

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO CONCRETO JOVEM

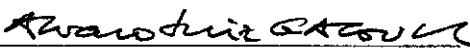
Robson Luiz Gaiofatto

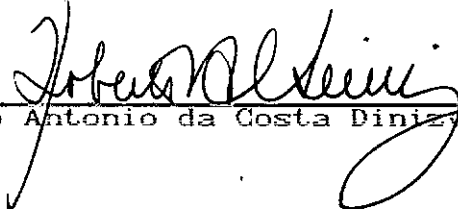
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:


Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn(Dr. Ing.)


Prof. Yoshiaki Nagata(D.Sc.)


Prof. Alvaro Luiz G. A. Coutinho(D.Sc.)


Eng. Roberto Antonio da Costa Diniz(Dr. Ing.)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 1988

GAIOFATTO, ROBSON LUIZ

Análise teórico-experimental do Concreto
Jovem [Rio de Janeiro] 1988

XI, 143 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 1988)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. concreto jovem I. COPPE/UFRJ

II. Título (série).

à minha mãe
à minha esposa

Agradeço,

ao professor Eduardo M. R. Fairbairn, pela orientação e pelo estímulo dispensado durante a realização deste trabalho;

aos professores do PEC/COPPE pelos conhecimentos transmitidos durante o período de curso;

à equipe do Laboratório de Estruturas, na pessoa do prof. Nei Roitman, pelo apoio concedido;

aos professores Yosiaky Nagato pelas sugestões nos ensaios e Alvaro Coutinho pelo incentivo geral;

ao Engenheiro Roberto Diniz pelo apoio e dedicação à pesquisa;

ao Engenheiro Nilson Correa de Meneses pelo envio de publicações da biblioteca do CEBTP na França;

aos funcionários do Laboratório de Estruturas pela colaboração prestada de uma forma geral e nas esticadas fora do horário de forma especial;

aos companheiros da COPPE, em especial ao Geraldo, Paraná e Henrique pelas orientações e estímulos;

à minha esposa Anita M. S. Gaiofatto, o constante estímulo e apoio durante toda a longa caminhada, sacrificando muitas horas de lazer e convívio;

à minha filha Mayara, pelo ânimo transmitido em seu sorriso;

à minha mãe por tudo o que fez por mim;

aos meus amigos, pelo incentivo e compreensão ao longo do caminho;

ao CNPQ, pelo apoio financeiro;

à COPPE/UFRJ pelo incentivo à pesquisa;

a todos aqueles que, de um ou de outro modo colaboraram para a realização deste sonho em forma de trabalho.

Resumo de Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO CONCRETO-JOVEM

Robson Luiz Gaiofatto

Outubro , 1988

Orientador: Eduardo M. R. Fairbairn

Programa: Engenharia Civil

O trabalho acima entitulado tem como principal objetivo o estudo do comportamento reológico do concreto em suas primeiras idades, incluindo o conhecimento de seu comportamento sob diversos aspectos até idades na ordem de tres dias após a mistura ter se efetivado.

O desenvolvimento desta pesquisa tem por base os estudos já em andamento por diversos pesquisadores em todo o mundo, entre eles podendo-se citar, Bazant, Panula, Wilson, Byfors, Emborg, que apresentaram trabalhos sob os aspectos reológicos do concreto em sua fase mais importante de endurecimento, ou seja, onde suas características tem mutações acentuadas em intervalos de tempo extremamente reduzidos.

Estes estudos compreendem a realização de ensaios em laboratório onde corpos de prova de concreto com 8 horas de idade ou menos, são submetidos a deformações impostas constantes para que se possa medir a relaxação do esforço aplicado sendo acompanhadas ainda a retração através de corpos de prova testemunhos, o desenvolvimento de seu módulo de elasticidade com o emprego de corpos de prova cilíndricos, bem como a variação de temperatura que ocorre no interior destes elementos oriundas das reações exotérmicas do cimento, as quais podem provocar esforços (tensões) insuportáveis para certas estruturas.

Paralelamente aos ensaios de laboratório, são desenvolvidos estudos teóricos que permitem a modelização matemática e conseqüente simulação numérica-computacional do fenómeno. Os valores fornecidos por estes modelos são comparados com os resultados obtidos dos ensaios.

