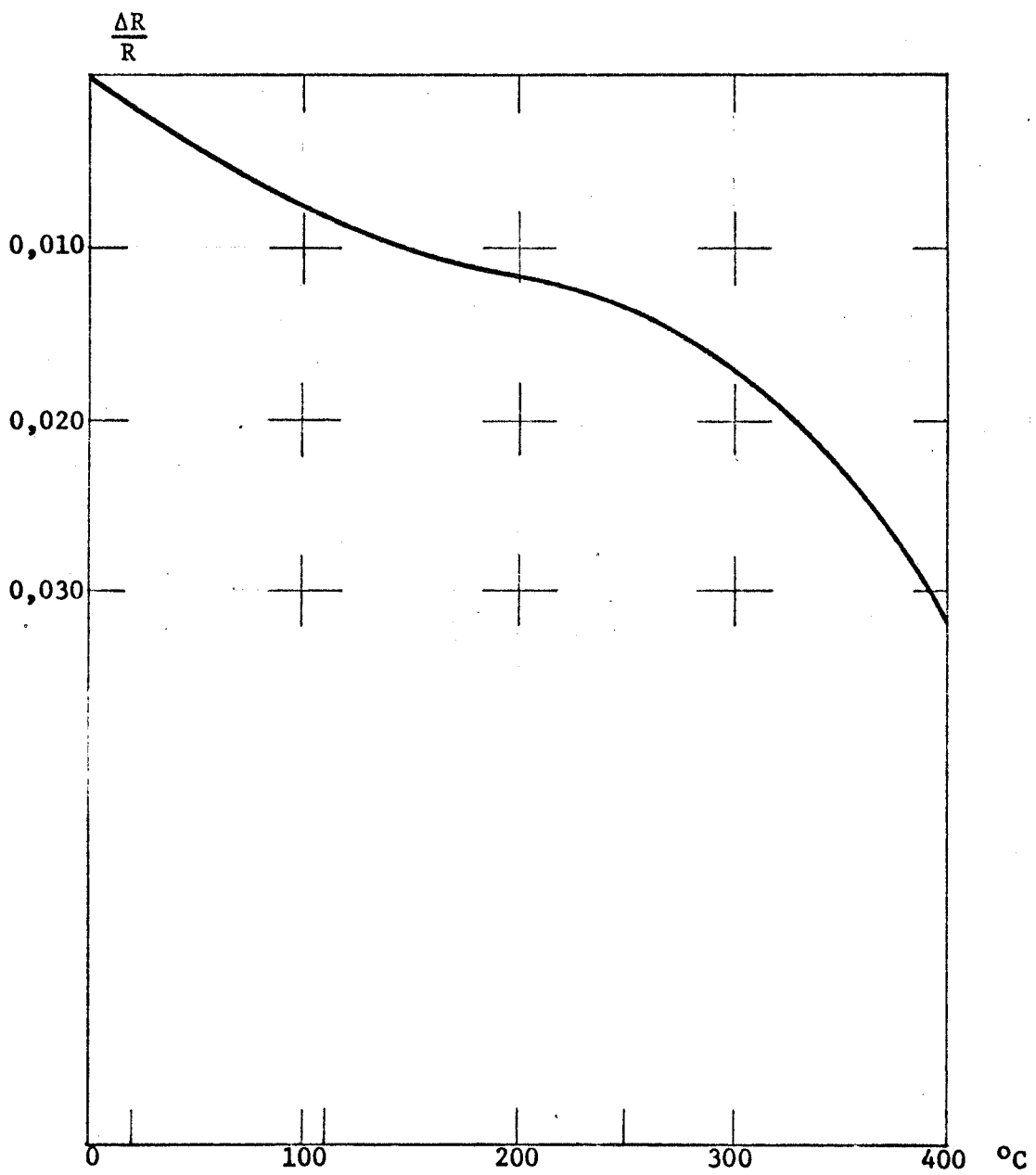


GRÁFICO III.4.2 - Retração após o tratamento

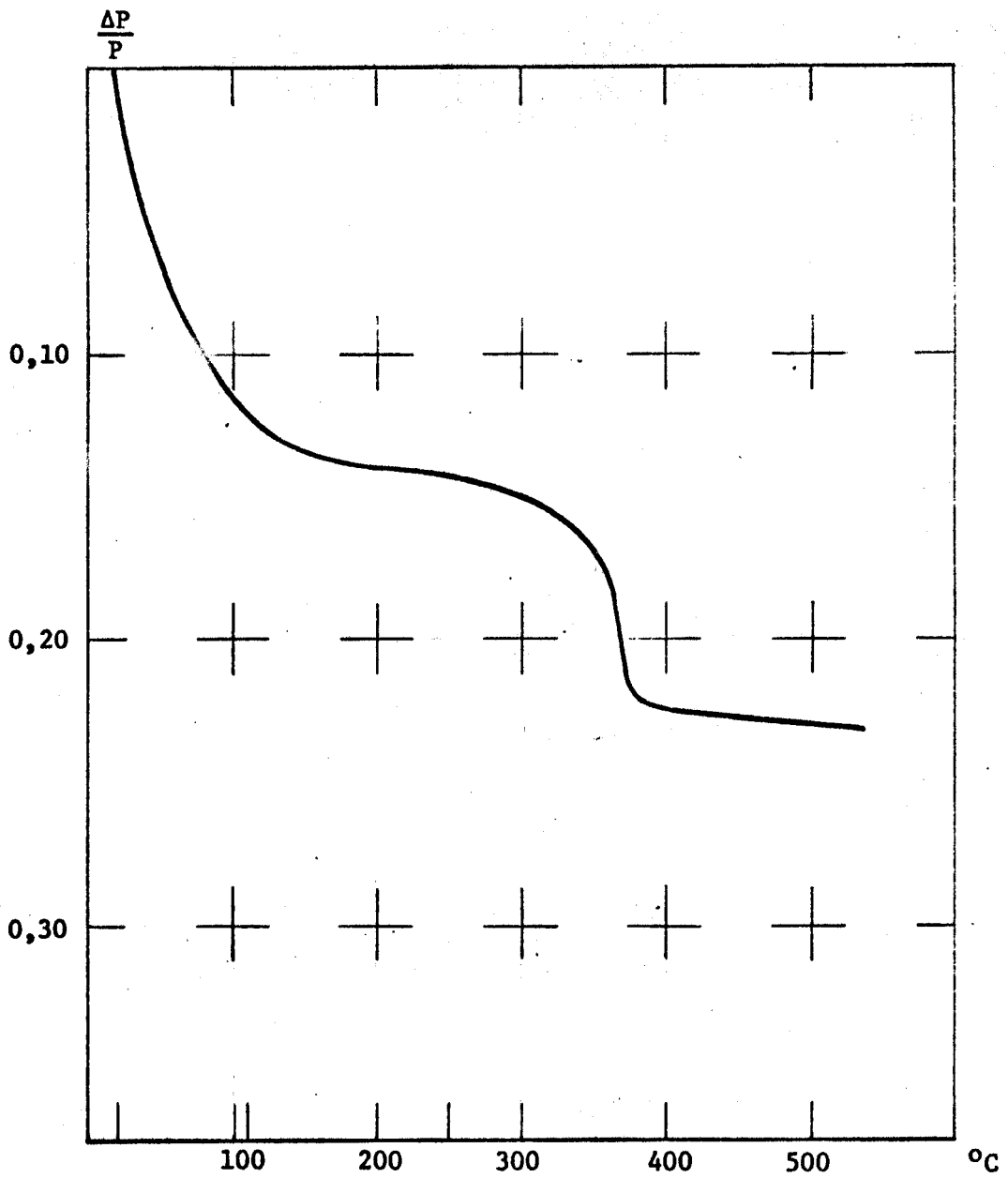


GRÁFICO III.4.3 - Desidratação da alita sob Argônio a 20°C.

Conclue-se daí que a fase (SCH) é susceptível de perder a maior parte da água até 250°C, com retração, sem perder a coesão.

Pode-se concluir dêste tratamento em pequenos cilindros de 10 mm x 10 mm o comportamento de uma alita monoclínica hidratada, fase (SCH). As resistências mecânicas se conservam bem até 250°C e somente começam a cair / sensivelmente a partir da decomposição do hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ .

A fase (SCH), a principal responsável pela coesão do cimento, é susceptível de perder a maior parte de sua água até 250°C e conservar suas propriedades mecânicas essenciais.

Este conjunto de resultados mostra que tanto do ponto de vista tecnológico, como do ponto de vista de constituição, a temperatura de 250°C pode ser considerada como crítica no comportamento do cimento. Como há também uma retração importante e crescente com a temperatura da alita, conclue-se que, no cimento, tal retração deve existir. Segundo Lachaud /2/, no cimento a retração é menor mas ainda importante. Infelizmente dados sobre esta retração do cimento ou do concreto não foram encontrados na literatura consultada. Estes resultados, em especial os relativos à retração, nos levam a aventar a seguinte hipótese.

No concreto usual (armado) uma retração importante devido ao aumento da temperatura de trabalho, mesmo levando a uma microfissuração mas conservando a coesão ou resistência à ruptura, não é particularmente importante. Podem, é claro, aparecer tensões extras devido à retração, mas a presença da armadura de ferro possivelmente tenderá a absorvê-las, dentro / dos limites amplos que os fatores de segurança determinam.

No concreto protendido, especialmente em vasos de pressão de reator, a / retração que acompanha o aumento de temperatura levará a uma diminuição / da tensão de protensão, com uma eventual deformação importante do diagrama de tensões.

Considerando ainda a grande espessura das paredes dos vasos de pressão e o fato de os cabos de protensão estarem colocados próximos da face externa, efeitos ligados ao gradiente de temperatura podem ser importantes também.

De fato, a estrutura de concreto a ser protendida é uma peça massiva, fundida continuamente. A protensão é aplicada e após esta, o sistema é submetido a uma distribuição de temperatura determinada pelas temperaturas máximas na face mais interna e exterior.

Durante o processo de aquecimento, ocorrerão retrações variáveis que devem ser levadas em conta para que a protensão garanta sempre um trabalho à compressão do concreto.

Se a temperatura interna for elevada acima do limite usual de  $100^{\circ}\text{C}$ , é possível que a protensão, com o reator desligado - e pequeno gradiente de temperatura, portanto - atinja valores inaceitáveis nas zonas mais externas da estrutura.

Em resumo, parece que a retração importante, com o aumento da temperatura, seja um fator limitante no valor máximo da temperatura admitida na face mais quente do vaso de pressão em concreto protendido.

Admitida a validade desta hipótese, o estudo da retração especialmente em corpos de prova e em estruturas completas, em escala (modelos) de concreto protendido, será da maior importância.

Nos capítulos seguintes, será descrito com detalhes, as técnicas de determinação de constantes elásticas utilizados no método ultra-sônico, será mostrado como o uso conjugado daquelas técnicas poderá dar informações sobre a retração e também sobre a microfissuração, por meio da atenuação.

Deseja-se desde já adiantar que tais técnicas têm características que permitem, em princípio, estudar a dinâmica da variação das constantes e-

lásticas, da microfissuração e da retração; em particular, efeitos de / histeresis que, quase com certeza ocorrerão em corpos de prova e estruturas submetidas a processos cíclicos de aquecimento, podem ser também seguidos através de ensaios não destrutivos utilizando o método dos ultrassons.

## CAPÍTULO IV

### ENSAIOS PELO MÉTODO DO ULTRA-SOM NO CONCRETO

#### IV.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O propósito deste tópico é dar informações básicas no campo de ensaios / não destrutivos pelo método dos ultra-sons.

Um dos fatores mais importantes em ensaios não destrutivos, é a acuidade/ pessoal no sentido de ler e interpretar os resultados. Qualquer método de ensaio não destrutivo, é tão correto e digno de confiança quanto o operador que nele trabalha.

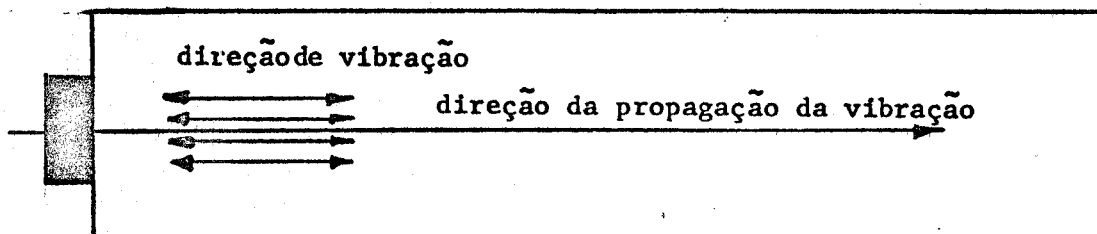
O termo ondas ultra-sônicas, ou vibrações ultra-sônicas é comumente usado para designar ondas com frequência acima do limiar da audição humana, localizado aproximadamente em 20 kHz.

Vibrações ultra-sônicas de baixa frequência, atuam exatamente como ondas/ audíveis. As altas frequências que comumente são usadas para ensaios não destrutivos, têm um comportamento que, parcialmente, se aproxima do comportamento das ondas luminosas.

As ondas ultra-sônicas, podem se propagar em qualquer material elástico . Esta propagação se dá como um deslocamento de sucessivos elementos no / meio. Num material elástico, há uma força restauradora que tende a devolver cada elemento a sua posição original, depois do deslocamento inicial. Devido à inércia do próprio meio, os deslocamentos continuam de um lado para o outro, porém sempre diminuindo de amplitude, devido a vários fatores, englobados no conceito de atenuação.