O conhecimento das características do concreto jovem apresenta pontos favoráveis de aplicação voltados para o projeto e construção de barragens (velocidade, espessura das camadas), utilização de formas deslizantes nas construções convencionais e análise das tensões internas que ocorrem nos concretos durante a fase em que, geralmente, os mesmos acham-se no interior das formas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UF RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

THEORETICAL-EXPERIMENTAL ANALISYS OF THE CONCRETE AT EARLY AGES

Robson Luiz Gaiofatto

October, 1988

Thesis Supervisor: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Department: Civil Engineering

The research entitled above has as its main objective the study of the rheologic behavior of the concrete at its first ages, including the knowlegde of its behavior under several aspects until the third day after casting.

The development of this research is based on studies already being carried out by several researchers all over the world, among whom we can find Bazant, Panula, Wilson, Byfors and Emborg. These related studies concern the rheological aspects of the concrete in its most important hardening phase, that is, when its characteristics have significative variations at extremely reduced time intervals.

These studies comprise the performance of experiments in laboratory, where specimens of concrete, around eight hours after cast, are submitted to constant strains. In this way the relaxation of the effort applied, can be measured and can also be observed the companion specimens which are witness. Further the development of the resistance under compression and the development of Young's module can be measured utilizing cylindrical specimens, as well as the variation of temperature that occurs inside

these specimens coming from the exothermic reactions of the cement, which can provoke intolerable efforts (stresses) for certain structures.

Simultaneously to the laboratory experiments, theoretical studies are developed allowing the mathematical modelling and consequent numerical-computational simulation of the phenomenon. The values provided by these models will be compared with results obtained from the experiments.

The knowledge about the characteristics of the young concrete shows favorable points of application aiming the project and the construction of dams (velocity, thickness of the layers), the utilization of sliding moulds in the conventional construction and the analysis of the internal tensions that occur in the concretes during the phase in which these concretes are found in the interior of the moulds.

INDICE

I - INTRODUÇÃO	1
II - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	4
II.1 - O CONCRETO JOVEM	4
II.2 - PROPRIEDADES MECANICAS DO CONCRETO JOVEM	6
II.2.1 - GRAU DE HIDRATAÇÃO	7
II.2.2 - RESISTENCIA A COMPRESSÃO	8
II.2.3 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL	12
II.2.4 - FLUENCIA (CREEP)	17
II.2.5 - RELAXAÇÃO (RELAXATION)	26
II.2.6 - RETRAÇÃO (SHRINKAGE)	28
III - MODELAGEM TEÓRICA	33
III.1 - MODELOS MATEMATICOS	33
III.2 - MÉTODOS INTEGRAIS E DIFERENCIAIS	41
III.3 - RELAÇÕES ENTRE FLUENCIA E RELAXAÇÃO	42
IV - DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS FUNÇÕES DE RELAXAÇÃO	46
IV.1 - CURVAS DE RELAXAÇÃO OBTIDAS DAS FUNÇÕES DE FLUENCIA	46
IV.1.1 - FUNÇÃO DE BYFORS E PFEFFERLE	46
IV.1.2 - FUNÇÃO DO CEB	48
IV.1.3 - FUNÇÃO DO ACI	49
IV.1.4 - FUNÇÃO DE BAZANT	50
IV.1.5 - FUNÇÃO DE BAZANT-PANULA	51
IV.1.6 - FUNÇÃO DE WILSON	52
IV.2 - APLICAÇÃO DO MODELO DE MAXWELL (SÉRIE DE DIRICHLET	54
V - LABORATÓRIO - DETERMINAÇÕES EXPERIMENTAIS	56
V.1 - OBJETIVOS	56
V.2 - MONTAGEM DOS ENSAIOS E PRÉ-ENSAIOS	57
V.3 - ELEMENTOS DOS ENSAIOS	66
V.3.1 - CONCRETO UTILIZADO	66

V.3.2 - CORPOS DE PROVA	66
V.3.3 - CURA	66
V.3.4 - DESFORMA	67
V.3.5 - MAQUINA DE CARGA	67
V.3.6 - DEMAIS EQUIPAMENTOS	69
V.3.7 - CORREÇÕES	70
V.4 - PRIMEIRO ENSAIO DE RELAXAÇÃO	71
V.5 - SEGUNDO ENSAIO DE RELAXAÇÃO	73
V.6 - TERCEIRO ENSAIO DE RELAXAÇÃO	78
V.7 - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	83
V.8 - ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO LOGITUDINAL	84
V.9 - TEMPERATURA	86
VI - ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL	91
VI.1 - ANÁLISE DAS FUNÇÕES EMPÍRICAS	91
VI.1.1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	91
VI.1.2 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL	94
VI.2 - GERAÇÃO DAS CURVAS DE RELAXAÇÃO DO CONCRETO JOVEM	97
VII - DISCUSSÕES	111
VIII - CONCLUSÕES	114
IX - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
ANEXO 1	121
ANEXO 2	123
ANEXO 3	127

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Como todos os materiais que sofrem envelhecimento, ou seja, que tem suas características alteradas ao longo do tempo, o concreto sofre diversas modificações com a idade, como resistência, módulo de elasticidade, etc., bem como sofre inclusive modificação de dimensões (deformações). Sabe-se ainda, que de acordo com as condições de cura do concreto, idades dos primeiros carregamentos, condições de carregamentos e seus valores, temos alterações extremamente marcantes nas futuras características deste material. Daí, a preocupação com o conhecimento do seu comportamento nas primeiras idades, a fim de que não sejam geradas condições danosas ou comprometedoras à "idade adulta" do concreto.

Ao se desenvolver uma análise mais detalhada sobre a importância do comportamento do concreto nas "idades jovens", constata-se ainda que, devido ao seu processo de hidratação (reações exotérmicas) surgem em muitas vezes, fissuras nos elementos recém-concretados, muito além das admissíveis, tornando-os inclusive sem condições de uso, como é o caso das barragens, reservatórios e das estruturas submersas em geral.

De uma forma geral o conhecimento das características de comportamento do concreto jovem é de fundamental importância em todas as obras onde o concreto seja utilizado, pois, é a partir dos cuidados e atenções dispensados a este material em seu início de vida que se obterá um bom ou mau concreto durante a sua vida útil, além do que, de forma especial em alguns tipos de obras específicas pode-se alterar características construtivas de

fundamental importância seja quanto ao aspecto financeiro ou quanto ao de segurança, como é o caso da velocidade e espessura das camadas de concreto massa, ou da velocidade de deslocamento das formas deslizantes.

Este trabalho procura mostrar, de acordo com o material disponível sobre o assunto e de acordo com ensaios realizados, conclusões e considerações teóricas e/ou práticas sobre as características do concreto, enquanto jovem, de uma forma específica. É feita uma revisão dos modelos matemáticos e, a seguir, busca-se nas diversas linhas de pesquisas existentes, conclusões sobre comportamentos determinados procurando-se discutir prós e contras de cada uma delas. Na parte prática objetiva-se uma visão clara e comparativa das características especiais do concreto em suas primeiras idades, alcançando-se importantes detalhes e abrindo-se caminho para as mais variadas discussões tanto sobre as técnicas de ensaio empregadas, bem como sobre os resultados obtidos.

Entre os poucos trabalhos disponíveis sobre o tema abordado tem-se o apresentado nos anais do congresso da RILEM/1982,[15] em Paris sobre o concreto jovem, onde diversos papers com variadas aplicações são apresentados. O trabalho de NEVILLE, DILGER e BROOKS [01] "Creep of Plain and Structural Concrete" de 1983 e o de JAN BYFORS [04] "Plain Concrete at Early Ages" de 1980 são especialmente completos e esclarecedores sobre o assunto, além, é claro dos diversos trabalhos do professor BAZANT (EUA) [03,11,32 e 33].

Sabe-se ainda, inicialmente que como todas as características do concreto em geral, aquelas ligadas ao seu comportamento enquanto jovem são também influenciadas por uma vasta gama de fatores, entre os quais, traço da mistura, tipo do cimento e agregados e relação água-cimento, sendo o seu estudo e acompanhamento consideravelmente dificultado pelas condições necessárias de ensaio como será visto mais adiante.

Finalmente, é objetivo básico deste trabalho uma ampliação e maior divulgação das características de comportamento do concreto jovem, além é claro, da fixação de conceitos e verificação de sua validade, bem como do desenvolvimento de métodos de ensaio para este material, bastante "novo" ao se considerar o volume de literatura e conhecimento disponíveis.