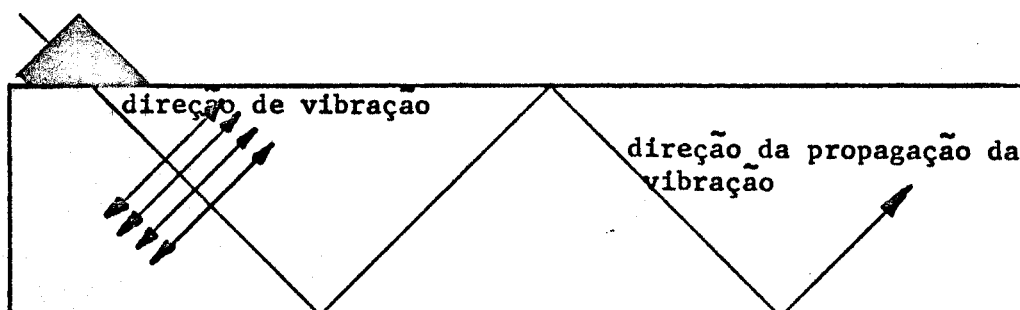
Há três tipos básicos de ondas ultra-sônicas; a) onda longitudinal, ou de compressão, onde o movimento principal se dá na mesma direção da propagação, figura IV.1.1.

a)



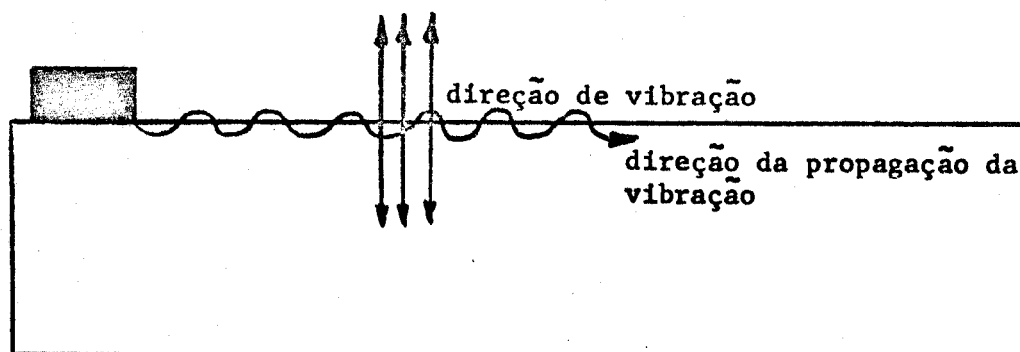
onda longitudinal

b)



onda transversal

c)



onda de superfície

FIGURA IV.1.1 - Tipos de propagação de ondas em um meio.

b) onda transversal, com uma velocidade de propagação menor que a da onda longitudinal, apresentando o movimento das partículas, perpendicular à direção de propagação, figura IV.1.1.b; c) ondas de superfície, têm um movimento mais complexo, sendo um composto de vibrações longitudinais e transversais.

As ondas longitudinais, são as mais usadas, por serem as mais conhecidas, as mais fáceis de serem geradas e as únicas que podem ser mantidas em um líquido. As transversais, passíveis de serem geradas em sólidos, / têm também aplicações amplas, enquanto que as de superfície(ou de Rayleigh) são raramente utilizadas.

Transdutores em geral, são dispositivos destinados a transformar uma forma de energia em uma outra. Para gerar vibrações ultra-sônicas, aplica-se energia elétrica em um transdutor adequado a essa energia é convertida em energia vibratória mecânica.

Os ultra-sons utilizados hoje em dia são gerados e detetados através dos denominados transdutores ultra-sônicos.

Os transdutores ultra-sônicos podem se classificar em: a) reversíveis, / são esquematicamente representados por um trespolo, isto é, têm dois / terminais elétricos e dois terminais mecânicos, funcionando em ambos os sentidos; b) irreversíveis, funcionam num só sentido.

Como exemplo de transdutores reversíveis pode-se citar: o alto falante, cristais piezo elétricos e materiais magnetostritivos, os mais usados em nosso estudo; e de transdutores irreversíveis, tem-se as sereias e vibradores.

Uma descrição sucinta de u'a montagem de um equipamento para ensaios não destrutivos pelo método dos ultra-sons, é a seguinte: um gerador elétrico de pulso excita um transdutor, transformando a energia elétrica em / mecânica. Esta energia mecânica, gera a vibração (ondas) que se propaga



através do meio, sendo, ou captada por outro transdutor na face oposta, / se o método for o denominado de transparência ou refletindo-se e sendo / captada pelo mesmo transdutor, agora funcionando como receptor, se o método for o denominado de eco. Nestes dois processos, as fissuras ou trin<sub>cas</sub> são detetadas. O sinal mecânico sendo captado pelo transdutor-receptor é transformado em um sinal elétrico, que através de um osciloscópio / ou de um sistema de medida de tensão, dá um sinal visual proporcional à amplitude da onda elástica transmitida através do meio em estudo; figura IV.1.2.

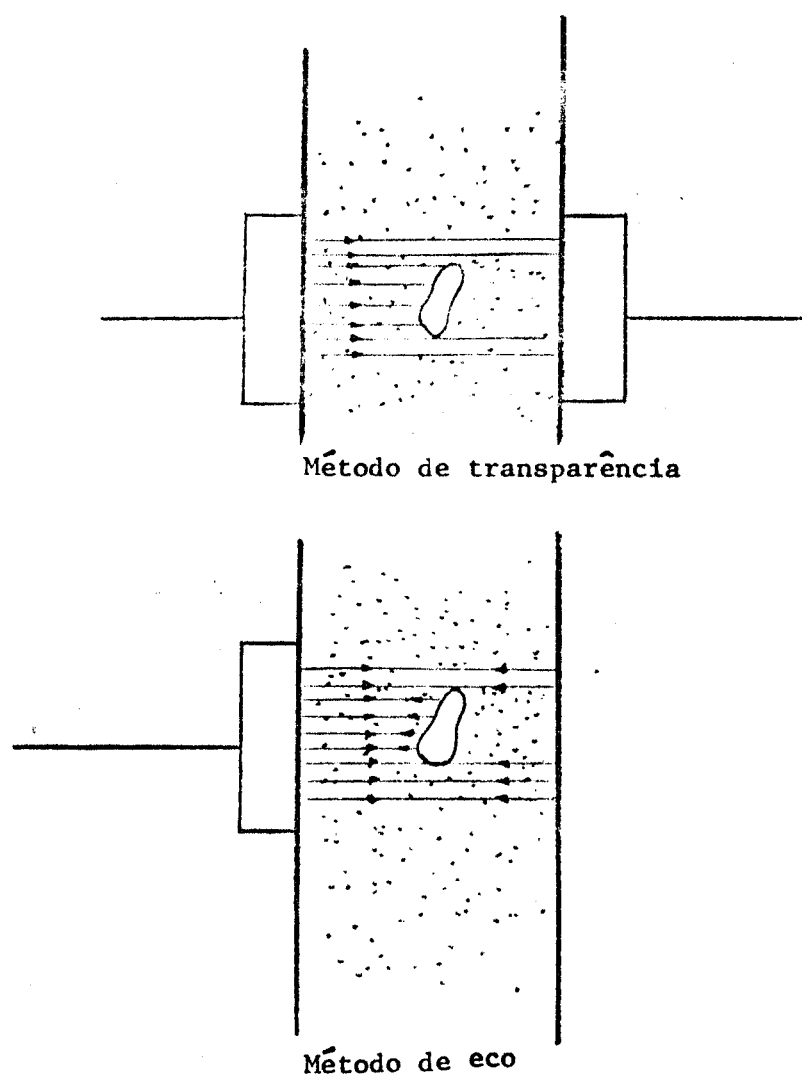


FIGURA IV.1.2 - Esquema representativo dos métodos de eco e transparência.

#### IV.1.2 - REVISÃO HISTÓRICA

O início da aplicação de ensaios não destrutivos por ondas elásticas, foi por meio de um martelo batendo em uma peça metálica; a observação do som produzindo era feita por inspetores: assim era o ensaio do tinido.

As notas sonoras, audíveis, produzidas por uma peça de aço contendo uma rachadura, eram surdas e ásperas, comparadas com as notas sonoras produzidas por uma peça idêntica e sem rachadura.

O ensaio do tinido, foi perdendo seu prestígio, devido aos altos erros a que êle conduzia, porém não desapareceu totalmente; foi aprimorado com o emprêgo de conjunto de instrumentos auxiliares, tais como, estetoscópios, microfones ligados a fones, etc. Foram desenvolvidos também martelos vibradores, eletromagnéticos, para percutir com rapidez as peças.

Êste ensaio pode sem dúvida, determinar se existe ou não, descontinuidades grosseiras nas peças ensaiadas, porém é incapaz de detetar as menores, isto é, pequenas inclusões ou impurezas. O comprimento das ondas audíveis é geralmente muito grande em comparação com o tamanho das descontinuidades e assim não se modificam sensivelmente a ponto de suas eventuais alterações poderem ser observadas.

Vibrações elásticas sonoras, audíveis, não conduzindo à solução do problema, quanto à detecção de pequenas descontinuidades (inclusões, porosidade, etc), pensou-se, então, em vibrações elásticas de pequenos comprimentos de ondas e frequências correspondentes, superiores à 20 kHz: os ultra-sons. Com esta descoberta dos ultra-sons, inúmeras aplicações foram encontradas.

Antes da primeira guerra mundial, os ultra-sons eram empregados para a detecção de icebergs no mar e os ecobatímetros, aparelhos para a determinação da profundidade do mar e detecção de submarinos, foram desenvolvidos posteriormente.

Em 1929, S. Solokov, construiu uma série de instrumentos para o exame em peças de ferro fundido e afirmou que as ondas ultra-sônicas poderiam ser usadas para a complementação de inspeção com o raio X.

Posteriormente, Solokov, publicou em 1935, uma série de artigos sobre geradores de ultra-sons, utilizando cristais de quartzo, descrevendo ainda maneiras de acoplá-los com a superfície dos corpos a serem ensaiados.

Este acoplamento era feito com mercúrio e as experiências mostraram a pouca absorção de ondas ultra-sônicas pelos metais, possibilitando assim este tipo de ensaio ser amplamente aplicado na inspeção de metais.

Com a publicação em 1938 do que foi considerado o primeiro relatório de técnicas de ensaios não destrutivos para o concreto, Powers, iniciou praticamente a aplicação dos ultra-sons na análise em concreto e materiais/similares. Este tipo de ensaio, o emprêgo de ondas vibracionais para a análise de concreto, é conhecido como ensaio dinâmico.

Este novo método iniciado por Powers, era baseado na determinação da frequência de ressonância da peça testada e seu relacionamento com as constantes elásticas do material. Trata-se assim, de um novo campo: a aplicação de ultra-sons para determinação de propriedades físicas de meios materiais e não somente para a determinação de descontinuidades - grosseiras ou finas - nesses meios.

Este método de ressonância era satisfatoriamente aplicável em corpos de prova em laboratórios; contudo, dificultava o ensaio "in loco", devido ao perigo de se vibrar uma estrutura e também à complexidade de computação para se correlacionar uma determinada frequência de ressonância com propriedades elásticas do concreto.

Com a limitação apresentada pelo método da frequência de ressonância, outra técnica começou então a ser desenvolvida; uma que permitisse o ensaio no campo. Powers no seu trabalho já havia dito que era possível de-

terminar-se o módulo de elasticidade E, a partir da medida da velocidade de propagação do som no concreto, tão bem quanto no método de vibração.

Vários experimentadores fizeram medidas de velocidade de propagação de ultra-som no concreto. Por volta de 1943, Long e Kurtz /4/ construíram / um aparelho que permitia este tipo de ensaio no campo. O valor do módulo de elasticidade obtido por este método, concordava razoavelmente bem com o obtido de medidas com o método de ressonância.

Em 1949, foi feita a primeira determinação da profundidade de uma fissura, usando-se o método do pulso ultra-sônico. Esta determinação foi feita por Leslie e Cheesman no Canadá /4/.

Mason em 1950, projetou um tipo de transdutor que gera predominantemente ondas transversais e de torção. Nesta mesma época, estudos sobre a atenuação da vibração longitudinal foram feitos por Lethersich e Peltzer /4/.

Por meio de testes pelo método de ressonância (transversal), Kessler e Higuchi, concluíram que corpos de prova com dimensões diferentes, porém com o mesmo traço do concreto, têm diferentes valores para o módulo dinâmico e para o decremento logarítmico /4/.

Em 1957, Jones constatou a influência da cura de corpos de prova, na variação do módulo dinâmico, por meio de ensaios pelo método de ressonância longitudinal e transversal /4/.

A redução da resistência do concreto cai, com o aumento da percentagem / de vazios /4/ e Kaplan em 1960, constrói uma curva onde, está relacionada esta variação da resistência com o número de vazios, gráfico IV.1.1.

Em 1961, Spinner e Tefft, determinaram as correções necessárias para a fórmula do módulo dinâmico, aplicada a corpos de prova cilíndricos /4/.

Atualmente vários estabelecimentos empregam a técnica da determinação de velocidade de pulso, como também da determinação da frequência de resso-

nância no concreto e o desenvolvimento de aparelhos para êstes fins é bastante grande.

#### IV.1.3 - INTRODUÇÃO ÀS TÉCNICAS DE ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS PARA DETERMINAÇÃO DE CONSTANTES ELÁSTICAS

Através de ensaios pelo método dos ultra-sons, não é possível se fazer / medidas diretas das propriedades dos materiais, que envolvem aplicação / de esforços destrutivos.

O que se faz, é medir outras propriedades físicas do material, que são / ligadas com, por exemplo, a carga de ruptura e que podem ser medidas por ensaios não destrutivos. Uma dessas propriedades, é o módulo dinâmico de Young, E, que é definido como a razão da tensão pela deformação /4/.

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (\text{IV.1.1})$$

onde F - módulo da força aplicada em uma seção

A - área da seção

$\Delta l$  - deformação na dimensão paralela à força aplicada

$l_0$  - dimensão original paralela à força aplicada

Pode-se mostrar /4/ que num sólido ideal com vazios, mudanças na porcentagem de vazios, produzem mudanças no módulo de elasticidade (ou módulo / de Young). Quanto maior o número de vazios, presente, menor é o módulo.

Resultados experimentais /4/ da variação do módulo de Young do concreto / em função da porcentagem de vazios apresentados no gráfico IV.1.1.