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

II.1 - O CONCRETO JOVEM

Na análise reológica do concreto faz-se primordial a determinação de o que vem a ser concreto jovem. JAN BYFORS [04] em seu trabalho "Plain concrete at early ages" considera uma definição na qual estaria o desenvolvimento do concreto dividido em quatro fases fundamentais a saber:

- concreto fresco
- concreto jovem
- concreto quase-endurecido
- concreto endurecido

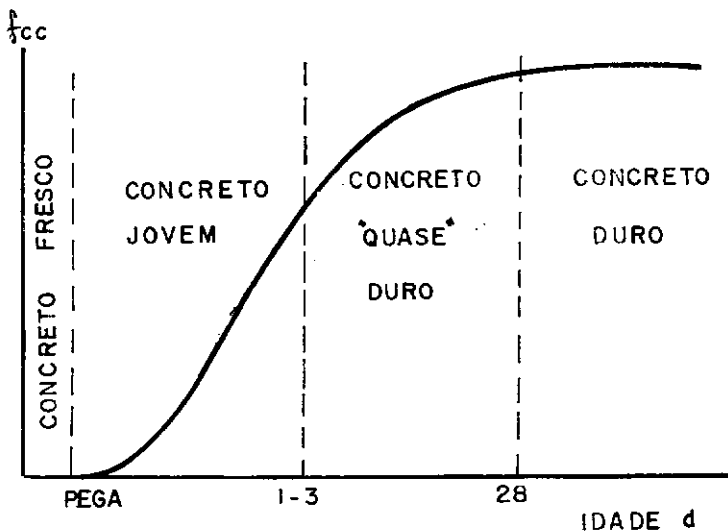


FIG. II.1 - PROCESSO DE ENDURECIMENTO DO CONCRETO.

Considera-se o concreto como fresco, a partir do momento da mistura até onde começa o estágio do endurecimento, ou seja, o concreto é fresco enquanto pode ser moldado. Esta primeira etapa dura em geral na ordem de 4 a 6 horas.

A seguir entra-se na fase do concreto jovem propriamente dito, onde, como pode ser observado no gráfico, é o tempo em que o concreto adquire a maior parte de sua resistência (ganho exponencial de resistência), sendo assim, uma época determinante para os seus padrões definitivos. Após algumas horas de vida, quando tem sua deformabilidade fortemente reduzida, o concreto ingressa nesta etapa, aí permanecendo até um ou mais dias de idade quando então o processo de endurecimento é consideravelmente reduzido, iniciando-se a fase do concreto quase-duro, a qual avança até 28 dias quando já na fase do concreto duro suas propriedades atingem um grau de estabilização avançado.

Durante a fase mais importante para o concreto, sob o ponto de vista da definição de seus defeitos e qualidades - concreto jovem - tendo em vista a grande variação das características do material, as suas condições para desenvolvimento são de fundamental importância. DAVIS citado em [01] mostra que a variação da fluência durante as primeiras semanas é muito maior quanto antes tenha sido carregado o concreto. GLANVILLE citado em [01] e outros demonstram que para idades de aplicação de carga menores que 28 dias a influência desta idade (de aplicação da carga) na fluência é fortemente considerável.