As relações empíricas entre a resistência (carga de ruptura) e módulo de elasticidade, não são bem conhecidas de modo geral e devem ser feitas es pecificações quanto a outras características do concreto, tais como, pro

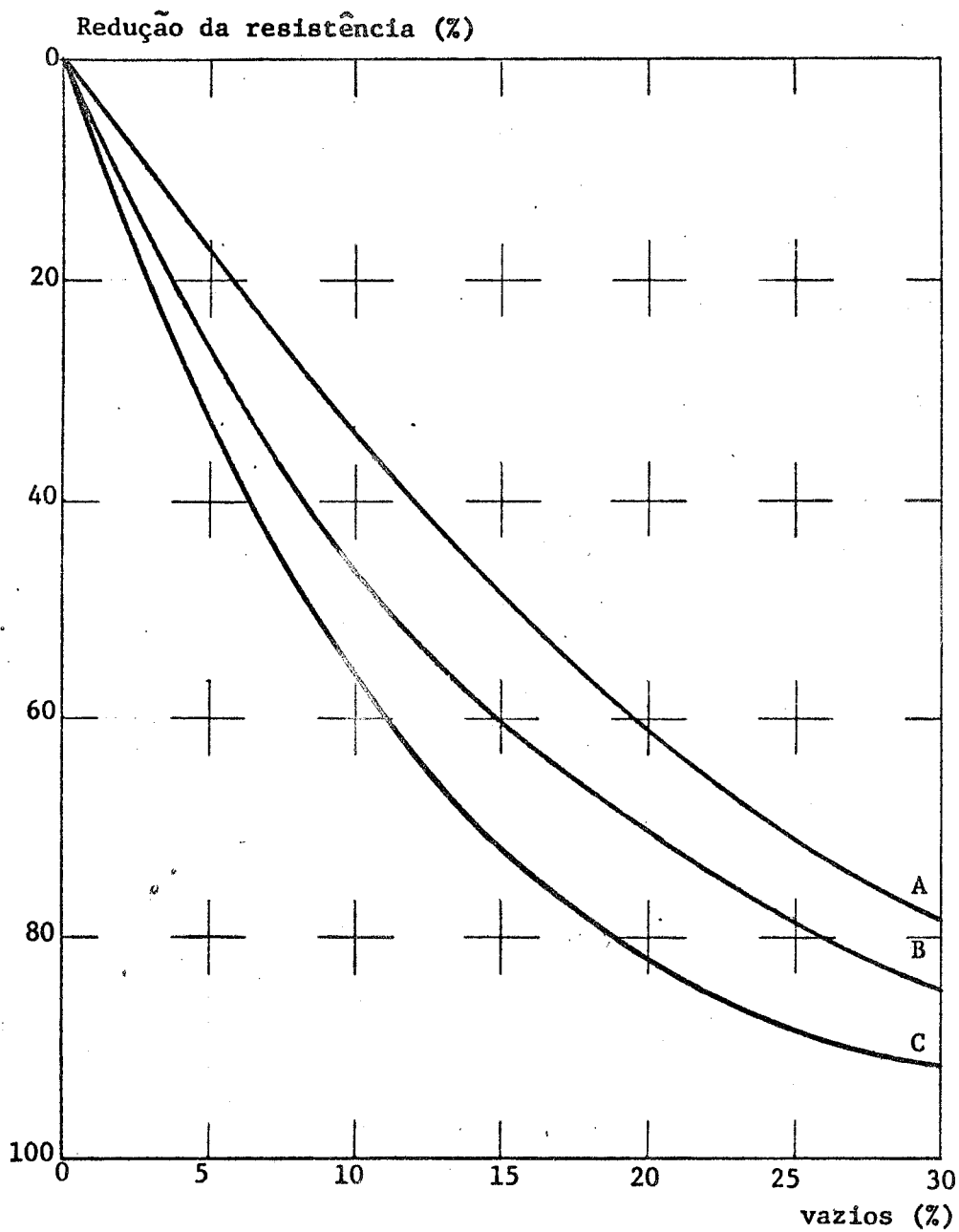


GRÁFICO IV.1.1 - Redução da resistência e módulo de elasticidade do concreto devido aos vazios. A - módulo dinâmico de Young; B - resistência à flexão; C - resistência à compressão.

porção da mistura, tipos de agregados, etc.

Um critério que tem sido usado como índice de qualidade para o concreto, é baseado no valor da velocidade de propagação de pulso de ondas longitudinais. A velocidade de pulso, é mais fácil e diretamente obtida, no concreto de estruturas do que em corpos de prova de concreto, nos laboratórios, devido a uma maior dimensão no espécime ensaiado.

A velocidade de propagação do pulso, é dada pela fórmula:

$$\alpha^2 = \frac{E g (1 - \eta)}{\rho (1 + \eta) (1 - 2\eta)} \quad (\text{IV.1.2})$$

onde E - módulo de elasticidade dinâmico  
g - aceleração da gravidade  
 $\eta$  - coeficiente de Poisson  
 $\rho$  - densidade  
 $\alpha$  - velocidade de propagação do pulso

Quando os materiais são submetidos às vibrações, imperfeições internas / dissipam uma parte da energia elástica, sob a forma de calor, e produzem um aumento na atenuação, ou seja, diminuem a amplitude das vibrações que se propagam nestes materiais.

No concreto a atenuação está associada à presença de vazios, fissuras, / imperfeições e fronteiras entre o agregado e a argamassa.

A associação da atenuação com as imperfeições existentes, levou a se utilizar esse efeito, como um critério de qualidade, e vários métodos estão atualmente sendo desenvolvidos para estas medidas.

#### IV.2 - MÉTODO DA RESSONÂNCIA

Este método é, praticamente, usado somente com corpos de prova em labora

tórios e tem como primeiro objetivo a determinação do módulo dinâmico de Young ou o módulo de cisalhamento do material.

Os corpos de prova são postos sob vibração longitudinal, transversal ou de torsão. O procedimento é idêntico em cada caso, sendo diferentes, somente, às posições dos suportes e dos excitadores e detetores de vibração.

#### IV.2.1 - MÉTODO DE RESSONÂNCIA LONGITUDINAL

Um arranjo experimental para vibrações longitudinais de acordo com as BS 1881 /6/, está indicado na figura IV.2.1.

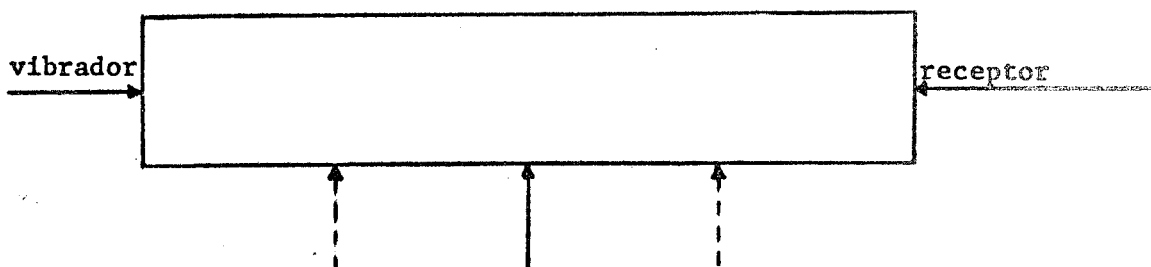


FIGURA IV.2.1 - Posição do vibrador, receptor e suporte para o modo de vibração longitudinal.

O corpo de prova é preso no ponto médio, e um gerador eletrodinâmico de vibração e um cristal piezoelétrico são colocados nas extremidades. É importante que as extremidades do corpo de prova estejam livres para vibrar na direção axial, e tanto o vibrador como o receptor não devem impor nenhuma restrição apreciável nas extremidades.

Usa-se, normalmente, um adesivo entre o corpo de prova e os transdutores, tal como glicerina ou óleo lubrificante.

Um oscilador de frequência variável é usado, e o corpo de prova é posto em vibração longitudinal.



As vibrações são captadas pelo receptor, e após, amplificadas, suas magnitudes são indicadas num deflectômetro. A força vibratória aplicada ao corpo de prova é pequena e raramente ultrapassa a 0,5 kgf.

Variando-se a frequência do gerador ultra-sônico, encontram-se frequências correspondentes às denominadas condições de ressonância, para as quais as amplitudes do movimento vibratório longitudinal apresentam máximos, indicados por leituras no deflectômetro.

A frequência mais baixa, na qual ocorre uma ressonância longitudinal, é a frequência fundamental de ressonância, e a sua relação com o módulo dinâmico de elasticidade é:

$$E = \frac{4 n^2 l^2 \rho}{g} \quad (\text{IV.2.1})$$

onde  $n$  = frequência fundamental de ressonância longitudinal

$l$  = comprimento do corpo de prova

$\rho$  = densidade

$g$  = aceleração da gravidade

A equação (IV.2.1) é usada para um material isotrópico e elástico ideal e é somente válida, quando o corpo de prova tem o comprimento bem maior / que a seção transversal; na prática deve-se ter:

$$l \geq 2d \quad (\text{IV.2.2})$$

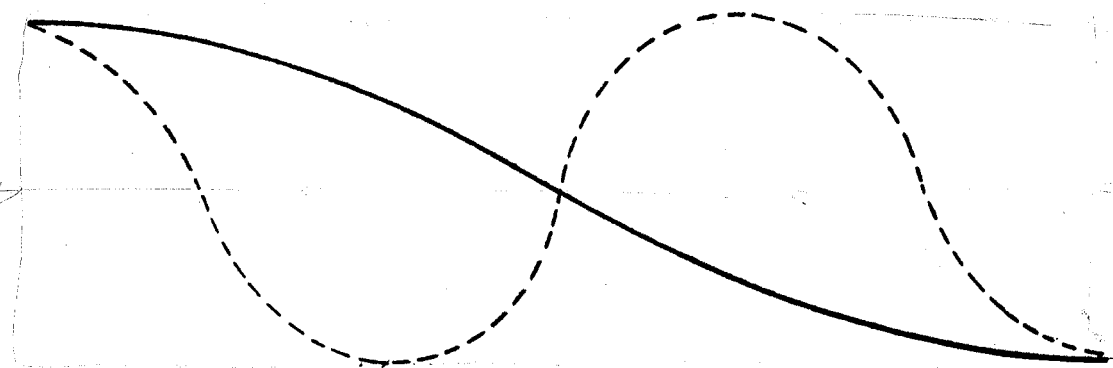
Na frequência fundamental de ressonância os maiores deslocamentos vibracionais, os ventres, são localizados nas extremidades do corpo de prova; contrastando, temos o ponto médio em repouso; isto é, um nó, figura / IV.2.2.

Junto com a frequência fundamental, existem outras frequências mais altas, onde ocorre a ressonância; essas frequências são chamadas harmôni-

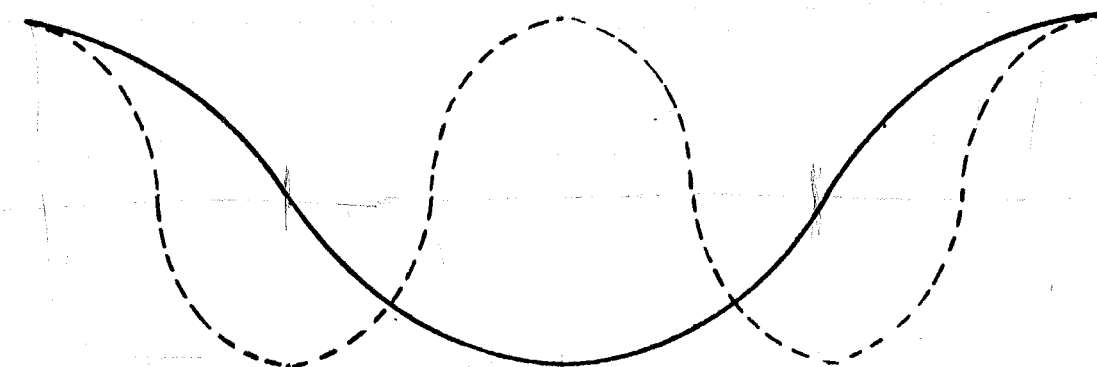
cas e para os corpos de provas longos e finos, na vibração longitudinal, elas são múltiplas da fundamental

$$(n_L)_i = i(n_L)_1$$

(IV.2.3)



harmônicas de ordem ímpar  $i = 1$  e  $3$



harmônicas de ordem par  $i = 2$  e  $4$

FIGURA IV.2.2 - Deslocamentos vibracionais - onda longitudinal.

Em cada harmônica, há o mesmo número de nós que a ordem da mesma; no caso da fundamental e harmônica de ordem ímpar, o nó ocorre no ponto médio do corpo de prova (v. fig. IV.2.2.a). Por exemplo, numa harmônica de ordem 2, a ressonância ocorre no dôbro da frequência fundamental e os nós estão nos terços do comprimento, os ventres estão nas extremidades livres. Consequentemente para o caso da segunda ou outra harmônica de ordem par, não é aconselhável se ter um suporte central, pois pode ocasionar uma restrição no plano médio e a frequência de ressonância pode ser camuflada. Não é necessário se prender o corpo de prova: somente um suporte fino no meio do corpo de prova, já força o aparecimento de uma harmônica de ordem ímpar. Pode-se também colocar espuma de borracha em toda a extensão; tem-se bons resultados para a obtenção de uma frequência de ressonância sem ondas espúrias. Isso já foi experimentado com bom sucesso, /4/.

Na frequência de ressonância longitudinal, fundamental, o comprimento da onda é o dôbro do comprimento do corpo de prova e para as harmônicas, é o dôbro do comprimento dividido pela ordem da harmônica.

#### IV.2.2 - MÉTODO DE RESSONÂNCIA TRANSVERSAL

O arranjo experimental é feito como na figura IV.2.3.

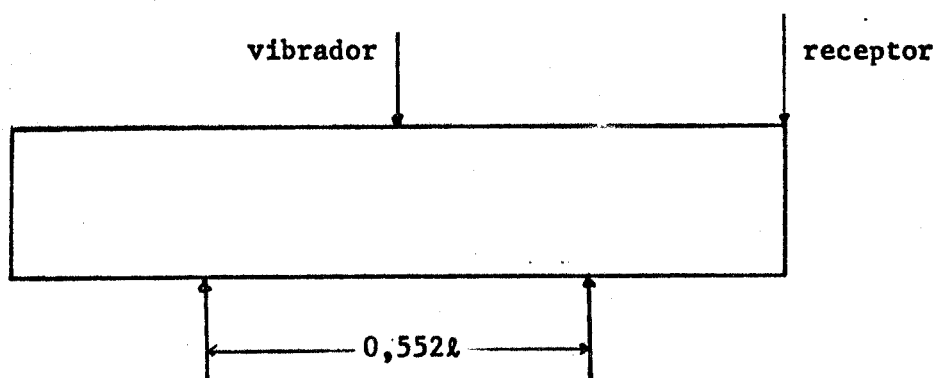


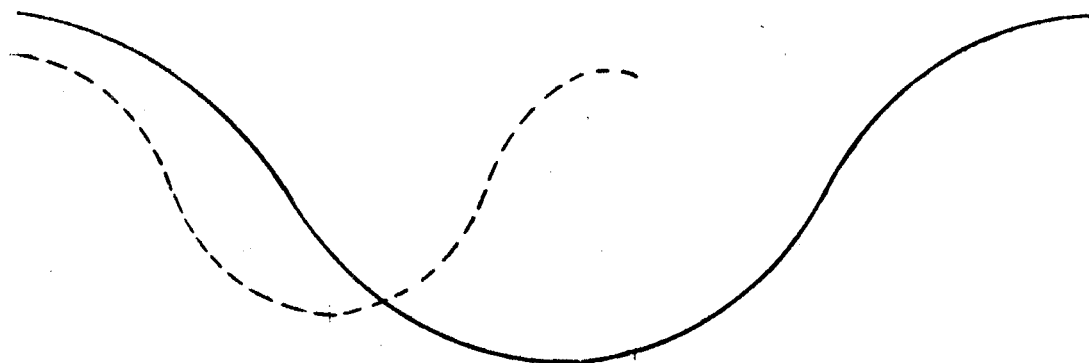
FIGURA IV.2.3 - Posição do vibrador, receptor e suportes para o modo de vibração transversal.