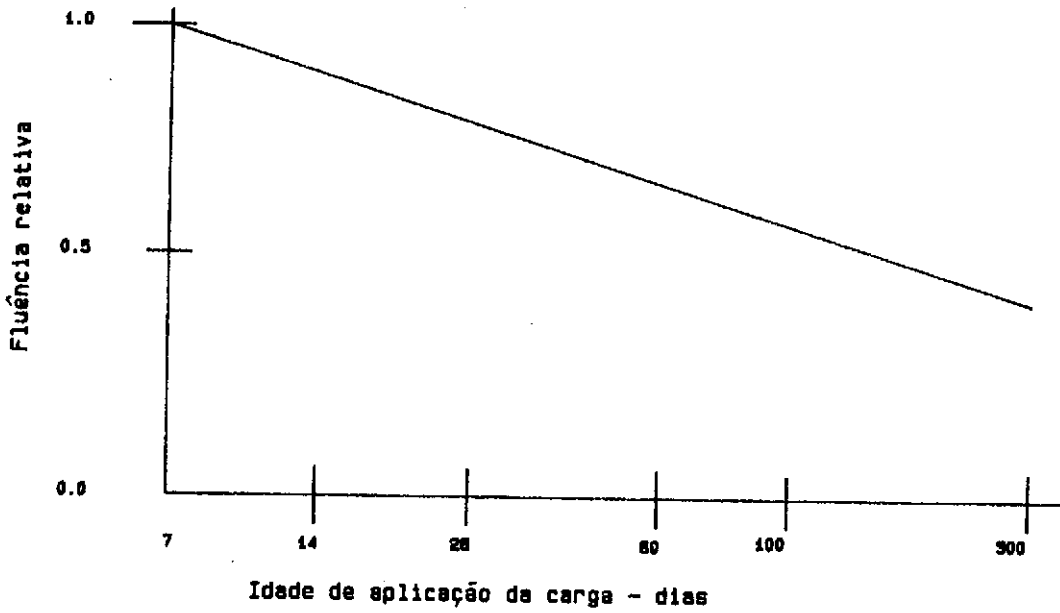


FIG.II.2 - Influência da idade de carregamento

Conclui-se, então que, será considerado concreto jovem, o concreto a partir do momento em que deixa de ser moldável, cerca de 6 horas (a $\pm 23^{\circ}\text{C}$), até aproximadamente 3 dias, quando apresenta uma maior estabilidade quanto ao progresso de suas propriedades mecânicas.

II.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO JOVEM

A seguir será apresentada uma revisão das

propriedades mecânicas do concreto procurando-se alertar para a importância específica de cada uma delas nas primeiras idades do concreto.

II.2.1 - Grau de hidratação

O termo grau de hidratação (α) define o quanto as reações entre cimento e água tem se desenvolvido. α será zero, se as reações não se iniciaram e α será 1 (um) se as mesmas já estiverem concluídas. A hidratação do cimento é baseada em várias reações químicas simultâneas. Existe uma relação linear com aproximação satisfatória entre a resistência à compressão e o grau de hidratação. Assim sendo, entre outros fatores, um acréscimo na temperatura aumentará a razão de hidratação e por consequência a resistência crescerá.

Numerosos fatores influenciam o processo de hidratação e seus efeitos são particularmente marcantes durante a fase do "concreto jovem". Entre os principais fatores podem ser citados: cimento, relação água-cimento, temperatura, mistura e condições de cura. O cimento influencia o processo de hidratação de forma especial através da sua composição química e do seu grau de finura. Sabe-se que o C_3S (Silicato tricalcico) é o componente do clínquer que dá maior contribuição durante a fase jovem do concreto, pois, um aumento de sua proporção na mistura antecipa e aumenta a quantidade de calor liberado, aumentando assim o grau de hidratação. Em sequência virão o C_2S (Silicato dicalcico), o C_3A (Aluminato tricalcico) e o C_4AF (Ferro aluminato tetra calcico) sendo os dois últimos de importância muito reduzida.

Quanto à relação água-cimento, o mesmo aumenta o grau de hidratação à medida que aumenta, entretanto, na juventude do concreto não influencia, ou ainda, pode gerar inversão de efeito. Nas condições de cura a umidade representa fator considerável. POWERS, em 1948 [01], encontrou que o processo de hidratação aproximadamente é

interrompido quando a umidade no concreto é inferior a 80% devido ao esvaziamento de todos os poros capilares do concreto, ou seja, nestas condições a água da reação começa a desaparecer.

Durante a fase inicial de concreto jovem é que o concreto libera a maior parte ou quase totalidade do calor da reação exotérmica, aproximadamente o grau de hidratação caminha de zero a 0.75 [01] entre as 8 horas e 7 dias de idade, o que é equivalente ao ganho de resistência à compressão conforme vimos anteriormente.

II.2.2 - Resistência à compressão

Esta é a propriedade do concreto que mais tem sido estudada, tanto em concreto jovem como em concreto endurecido, devido ao fato de que quando usado estruturalmente (principal aplicação) a sua função é a de resistir a esforços de compressão. Entretanto, esta característica tornou-se fundamental também nos estudos das outras propriedades, pois em geral, a partir desta tem-se uma boa condição de previsão do comportamento das demais.

Nesta análise, um ponto fundamental a ser considerado, conforme lembra BYFORS [04], é a forma de se obter os valores das resistências, pois vários fatores influenciam estas leituras, tais como: o tamanho e a forma dos corpos de prova, a mistura, a temperatura do concreto ensaiado, bem como do meio ambiente, além da velocidade de carregamento.