A parte inferior do corpo de prova é suportada simetricamente por dois / suportes delgados, separados de  $0,552\lambda$ , forçando o aparecimento dos nós da frequência fundamental /4/.

O vibrador é aplicado no ponto médio do corpo de prova e o receptor, acima das extremidades, porém na mesma face (ou mesma geratriz para o caso / de corpos de prova cilíndricos).

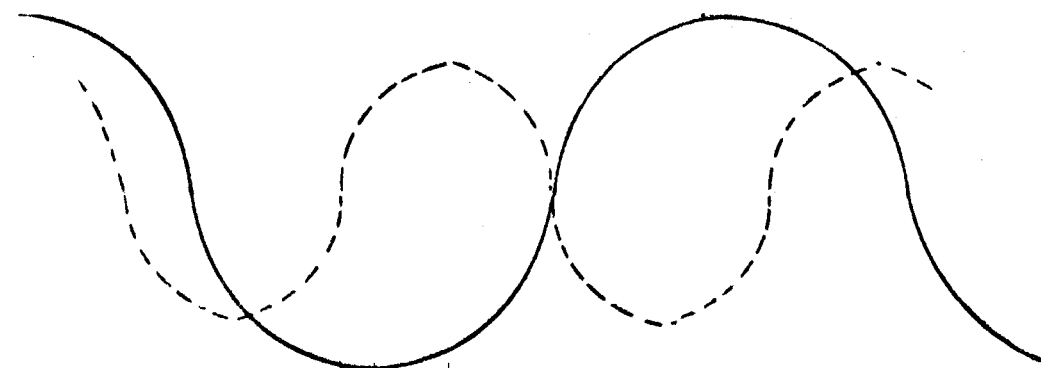
Para a determinação da harmônica de ordem ímpar e par, as posições tanto do vibrador como do receptor devem ser indicadas conforme as figuras / IV.2.4.a e IV.2.4.b.

a)



harmônicas de ordem ímpar  $i = 1$  e  $3$

b)



harmônicas de ordem par  $i = 2$  e  $4$

FIGURA IV.2.4 - Deslocamentos vibracionais - onda transversal.

As duas extremidades, são sempre ventres de onda, e tanto podem ser usadas como posições para o vibrador ou receptor.

Colocando-se um suporte no ponto médio, aparecerão, somente, as harmônicas de ordem par.

A teoria exata do cálculo do módulo de Young, para corpos de prova finitos, por ressonância transversal foi dada por Pickett e Spinner /4/ de acôrdo com a equação (IV.2.4), para o caso do cilindro:

$$E = \frac{4\pi^2 \ell^3 W(n_f)_i^2 T_i}{g I k_1^4} \quad (\text{IV.2.4})$$

e de acôrdo com a equação (IV.2.5) para corpos de prova com seção retangular:

$$E = \frac{48\pi^2 \ell^4 (n_f)_i^2 T_i \rho}{g a^2 k_1^2} \quad (\text{IV.2.5})$$

os valores dados de  $k_1$  são /4/:

$$\begin{array}{lll} k_1 = 4,730 & k_3 = 10,996 & k_5 = 17,279 \\ k_2 = 7,853 & k_4 = 14,137 & k_6 = 20,420 \end{array}$$

Nas equações (IV.2.3) e (IV.2.4) tem-se:

$I$  = momento de inércia da seção do corpo de prova

$k_1$  = fator de multiplicação

$\ell$  = comprimento do corpo de prova

$W$  = massa

$n_f$  = frequência de ressonância transversal

$T$  = fator de correção, que depende da razão do raio de giração,

$K$  (raio de giração para um cilindro é  $\frac{d}{4}$  e para um prisma é  $\frac{a}{3,464}$ ) e do comprimento  $l$  do corpo de prova

$g$  = aceleração da gravidade

$a$  = espessura (largura) - direção de emissão

$\rho$  = densidade

$K/l$	T	$K/l$	T
0,00	1,00	0,09	1,60
0,01	1,01	0,10	1,73
0,02	1,03	0,12	2,03
0,03	1,07	0,14	2,36
0,04	1,13	0,16	2,73
0,05	1,20	0,18	3,14
0,06	1,28	0,20	3,58
0,07	1,38	0,25	4,78
0,08	1,48	0,30	6,07

TABELA IV.2.1 - Valores de T, para a relação de Poisson de  $\frac{1}{6}$  por Pickett, Gerald /5/.

A relação de Poisson para concreto saturado de água, pode ser maior que  $\frac{1}{6}$ . O fator de correção  $T'$ , para diferentes valores do coeficiente de Poisson e sendo dado  $K/l$  pode ser calculado por /5/:

$$T' = T \left[ \frac{1 + (0,26\eta + 3,22\eta^2) K/\ell}{1 + 0,1328 K/\ell} \right] \quad (\text{IV.2.6})$$

onde T é dado pela tabela IV.2.1, para K/ℓ dado.

### IV.2.3 - MÉTODO DE RESSONÂNCIA À TORÇÃO

O vibrador é aplicado numa extremidade do corpo de prova e o receptor em outra extremidade, porém num plano perpendicular, de maneira a produzir a máxima torção, figura IV.2.5.

Isto é mais facilmente conseguido para corpos de prova com seção retangular.

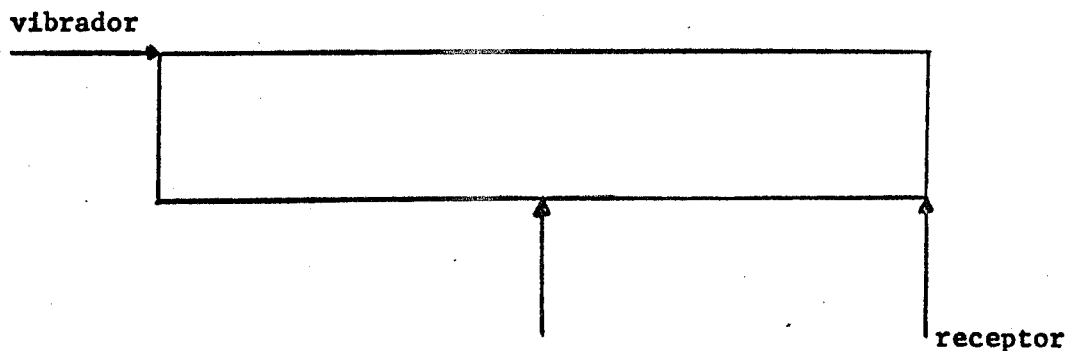


FIGURA IV.2.5 - Posição do vibrador, receptor e suporte para o modo de vibração de torção.

Os ventres e nós aparecem nas mesmas posições que no método de frequência longitudinal, tanto para a fundamental como para as harmônicas.

O módulo dinâmico de cisalhamento G, é dado pela relação de Pickett /4/ para prismas:

$$\frac{G}{\rho} = \frac{4(\eta t)^2}{i^2} \frac{\ell^2}{g} \frac{(a/b + b/a)}{(4a/b) - 2,52(a/b)^2 + 0,21(a/b)^6} \quad (\text{IV.2.7})$$

e correspondente fórmula para cilindros:

$$\frac{G}{\rho} = \frac{4(n_t)_i^2}{i^2} \frac{l^2}{g} \quad (\text{IV.2.8})$$

Para o caso de ensaios em corpos de prova cilíndricos, as harmônicas são simples múltiplos da frequência fundamental e não é necessário se fazer/nenhuma correção, mesmo em ondas cujos comprimentos são comparáveis com diâmetro.

Para o caso de prismas, correções são necessárias. Segundo a teoria de Davies /4/, G, deve ser multiplicado por  $[1 + (i^2 \pi^2 \mu^2 / l^2)]$ , onde  $\mu$  é zero para cilindro, tem pequeno valor para seções quadradas, porém para seções retangulares é função da razão da largura pela altura.

Geralmente, pelas especificações, os corpos de prova têm seção quadrada/ e essa correção pode ser desprezada, pois o fator de correção é 1,183 /5/.

#### IV.3 - IDENTIFICAÇÃO DA RESSONÂNCIA

A identificação da frequência fundamental e das harmônicas de uma ressonância, é feita diretamente em um espécime de concreto com cura normal./ Por exemplo, a excitação longitudinal, produziria quase que somente ressonância longitudinal do espécime, a qual na ausência do fator de correção ocorre em incrementos iguais de frequência. Contudo, em uma amostra/ muito danificada, considerando-a um meio heterogêneo, a identificação / torna-se bastante complicada pelo seguinte: a) a recepção pode ocorrer / em diferentes modos, tal como a ressonância transversal que é geralmente excitada com vibrações longitudinais; b) a atenuação das vibrações aumenta consideravelmente e mais energia é requerida para excitar a amostra à ressonância, causando ressonância associada com a bancada de teste, ou / com os transdutores, sendo de magnitude comparável com a da amostra.

Pode acontecer, encontrar-se uma série de ressonâncias produzidas numa larga faixa de frequências não determinadas anteriormente por um modo



particular. Pode-se, entretanto, determinar esta ressonância levantando-se o espectro de ressonâncias dadas pelo aparelho e por regras que se seguem: a) a razão das duas primeiras harmônicas transversais para a fundamental é aproximadamente 1:2 7:5; b) a razão da ressonância fundamental longitudinal para a transversal é aproximadamente  $1/4$ :  $(n_L)_1:(n_f)_1 = 2:2a$ ; c) em uma barra de seção retangular há duas séries de ressonâncias transversais que estão na relação das dimensões da seção:  $n_{f1}:n_{f2} = a:b$ .

Entretanto a melhor maneira de se identificar a ressonância, é pelo número de nós e ventres ao longo do comprimento do espécime. Isto pode ser descoberto facilmente, na ressonância transversal, com o uso de um pequeno receptor que é colocado no topo do espécime de tal maneira que responda a movimentos verticais. Uma vez conseguida a ressonância da amostra, o receptor auxiliar pode ser conectado a um amplificador de voltagem em lugar do receptor usado e a deflexão no relógio é então proporcional à amplitude da vibração nos locais onde está o receptor móvel; então teremos uma série de máximos e mínimos de voltagem, o que corresponde aos nós e ventres da onda. Uma vez conhecidas essas posições, a identificação é feita de acordo com a figura IV.2.4.

Outro receptor auxiliar pode ser usado para se detectar nós e ventres de vibrações longitudinais porém, neste caso, as respostas devem ser na direção do comprimento; um receptor tipo gramofone é o mais indicado neste caso.

A dificuldade de se identificar uma ressonância de torção, é devida à presença da ressonância transversal já mencionada anteriormente.

#### IV.4 - MEDIDA DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

Os dois métodos mais usados para a medida do coeficiente de atenuação no método de frequência de ressonância são: a) pela medida da largura da / faixa da curva de ressonância e, b) pela medida do decremento logarítmico

co de vibrações livres /4/.

A medida da largura da faixa de ressonância é medida diretamente da frequência de ressonância, do material que está sendo testado. Mede-se o valor do deslocamento  $A_d$  no voltômetro, que é proporcional ao deslocamento da extremidade do corpo de prova na frequência de ressonância  $n_0$ ; também determina-se as frequências  $n_1$  e  $n_2$ , acima e abaixo da ressonância, onde o deslocamento cai para  $A_d/\sqrt{2}$ , ou seja  $0,707 A_d$ . O valor de "Q" é então calculado pela fórmula

$$Q = \frac{n_0}{n_1 - n_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

Decremento logarítmico é definido como o logarítmo da razão entre as amplitudes sucessivas da oscilação na atenuação da onda senoidal produzida pelo decaimento das vibrações livres do corpo de prova. Um método de obtenção da curva de decaimento é se ter num osciloscópio, o sinal do receptor e quando o corpo de prova entra em ressonância, desliga-se o excitador e se fotografa a curva de decaimento na tela do osciloscópio. O princípio da operação da determinação do decremento logarítmico, é se contar o número de ciclos de vibração do corpo de prova num tempo tomado para que a amplitude da curva de decaimento, caia à metade do seu valor original. Tem-se o decremento logarítmico dado por:

$$\delta = \frac{\log_e 2}{N} \quad (\text{IV.4.1})$$

onde N é o número de contagens registradas. Relacionando-se Q com  $\delta$ , tem-se /4/:

$$Q = \frac{\pi N}{\log_e 2} = 4,5 N \quad (\text{IV.4.2})$$

#### IV.5 - MEDIDA DO COEFICIENTE DE POISSON

O coeficiente dinâmico de Poisson é dado pela eq. (IV.5.1), onde se tem o módulo de Young dinâmico e o módulo de cisalhamento em um mesmo corpo

de prova:

$$\eta = \frac{E}{2G} - 1 \quad (\text{IV.5.1})$$

onde  $\eta$  = coeficiente de Poisson

$E$  = módulo de Young

$G$  = módulo de resistência ao cisalhamento

Este coeficiente, pode ser obtido a partir da frequência longitudinal de ressonância e da velocidade de pulso longitudinal, como segue /4/:

$$\left(\frac{\alpha}{2n_L l}\right)^2 = \frac{(1-\eta)}{(1+\eta)(1-2\eta)} \quad (\text{IV.5.2})$$

e o coeficiente de Poisson  $\hat{\eta}$ , então, chamado coeficiente de Poisson dinâmico para se distinguir do determinado convencionalmente.

Os valores do coeficiente de Poisson do concreto, normalmente, variam em torno de 0,10 para espécimes secos e 0,25 para espécimes saturados.

#### IV.6 - ENSAIO DE CONCRETO PARA MÉTODO DE RESSONÂNCIA

##### IV.6.1 - REPRODUTIBILIDADE DOS RESULTADOS

Quando o módulo de Young ou o de resistência do concreto é obtido por métodos convencionais, geralmente, há diferenças nos resultados de corpos de prova tirados de uma mesma betoneira. As variações dos resultados obtidos por testes de ressonância, são bem menores que os dados pelos métodos convencionais; portanto, menor quantidade de corpos de prova são necessários para se ter uma avaliação melhor. Na tabela IV.6.1 estão alguns resultados experimentais para se determinar o módulo estático e dinâmico de acordo com a B.S.1881 /6/.

Vê-se que para a obtenção do módulo estático do corpo de prova de  $12 \times 3 \times 3$ , foram necessários seis vezes mais espécimes do que os necessários

para o módulo dinâmico.

TAMANHO DO ESPÉCIME (in.)	GEOMETRIA	MÓDULO DE YOUNG	NÚMERO DE CDPs.	ERRO PADRÃO DE TRÊS RESULTADOS (lb/sqin×10 <sup>6</sup> )	NÚMERO DE ESPÉCIMES P/ SE TER U'A MEDIDA COM ERRO PADRÃO DE 0,05 lb/sqin×10 <sup>6</sup> ±1%
12×6	cilindro	estático	3	0,093	10
12×3×3	prisma	estático	3	0,146	26
28×6×6	prisma	dinâmico	3	0,039	2
20×4×4	prisma	dinâmico	3	0,051	3
12×3×3	prisma	dinâmico	3	0,054	4

TABELA IV.6.1 - Resultados experimentais para a determinação do módulo de elasticidade estático e dinâmico, /4/.

As variações que aparecem na obtenção do módulo estático são devidas principalmente ao ensaio do que, propriamente, aos corpos de prova. Os erros podem aparecer da não uniformidade da tensão nas extremidades dos corpos de prova, das diferenças entre as medidas dadas pelos extensômetros e a média de deformação do espécime todo. Podem também aparecer erros de escolha não apropriada de pontos para se ler a tensão. Já no caso de teste por ultra-sons, a frequência de ressonância, a densidade e o comprimento/ do espécime, os elementos necessários para se determinar o módulo dinâmico, podem ser medidos com alta precisão.

#### IV.6.2 - EFEITO DO TAMANHO DO CORPO DE PROVA

Espécimes de dimensões diferentes, feitos de um mesmo concreto (mesma betoneira) e testados por frequência de ressonância transversal, deram resultados diferentes do módulo dinâmico e do decremento logarítmico do con

creto /4/. Sendo o módulo dinâmico plotado contra a frequência de ressonância correspondente, observa-se uma tendência sistemática, tal como, / quanto mais alta a frequência de ressonância, mais baixo é o módulo dinâmico. Podemos então mudar o "efeito de dimensão" anteriormente chamado, / por "efeito de frequência". Para se assegurar que não existe nenhum "efeito de dimensão", somente de frequência, foram feitas /4/ séries de medidas das ressonâncias fundamental e harmônicas no método longitudinal e transversal em corpos de prova (7ft 6in×6in×3in e 6ft×6in×3in). Isto permitiu o cálculo do módulo dinâmico com frequências variando entre 70 e 10.000 cps. A frequência fundamental e as harmônicas transversais foram responsáveis pela faixa mais baixa da frequência, enquanto que as harmônicas longitudinais completaram com a alta faixa.

As ressonâncias mais baixas longitudinais, sobrepuseram-se às frequências dadas pelas altas harmônicas transversais e verificou possíveis diferenças entre os dois modos de excitação. Mostrou-se /4/ que para o concreto fresco, o módulo dinâmico aumentou com a frequência menos que 3% de toda a faixa varrida e o valor de "Q" não teve diferença significativa na variação dentro da faixa.

#### IV.6.3 - EFEITO DA IDADE E CONDIÇÕES DE CURA

Devido ao endurecimento do concreto, êle adquire uma resistência ao cisalhamento. Nos primeiros dias, a resistência ao cisalhamento e o módulo / de Young crescem rapidamente e tornam-se praticamente constantes para a idade superior a três meses /4/.

Os corpos de prova, curados continuamente na água, mostram que seu módulo de elasticidade é maior comparado com o concreto curado no ar. O gráfico IV.6.1 mostra êste comportamento plotando-se o módulo de elasticidade com a idade em dias.

Os corpos de prova curados no ar, apresentam resultados anômalos no módulo de elasticidade, inicialmente aumenta, depois sofre um pequeno de -

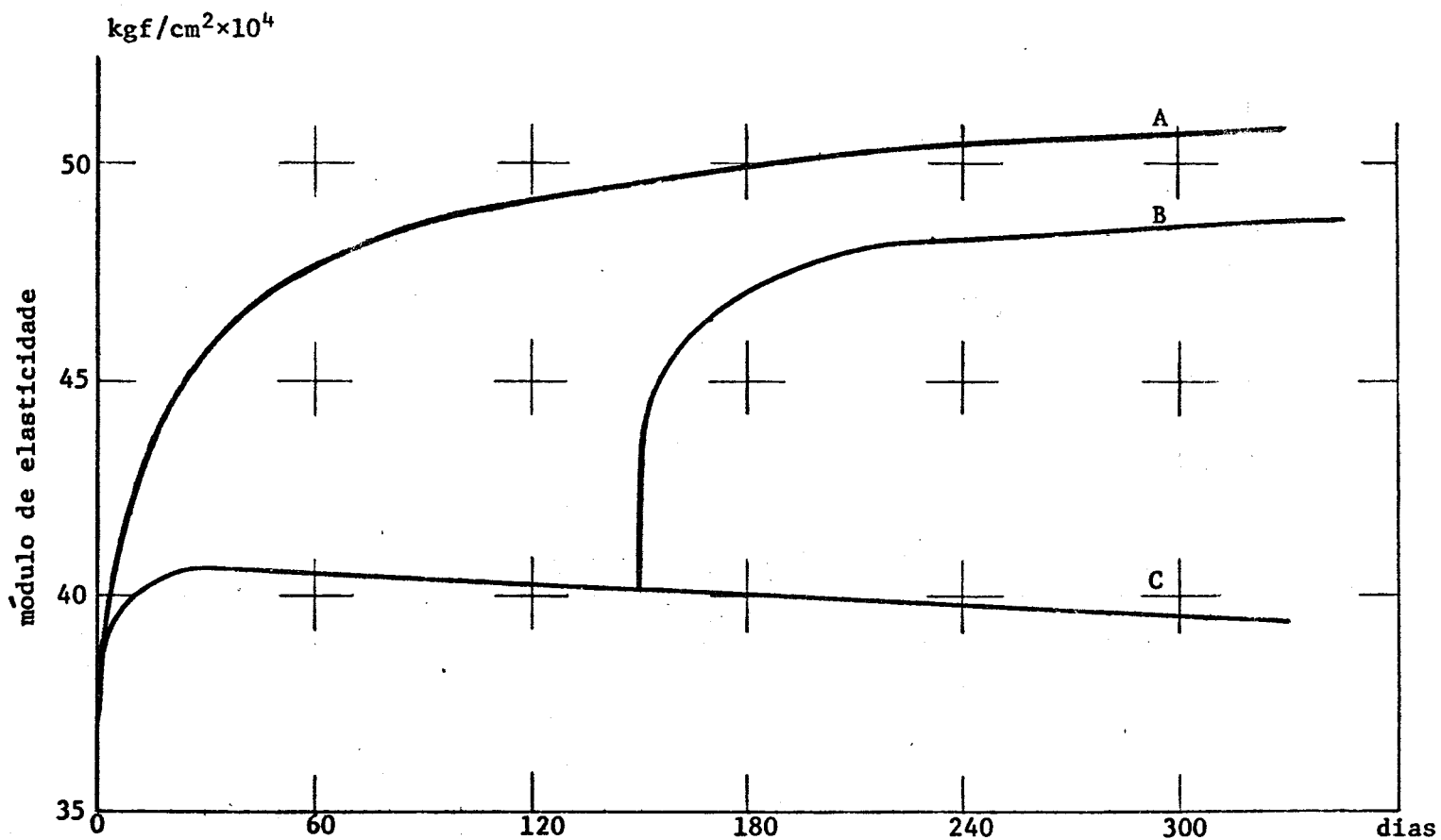


GRÁFICO IV.6.1 - Variação do módulo de elasticidade de corpos de prova curados no ar e na água: A - corpos de prova curados na água; B - corpos de prova curados ao ar após 150 dias de cura na água; C - corpos de prova curados no ar.

crêscimo, para posteriormente assumir um valor próximo a constante.

Quando um corpo de prova curado no ar é depois colocado na água, há um aumento no módulo e uma nova hidratação do cimento, porém este aumento / no módulo nunca alcança o valor obtido quando o concreto é somente curado na água. Pode-se explicar este fenômeno por pequenas fissuras que se dão no concreto, devido à retração e quando, colocado na água estas fissuras não desaparecem totalmente mesmo quando embebidas em água. Esta diferença entre os módulos de elasticidade do concreto curado no ar e na água é parte devido a diferença de umidade.

No concreto muito novo, o módulo de Poisson aproxima-se de 0,5, porém / com o endurecimento este coeficiente cai rapidamente até atingir um valor estável aos 28 dias. O valor final depende da composição do concreto e também do tipo de cura; quando curado ao ar, tem um valor pouco mais baixo ( $\pm 0,02$ ) que quando na água.

Devido a alta atenuação no concreto fresco, é difícil se produzir ressonância em corpos de prova com idade inferior a 10 dias. O efeito da cura na atenuação não está ainda determinado, porém há uma relação entre o / concreto curado ao ar e a perda de umidade causando uma variação no coeficiente de atenuação.

A cura na água deve ser preferida, em laboratório, devido à uma mais fácil reprodutibilidade de condições visto que o corpo de prova fica saturado de água até a época do teste.

#### IV.6.4 - EFEITO DA COMPOSIÇÃO

O módulo dinâmico do concreto é função das propriedades elásticas e do volume dos constituintes que são divididos em pasta de cimento e agregados. O aumento que se dá no módulo dinâmico com a idade, é exclusivamente devido ao aumento do módulo elástico da pasta de cimento quando ela / se hidrata; no concreto totalmente hidratado, o módulo elástico da pasta

de cimento é bem menor que o do agregado, assim, quanto maior a porcentagem de agregado, maior o módulo do concreto resultante. Mudanças na composição da pasta, tais como, relação água-cimento, ar incorporado, afetam o módulo dinâmico, isto porque, o excesso da água requerida para a hidratação é retido como vazios de água no concreto endurecido. O efeito de vazios de ar, no módulo dinâmico, pode ser obtido teoricamente, considerando-se o concreto como, sólido elástico homogêneo, contendo vazios - Mckenzie /4/, em 1950, desenvolveu uma teoria que determina a mudança da densidade.

Nos cálculos do coeficiente de Poisson, num meio com 20%, 25% e 33%, de vazios, encontrou-se quase idênticos valores: concluiu-se que a relação/teórica é bastante linear e a mudança percentual que se dá no módulo elástico é aproximadamente o dobro da mudança percentual de densidade.

No estágio inicial de endurecimento, a relação de Poisson é aproximadamente a mesma que a da argamassa, e com o endurecimento torna-se função/ do tipo de agregado e da proporção no concreto, dependendo mais do tipo/ de agregado que da proporção /4/.

#### IV.6.5 - RELAÇÕES COM O MÓDULO DINÂMICO

##### i) Módulo estático

$$E_d = E_s + 1 \quad (IV.6.1)$$

##### ii) Resistência a flexão

$$a) \Delta F = 6\Delta E_d^{0,6} \quad (\text{Thomson 1940}) \quad (IV.6.2)$$

onde  $\Delta F$  = redução percentual da resistência à flexão

$$b) F = A + BE + CE^2 \quad (IV.6.3)$$

onde  $F$  = lb/ sq.in



$$E = lb/sqin \times 10^6$$

$$\left. \begin{array}{l} A = 29,3 \\ B = 76,9 \\ C = 6,9 \end{array} \right\} \text{valores encontrados por Long, Kurtz e Sandenaw em} \\ \text{1945 /4/}$$

$$\left. \begin{array}{l} A = -335 \\ B = 180 \\ C = 0 \end{array} \right\} \text{valores encontrados por Sweet em 1948, em concre -} \\ \text{tos com 12 diferentes tipos de agregados}$$

$$c) E = K_1 F^{1/2} \quad (\text{Chefdeville em 1953}) \quad (\text{IV.6.4})$$

Levando-se em conta a variação do coeficiente de Poisson em concretos no vos ou de baixa qualidade, Chefdeville modificou a (IV.6.4) para

$$E = \frac{K_2}{(1 - \eta)} F^{1/2} \quad (\text{IV.6.5})$$

onde E e F são dados em kgf/cm . A constante K<sub>2</sub> varia de acôrdo com o agregado e para cascalho vale 50.400 e para pedra calcária dura, vale / 69.000.

iii) Resistência à compressão

$$a) E = K_3 R^{1/2} \quad (\text{L'Hermite em 1950}) \quad (\text{IV.6.6})$$

onde E = módulo dinâmico  
R = resistência à compressão

$$b) E = K_4 R^{1/3} \quad (\text{Chefdeville em 1953 e Takano em 1955}) \\ (\text{IV.6.7})$$

A partir destas constantes elásticas, obtidas por ensaios de ultra-som, / como já dito anteriormente, pode-se determinar os Índices de qualidade / do concreto, isto é, a variação de qualidade, que se dá no concreto quan do aplicado em estruturas e submetido a esforços.

O concreto sendo usado para a construção do vaso de pressão do reator. A segurança do vaso de pressão é um dos fatores mais importantes para a segurança geral de uma central e com isto, torna-se necessário um exame de talhado e constante, das condições do concreto, neste caso submetido a gradientes de temperatura e pressão.

Este exame é feito por ensaios não destrutivos, pela técnica do ultrassom, o que permite a frequente verificação das constantes elásticas do concreto, mesmo quando o reator estiver operando.

#### IV.7 - TÉCNICA DE PULSO

A técnica de ressonância é mais aplicada em ensaios de laboratório, enquanto que a técnica de pulso aplica mais a ensaios "in situ". Genêricamente, o pulso é aplicado em uma extremidade e o intervalo de tempo de propagação até a outra extremidade, ou sua reflexão, é medido. O pulso/consiste num trem de vibrações mecânicas e o referencial onde o  $\Delta t$  é iniciado é tomado como início do pulso.

Idealmente o tempo total para o qual o pulso se propaga no corpo de prova, deve ser menor que o intervalo de tempo entre duas chegadas sucessivas; somente a primeira chegada pode ser determinada com precisão.

##### IV.7.1 - TÉCNICAS DE PRODUÇÃO DE PULSO

Três técnicas principais, são utilizadas para gerar pulsos: a) por meio/ de um explosivo; b) por uma pancada de martelo; c) por um transdutor eletro-acústico.

O explosivo e o martelo, podem gerar pulsos com energias maiores que as conseguidas por um gerador eletro-acústico e portanto são usados para / captação a longas distâncias e os estragos no espécime são tolerados; como no caso de propagação em grande distância em rochas ou solos, o explo

sivo é o mais usado.

Quando um pulso mecânico (fôrça aplicada durante curto intervalo de tempo) é aplicado num corpo de prova, a energia radiada da fonte, se propaga sob a forma de três diferentes vibrações elásticas. A mais rápida, é o deslocamento de partículas no material, que viajam na mesma direção do distúrbio provocado; é a chamada onda longitudinal ou compressional, onde a velocidade deste pulso foi dada pela expressão (IV.1.2). A propagação seguinte se dá sob a forma de ondas transversais com uma velocidade dada por /4/:

$$\beta^2 = \frac{G}{\rho} = \frac{gE}{2\rho(1 + \eta)} \quad (\text{IV.7.1})$$

onde  $\beta$  = velocidade de propagação transversal

$G$  = módulo de elasticidade de cisalhamento

Tanto as ondas longitudinais, como as transversais se propagam no material em tôdas as direções. Um terceiro tipo de onda que se propaga pela superfície - ondas de Rayleigh - tem sua velocidade dada por

$$\gamma^2 = p^2 \beta^2 \quad (\text{IV.7.2})$$

onde  $\gamma$  = velocidade de onda de Rayleigh

$p = 0,911$  para  $\eta = 0,2$

$= 0,928$  para  $\eta = 0,3$

Usualmente, os transdutores eletro-acústicos, são projetados para emitir vibrações longitudinais, pois este tipo de onda se propaga mais facilmente através dos filmes de líquidos usados para acoplar o transdutor ao corpo ensaiado e sendo a onda longitudinal a mais rápida com maior facilidade e com melhor precisão, se estabelece o momento da chegada, mesmo quando na presença de outros pulsos, como será visto.

#### IV.7.2 - REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DE PULSOS

As propriedades dos sólidos podem ser determinadas, pela propagação direta ou pela reflexão dos pulsos. A reflexão de um pulso, devido a uma / fronteira sólido-ar é a mais largamente usada para se determinar a espessura de um objeto ou a detecção de fissuras ou falhas internas. A propagação direta, é mais comumente usada para se determinar as propriedades elásticas de um material. No entanto, atualmente, a técnica de reflexão - ou de eco - está sendo cada vez mais utilizada, em todos os campos. Na técnica de transmissão é necessário se dispor de: a) dois transdutores; / b) ter acesso a duas faces do corpo de prova ou da estrutura, enquanto / que a técnica de reflexão ou de eco, utiliza somente um transdutor (emissor e receptor) e a necessidade de acesso a uma só face da estrutura ou corpo de prova.

Como inconveniente da técnica de eco pode-se citar o fato de, sendo o caminho percorrido no interior do meio duplo do no caso de transmissão, as energias geradas pelo transdutor (quando emissor) devem ser maior que no caso de transmissão. Além disso, é extremamente difícil se otimizar um / único transdutor para trabalho como emissor e receptor.

Quando um pulso longitudinal se propaga com uma velocidade através de uma interface de dois meios, há geralmente quatro pulsos resultantes na interface; compreendem um pulso longitudinal refletido (velocidade  $\alpha_1$ ), um pulso transversal refletido (velocidade  $\beta_1$ ), um pulso longitudinal refratado (velocidade  $\alpha_2$ ) e por fim, um pulso transversal refratado (velocidade  $\beta_2$ ).

A distribuição de energia entre os diferentes pulsos depende das velocidades relativas dos pulsos, das densidades relativas ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) dos / meios e do ângulo inicial de incidência. O pulso transversal não se forma nem nos líquidos, nem em incidências perpendiculares à interface entre dois meios sólidos. A quantidade de energia que é refletida ou transmitida depende da impedância acústica específica de ambos os meios. A impedância acústica específica é definida pela expressão:

$$Z_s = \rho c$$

onde  $c$  = velocidade de propagação.

Dois meios de impedâncias acústicas específicas  $Z_1$  e  $Z_2$  dão origem a uma reflexão  $r$  e uma transmissão  $\tau$  dadas pelas expressões /8/:

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (IV.7.3)$$

$$\tau = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (IV.7.4)$$

Quando as impedâncias acústicas específicas são muito diferentes entre / dois meios há uma reflexão máxima, pois o coeficiente de reflexão na fórmula (IV.7.3) tem seu maior valor. Isto acontece no caso da interface sólido-ar.

A impedância acústica específica para o concreto varia numa faixa de  $9 \times 10^5$  unidades cgs para concretos de baixa resistência até  $12 \times 10^5$  unidades cgs para concretos de alta resistência. Considerando que a impedância acústica específica da água é  $1,43 \times 10^5$  unidades cgs, o coeficiente de reflexão na interface concreto-água e vice versa, está entre 0,6 e 0,8.

No caso de um meio de pequena espessura, entre dois meios mais espessos, como a água ou o ar preenchendo fissuras ou rachaduras no concreto, a teoria da propagação de uma onda normal a esta fronteira /4/ mostra que: a) nenhum pulso, de amplitude significativa, é transmitido através até da mais fina rachadura no concreto, preenchida com ar; b) cerca de 10% a / 25% do pulso incidente será transmitido através de uma rachadura preenchida com água.

Um pulso pode circundar uma fissura ou rachadura e não passar através de

la; porém, neste caso, há um retardo na detecção. Num material com vazios, o pulso se difrata várias vezes e conseqüentemente leva mais tempo para se propagar. Experiências /4/ mostram que dois por cento de decréscimo / na densidade devido a vazios acarreta o decréscimo de 1% na velocidade / de propagação de um pulso longitudinal.

Para o caso de grandes vazios isolados, o problema torna-se mais difícil, visto que os grandes vazios causam uma pequena variação na velocidade do pulso. Por exemplo, em uma parede de lft de espessura com um transdutor / de 1 in de diâmetro, é necessário se ter um vazio de 4 in (área projetada) para produzir um decréscimo de 5% na velocidade do pulso.

No caso do concreto que foi considerado como meio homogêneo, tem-se dois componentes distintos; argamassa de cimento e agregados. Com suas impedâncias acústicas específicas, respectivamente,  $9 \times 10^5$  unidades cgs e /  $15 \times 10^5$  unidades cgs, várias reflexões se dão em cada fronteira agregado-argamassa, causando uma distorção no pulso recebido. Isto se dá particularmente, se o comprimento de onda for pequeno em comparação com a distância entre duas faces sucessivas.

Devido a heterogeneidade do concreto, o pulso detetado é mascarado.

Usa-se geralmente um sistema de transmissor receptor separado, com transdutores de 6 in de diâmetro com frequência natural de 60 kHz. As maiores dificuldades neste método são: a) é necessário áreas bastante grandes de concreto bem polido para se ter um perfeito acoplamento do transdutor / no sólido, com um líquido auxiliar; b) vibrações diretas se propagam ao longo da superfície dos corpos de prova e se sobrepõem às reflexões desejadas; c) é necessário uma superfície relativamente refletora.

#### IV.7.3 - EFEITOS NA PROPAGAÇÃO DO PULSO

i) HETEROGENEIDADE: um dos efeitos, já citado, é a distorção do pulso e aumento do seu caminho de propagação, devido às di -

frações sofridas nas fronteiras agregado-argamassa, principalmente quando o comprimento de onda é comparável com a distância entre duas fronteiras consecutivas /4/. Neste caso mostra-se que a velocidade de propagação é dada por:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{V_a}{\alpha_a} + \frac{(1 - V_a)}{\alpha_m} \quad (\text{IV.7.5})$$

onde  $\alpha_a$  = velocidade do pulso longitudinal no agregado

$\alpha_m$  = velocidade do pulso longitudinal na argamassa

$V_a$  = concentração em volume do agregado.

Outra dificuldade, é causada pelas variações entre medidas de tempo de trânsito em diferentes caminhos numa mesma dimensão. Estas variações dependem da distância percorrida pelo pulso, em relação ao tamanho das heterogeneidades; quando a dimensão torna-se relativamente grande, o erro proveniente da heterogeneidade torna-se pequeno e o material pode ser considerado, satisfatoriamente, como homogêneo.

ii) GEOMETRIA: este efeito ocorre quando as dimensões laterais do corpo de prova são comparáveis com o comprimento de onda das vibrações, como no caso de placas. Este efeito não é importante no concreto, nas dimensões e formas em que a técnica de pulso é usualmente aplicada.

iii) GRANULOMETRIA E ANISOTROPIA: certas rochas que têm planos cristalográficos bem definidos são muito anisotrópicas e a velocidade de pulso é menor, quando sua direção é transversal a estes planos, do que quando paralela a eles. O processo de compactação no concreto causa uma certa anisotropia. A velocidade de pulso na direção da compactação é poucos por cento abaixo do que a velocidade na direção perpendicular.

#### IV.7.4 - APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PULSO PARA ENSAIOS DO CONCRETO

Dos três métodos citados; a) martelo mecânico com intervalos de tempo ; b) martelo pulsado com oscilógrafo e c) método de pulso ultra-sônico, o que mais interessa para o objetivo desta dissertação é o último: é o que permite maior precisão nas medidas e nas condições de excitação das ondas elásticas.

O ensaio pela técnica de pulso ultra-sônico no concreto, foi desenvolvido na Inglaterra, para se ensaiar corpos de prova em laboratório e unidades em estrutura, onde os comprimentos variam de 4 in até 3 ft.

A técnica é produzir pulso ultra-sônico por excitação de cristais de / quartzo, e detetar por cristais similares ou cristais de sal Rochelle, / mais sensíveis. O tempo necessário para a propagação através do espécime de concreto, é medido por circuitos eletrônicos adequados.

Os sistemas de produção de pulsos ultra-sônicos canadense e britânico, diferem no fato de os transdutores terem frequências fundamentais diferentes, sendo 20 kHz e 150 kHz, respectivamente.

A técnica de transmissão ou transparência é utilizada, e os dois transdutores, são colocados em faces opostas. A energia acústica é transferida / do concreto para o transdutor e vice versa, por uma película de acoplante. Em concretos menos lisos, é necessário se usar como acoplante, óleo ou gelatina de sabão; em superfícies rugosas usa-se bentonita ou pasta / de kaolim. Superfícies muito rugosas, devem ter um tratamento especial / de gesso.

#### IV.7.5 - RELAÇÕES ENTRE A VELOCIDADE DE ONDA LONGITUDINAL E ALGUMAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Antes da velocidade de onda ser usada como indicação de certas propriedades do concreto, é necessário se conhecer a variação da velocidade com estas propriedades.



Ensaio foram feitos para se estudar o efeito da densidade, idade, relação água-cimento, relação cimento-agregado (traço) tipo de agregado, quantidade de umidade, etc /7/.

A relação da densidade na velocidade longitudinal é ilustrada no gráfico IV.7.1, onde há uma relação linear, com a velocidade aumentando 1,2% por cada 1% de aumento na densidade /7/.

A resistência do concreto depende da sua densidade e da sua idade. Pode-se esperar também uma relação definida entre a velocidade de onda longitudinal e a resistência do concreto, gráfico IV.7.2.

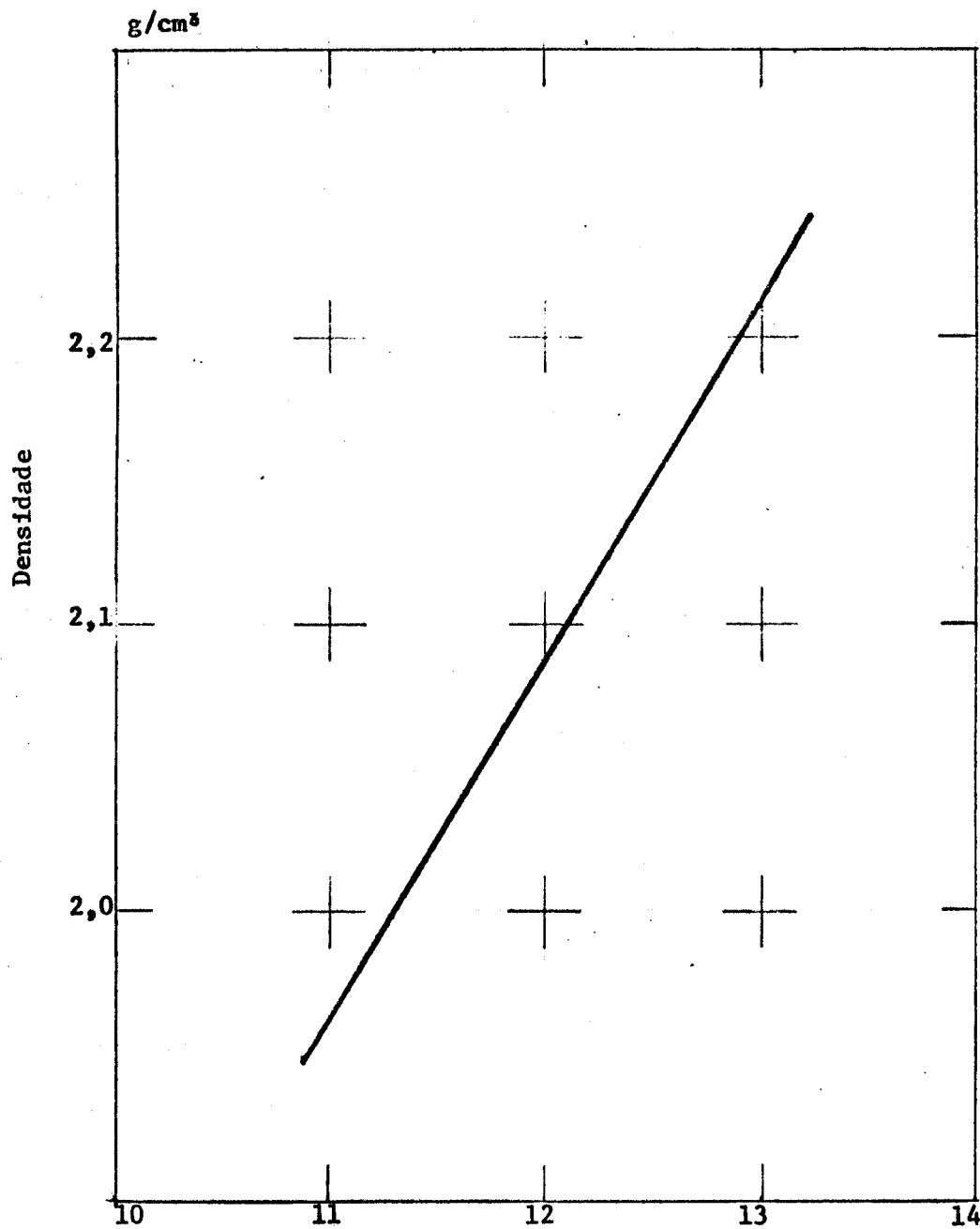
O tipo de agregado é normalmente assumido para não se ter efeito apreciável na mudança da resistência do concreto, porém, mostrou-se ter um efeito na velocidade de onda longitudinal como mostra o gráfico IV.7.3.

A relação entre a velocidade de onda longitudinal e o módulo de ruptura/entretanto é pouco afetado pelo tipo de agregado. Como o módulo de elasticidade do agregado gráudo é apreciavelmente maior que o da argamassa de cimento, espera-se que a velocidade de onda longitudinal possa ser maior, quanto maior a proporção do agregado na mistura, como ilustrado no gráfico IV.7.4.

A velocidade de onda é maior no espécime saturado que num sêco, e a transição entre a saturação e a secagem é rápida no início tornando-se mais suave quando o corpo de prova está próximo de totalmente sêco.

A relação entre a velocidade de onda e as várias propriedades do concreto, tem que ser determinada experimentalmente e u'a maior precisão é obtida se a velocidade de onda num corpo de prova de concreto, similar ao espécime testado, for determinada.

Assim, os corpos de prova podem ser feitos no mesmo tempo que a estrutura e ensaios tanto por rompimento, como pela velocidade de propagação /



Velocidade da onda longitudinal

ft/seg × 10³

GRÁFICO IV.7.1 - Relação entre a densidade e a velocidade longitudinal de onda.

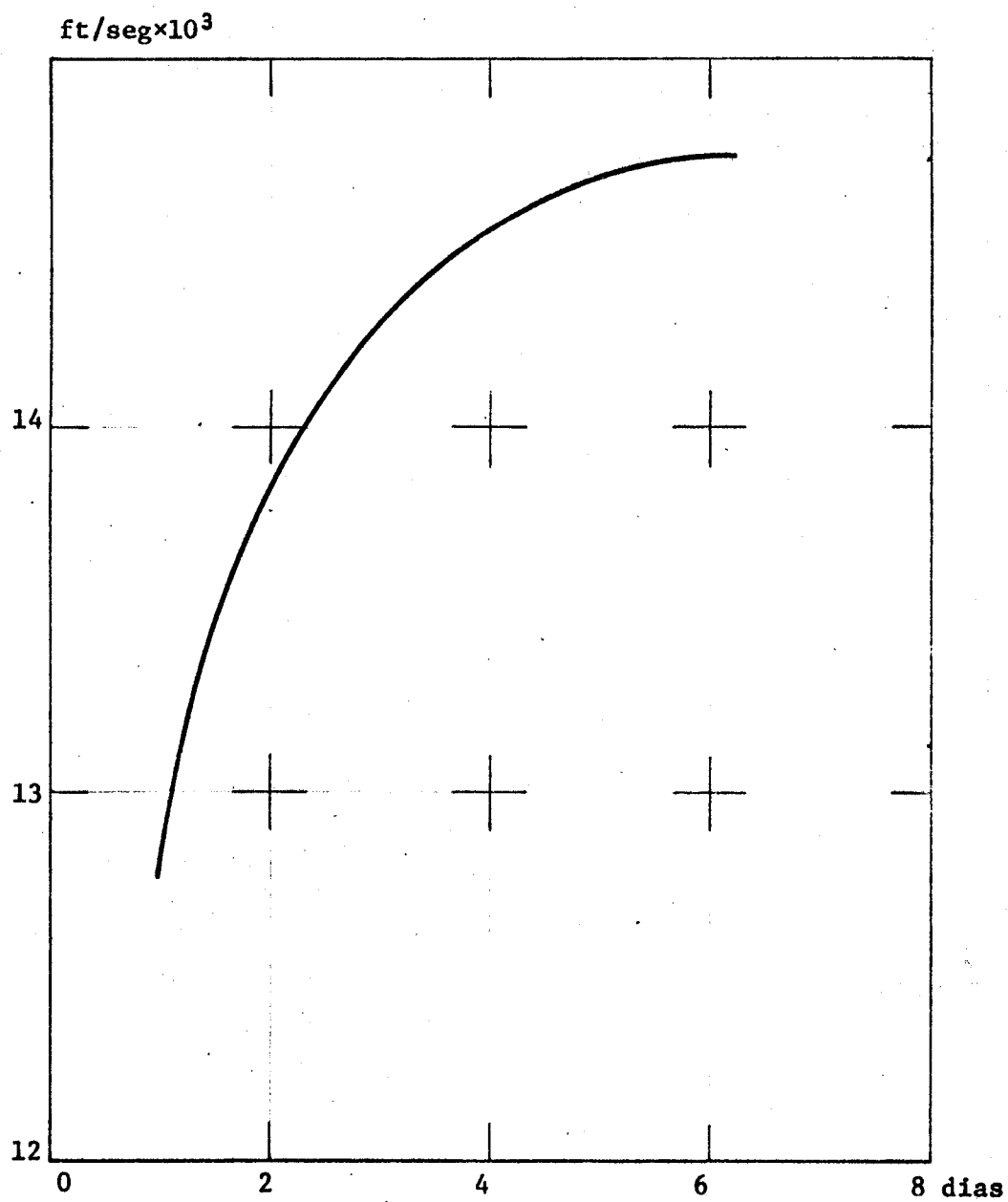


GRÁFICO IV.7.2 - Relação entre a velocidade de propagação da onda longitudinal e a idade do corpo de prova de concreto.

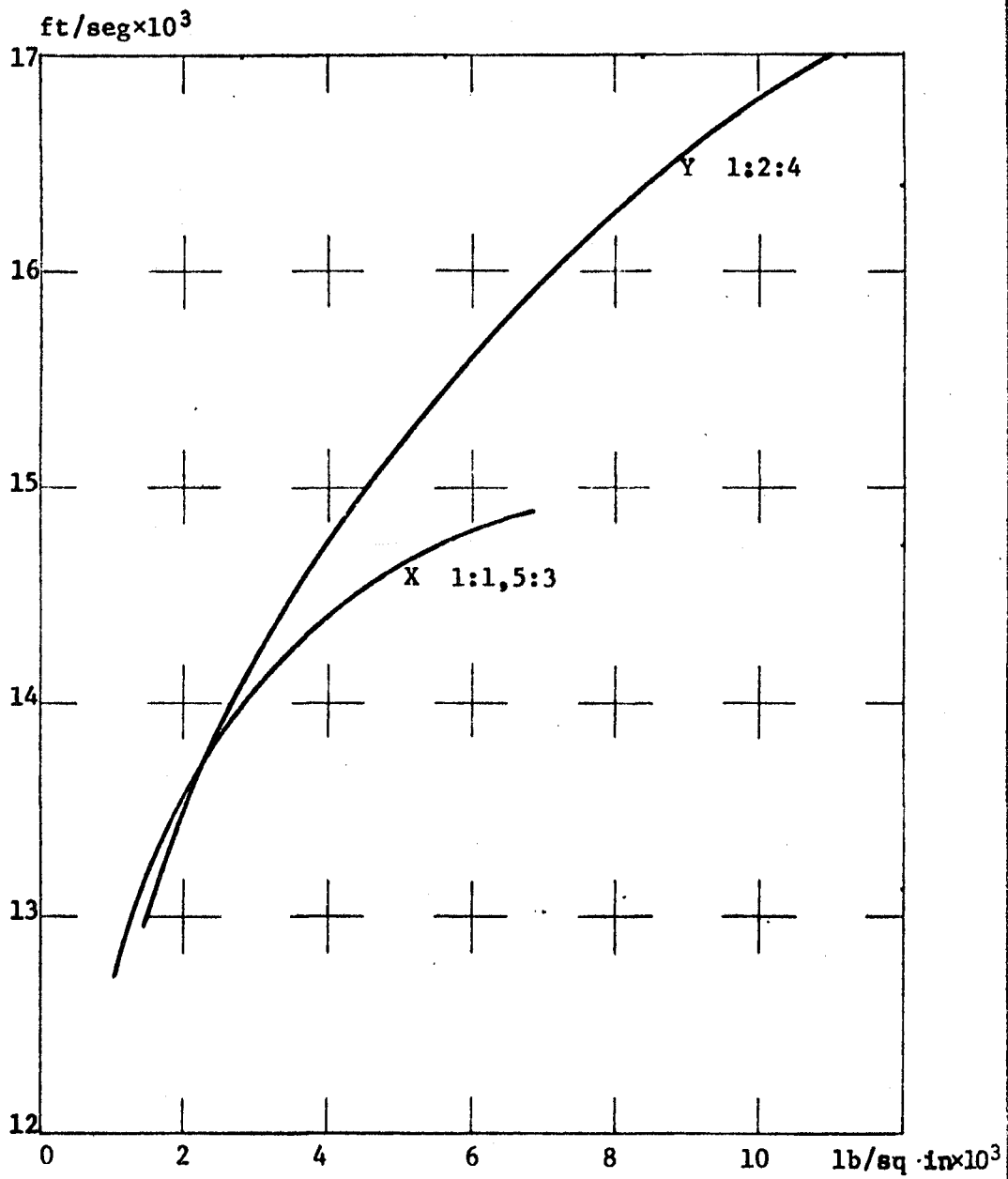


GRÁFICO IV.7.3 - Relação entre a velocidade de propagação da onda longitudinal e a resistência do concreto em corpos de prova com dois traços diferentes.

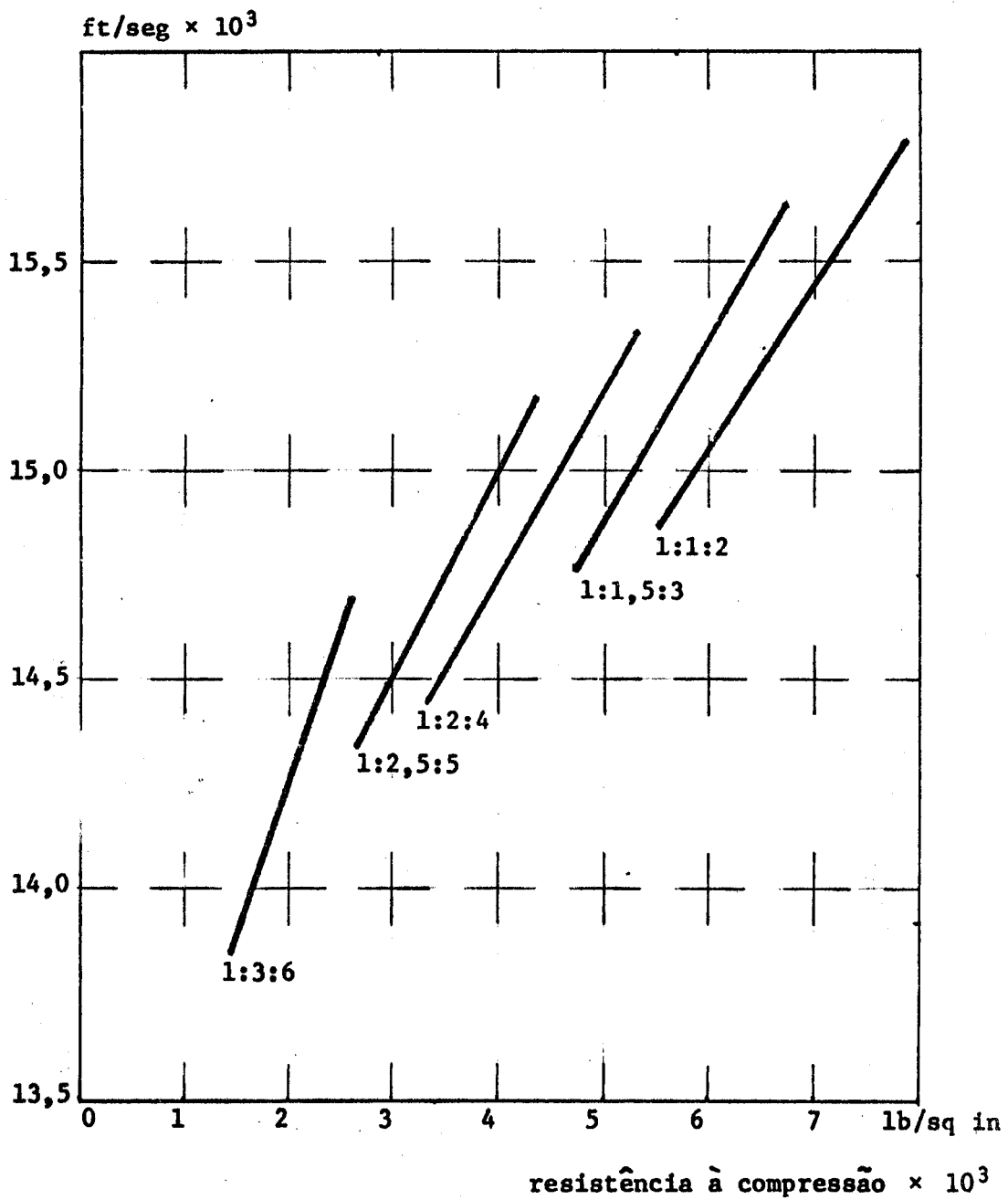


GRÁFICO IV.7.4 - Relação entre a velocidade da onda longitudinal e a resistência do concreto a 28 dias.

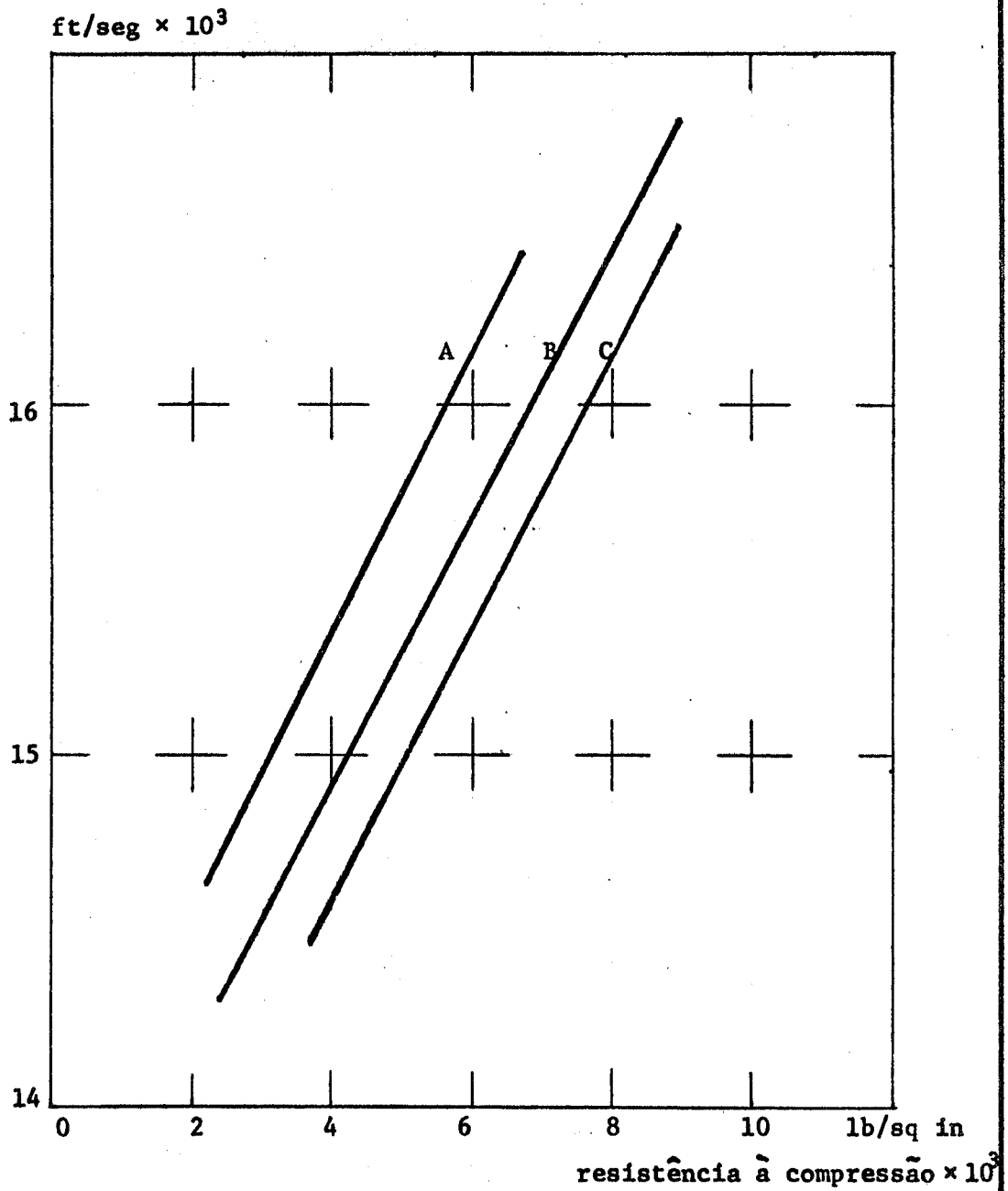


GRÁFICO IV.7.5 - Efeito do tipo de agregado na relação entre a velocidade da onda longitudinal e a resistência à compressão - A-pedra calcária B-granito; C-cascalho.

nas idades de 3,7,14 e 28 dias e a relação entre a velocidade de onda e a resistência pode ser conseguida.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Desta dissertação onde foram apresentados: a) os parcos resultados encontrados sobre efeito da temperatura nas constantes elásticas do cimento e concreto; b) os métodos ultra-sônicos para ensaio de cimento e concreto, pode-se concluir: i) que o intervalo de temperatura entre 20°C e 250°C apresenta-se como de alto interêsse para a aplicação de estruturas de concreto protendido em vasos de pressão de reatores nucleares; ii) que o emprego sistemático das técnicas próprias do método ultra-sônico pode dar uma contribuição importante para a compreensão dos mecanismos responsáveis pela ação de temperaturas, naquela faixa.

Considerando que os vasos de pressão de reatores nucleares são estruturas que devem trabalhar, submetidos a temperaturas e gradientes de temperaturas variáveis durante toda a vida útil da central nuclear (25 a 30 anos);

Considerando o alto custo de tais estruturas e a impossibilidade de reparos, principalmente devido às radiações que resultam da ativação pelo / bombardeio de neutrons rápidos e/ou térmicos.

Considerando ainda, que, no Brasil, espera-se um emprego importante de tais vasos de pressão, substituindo, com vantagens, os de aço até agora/ utilizados nos reatores tipo BWR e PWR, é perfeitamente justificável a ênfase em se estabelecer, no IEA, um laboratório de ensaio de corpos de prova e de estruturas de interêsse para tais aplicações. Neste laboratório, utilizando ao lado dos métodos convencionais, o método de ensaio ultra-sônico, dever-se-ão desenvolver pesquisas que possam assegurar, / que os vasos de pressão, a serem construídos, possam ser estruturas/



seguras, trabalhando em condições que, garantindo esta segurança, sejam/as mais econômicas.

É um programa ambicioso a ser desenvolvido a longo prazo; espera-se que esta dissertação possa ser considerada uma contribuição para a difícil fase de sua implantação, que ora se inicia.

#### UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS NOS EFEITOS DE TEMPERATURA NO CIMEN-TO E CONCRETO

No capítulo III foi indicado que a retração da alita no concreto pode / ter uma influência importante no comportamento das estruturas de concre- to protendido utilizadas em vasos de pressão de reatores nucleares.

As experiências de Lachaud /2/ levaram a sugerir que, sob a ação de temperaturas inferiores a 250°C, há perda de água e retração da fase (SCH) seguida de um reajustamento destas partículas, que permite a conservação das forças de ligação. Tal perda de água, mesmo com reajusta- mento, devem levar ao aparecimento de microfissuras ou mesmo fissuras.

Pode-se, assim, esperar que uma crescente elevação da temperatura de tra- balho do concreto produza: a) um reajustamento da fase (SCH), alterando/ as propriedades elásticas do conjunto argamassa-agregado; b) o apareci- mento de microfissuras na argamassa.

Na exposição feita das técnicas de ensaios ultra-sônicos, foi mostrado / que tanto na técnica de ressonância como na de pulso, variações das cons- tantes elásticas e microfissuras podem ser observadas.

De fato, as variações das constantes elásticas influem diretamente quer na frequência de ressonância de um corpo de prova, quer na velocidade de propagação de um pulso; ao passo que a atenuação - medida através do de- cremento logarítmico ou da análise da forma da curva de ressonância - de- penderá bastante da presença de microfissuras.

Dada a importância - a que já foi feita referência - do conhecimento o mais completo possível, do mecanismo ou mecanismos responsáveis pela ação da elevação de temperatura de trabalho em estruturas de concreto pretendidas utilizadas em vasos de pressão de reatores nucleares, será desejável se utilizar, quando possível, todas as técnicas possíveis de fornecer dados que direta ou indiretamente revelem aqueles mecanismos .

Numa primeira fase do trabalho de pesquisa, que ora se desenvolve no IEA, está-se utilizando a técnica de ressonância e, até o presente, os esforços têm sido concentrados na identificação segura das frequências de ressonância. Os resultados destas experiências não são apresentados nesta / dissertação, dado o caráter preliminar dos mesmos.

Simultaneamente, especial ênfase está sendo dada ao estudo: a) das condições de aquecimento do corpo de prova; b) da medida de temperaturas em vários pontos internos; c) do acoplamento transdutor-corpo de prova.

A utilização da técnica de pulso está também sendo iniciada\*, com ênfase posta nos itens acima mencionados.

---

\* O autor aproveita a oportunidade para agradecer ao Contrôlo Tecnológico de Concreto L. A. Falcão Bauer a cooperação recebida.

## APÊNDICE 1

### CARACTERÍSTICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÕES LONGITUDINAIS

TIPO DE ENSAIO: - vibrações longitudinais

- B.S. 1881 : 1952 /6/
- ASTM Designation : C 215 - 60 /5/.

FORMA DO CORPO DE PROVA: prismas e cilindros

PARÂMETROS USADOS: - frequência de ressonância " $n_0$ "  
- coeficiente de atenuação "Q".

PARÂMETROS OBTIDOS: - módulo de elasticidade dinâmico, ou módulo dinâmico de Young, " $E_d$ ".  
obs.: a densidade do material é requerida.

APLICAÇÕES: - para o controle da qualidade do concreto (geralmente em ensaios em laboratório).  
- variação das constantes elásticas - deteriorização - do concreto, devido ao fogo, congelamento e agentes químicos.

VANTAGENS: - ensaios repetitivos podem ser feitos em um espécime  
- reprodutibilidade boa e precisa  
- somente um operador é suficiente na operação do ensaio.

DESVANTAGENS: - ensaio aplicado restritamente a corpos de prova  
- o ensaio em campo, torna-se bastante difícil.

## APÊNDICE 2

### CARACTERÍSTICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÕES TRANSVERSAIS

TIPO DE ENSAIO: - vibrações transversais  
- ASTM Designation: C 215 - 60 /5/.

FORMA DO CORPO DE PROVA: - prismas  
- cilindros.

PARÂMETROS USADOS: - frequência de ressonância, " $n_0$ "  
- coeficiente de atenuação, "Q".

PARÂMETROS OBTIDOS: - módulo de elasticidade dinâmico, ou módulo dinâmico de Young, " $E_d$ ".  
obs.: são necessários, o coeficiente de Poisson  $\eta$  e a densidade  $\rho$ .

APLICAÇÕES: - para o controle da qualidade do concreto (geralmente em ensaios em laboratórios)  
- variação das constantes elásticas - deteriorização - do concreto, devido ao fogo, congelamento e agentes químicos.

VANTAGENS: - ensaios repetitivos podem ser feitos em um espécime  
- reprodutibilidade boa e precisa  
- somente um operador é suficiente na operação do ensaio.

DESVANTAGENS: - ensaio aplicado restritamente a corpos de prova  
- o ensaio em campo, torna-se bastante difícil.

### APÊNDICE 3

## CARACTERÍSTICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÕES DE TORÇÃO

TIPO DE ENSAIO: - vibração de torção  
- ASTM Designation: C 215 - 60 /5/.

FORMA DO CORPO DE PROVA: - prismas  
- cilindros.

PARÂMETROS USADOS: - frequência de ressonância, " $n_0$ "  
- coeficiente de atenuação, "Q".

PARÂMETROS OBTIDOS: - módulo dinâmico de rigidez, ou módulo dinâmico de elasticidade quanto ao cisalhamento, "G".  
obs.: a densidade  $\rho$  é requerida.

APLICAÇÕES: - para o controle da qualidade do concreto (geralmente em ensaios em laboratório)  
- variação das constantes elásticas - deteriorização - do / concreto, devido ao fogo, congelamento e agentes químicos.

VANTAGENS: - ensaios repetitivos podem ser feitos em um espécime  
- reprodutibilidade boa e precisa  
- somente um operador é suficiente na operação do ensaio  
- pode ser combinado com a vibração longitudinal para a determinação do coeficiente de Poisson.

DESVANTAGENS: - ensaio aplicado restritamente a corpos de prova  
- o ensaio em campo, torna-se bastante difícil  
obs.: este ensaio não é muito usado.

#### APÊNDICE 4

### CARACTERÍSTICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PELA TÉCNICA DA PROPAGAÇÃO DE PULSO ULTRA-SÔNICO

TIPO DE ENSAIO: - pulso ultra-sônico

FORMA DO CORPO DE PROVA: - cubos

- prismas

- o próprio elemento da estrutura.

PARÂMETROS USADOS: - velocidade de pulso.

PARÂMETROS OBTIDOS: - resistência à compressão (do material).

APLICAÇÕES: - ensaios de laboratório por vibrações longitudinais

- ensaios do concreto no local, para se determinar a sua resistência.

VANTAGENS: - qualquer concreto pode ser ensaiado

- podem ser medidas as variações das constantes elásticas

- medidas de resistência dos corpos de prova, podem ser feitas

- ensaios repetitivos podem ser feitos em um único corpo de prova.

DESVANTAGENS: - aparelhagem extensa e complexa

- mais de um operador é necessário

- precisão dos resultados depende da precisão do operador.

- normalmente é necessário o acesso a duas faces opostas / do espécime a ser ensaiado

- preparação especial das faces quanto à rugosidade.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA E CITADA

- /1/ Neville, A.M. - PROPERTIES OF CONCRETE - Sir Isaac Pitman & Sons, Inc. - New York
- /2/ Lachaud, R. - LE COMPORTEMENT DU CIMENT À LE CHALEUR - Materiaux/ et constructions - Vol. 1 - n° 4 - 1968
- /3/ Brunauer et Greenberg - 4º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DA QUÍMICA DO CIMENTO - Washington - 1960
- /4/ Jones, R. - NON DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE - Cambridge University Press - 1962
- /5/ AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS - (ASTM) - Vol. 10 - Philadelphia
- /6/ British Standard - METHODS OF TESTING CONCRETE - BS - 1881:1952  
British Standards Institution - London
- /7/ Orchard, D.T. - CONCRETE TECHNOLOGY - John Wiley & Sons, Inc.-  
New York
- /8/ Nepomuceno, L.X. - TECNOLOGIA ULTRA-SÔNICA - Anotações do Curso de Tecnologia Ultra-Sônica - Laboratório de Acústica e Sônica - São Paulo
- /9/ ADVANCED AND HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTORS PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM ON ADVANCED AND HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTORS  
- IAEA - Julich - Oct 1968

**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

- Hueter e Bolt - SONICS - John Wiley & Sons, Inc. - New York - 1955
- Whitehurst, E.A. - EVALUATION OF CONCRETE FROM SONIC TEST - Iowa State /  
University Press - Ames, Iowa - 1966
- Petrucci, E.G. - CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND - Associação Brasileira de  
Cimento Portland - São Paulo - 1968
- Powers, T.C. - THE PHYSICAL STRUCTURE AND ENGINEERING PROPERTIES OF CON-  
CRETE - From a Lecture on Cement and Concrete Association  
London - 1956
- Babikov, O.I. - ULTRASONICS AND ITS INDUSTRIAL APPLICATION - Consultants  
Bureau - New York - 1960
- Berger, H. - NON DESTRUCTIVE TESTING - One of the Series on "Understan-  
ding the Atom" - U. S. A. E. C.
- Jones, R. - ULTRASONIC PULSE MEASUREMENTS TO STUDY THE RATE OF HARDE- /  
NING OF SOIL CEMENT - Journal of Applied Chemistry - /  
May 1956
- Jones & Wettern - TESTING THE STRENGTH OF CONCRETE BY THE ULTRASONIC -  
PULSE METHOD - Concrete and Constructional Engineering  
November 1954
- Whitehurst, E.A. - PULSE VELOCITY TECHNIQUES AND EQUIPMENT FOR TESTING /  
CONCRETE - Highway Research Board Proceedings - /  
Jan 1964