Para o concreto jovem o acompanhamento do desenvolvimento da resistência à compressão com todo cuidado é fundamental, pois somente nesta fase (até cerca de 3 dias de idade), um concreto em condições normais atinge de 40 a 50% de sua resistência total. A formação estrutural do concreto segue uma sequência de passos que devem ser levados em consideração ao se analisar o

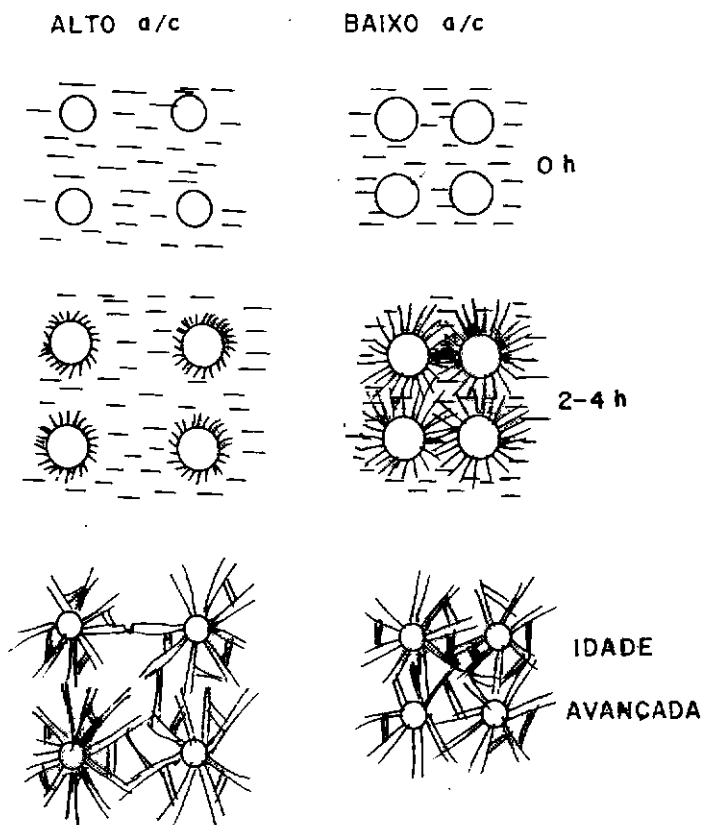


FIG. II.3 - ESQUEMA DE ENDURECIMENTO
DA PASTA DE CIMENTO.

Na hidratação inicia-se a reação química do cimento que a seguir criará elos através dos agregados. Ao secarem passarão a ser um material sólido já com uma resistência considerável, e ainda, crescente ao longo do tempo, devido à complementação destas reações químicas, as quais cada vez mais fortalecerão os elos de ligação entre os materiais.

Os principais fatores que alterarão a resistência final a partir do momento da mistura, são:

- grau de hidratação
- as proporções da mistura
- as condições de cura.

Conforme já visto em II.2.1 o grau de hidratação α tem importância em relação direta ao ganho de resistência. As proporções da mistura (cimento:areia:brita:água) também são decisivas na obtenção das resistências finais de uma mistura, de forma especial a relação água-cimento, o qual por influenciar diretamente o grau de hidratação reflete suas ações sobre o comportamento do ganho de resistência do concreto. Tão importante quanto as condições anteriormente citadas acham-se as condições de cura do concreto.

Em seu trabalho apresentado no congresso da RILEM [21,25] de 1982, KASAY do College of Industrial Technology do Japão, chama a atenção para as consideráveis reduções nas resistências dos concretos deformados prematuramente (com algumas horas de moldagem) ou mais rapidamente nas aplicações das formas deslizantes de uma forma geral, bem como dos mesmos efeitos causados por curas sob elevadas temperaturas, as quais geram efeitos semelhantes aos concretos com secagem acelerada (testados em túneis de vento).

Segundo os trabalhos de BYFORS [04] e KASAY [25] a relação de endurecimento do concreto pode ser vista sob o ângulo das equações matemáticas. Conforme o primeiro, esta relação apresenta ligação clara e direta com a resistência a compressão a 28 dias, ou seja:

$$f_{cc}(t) = \eta \cdot f_{cc}(28) \quad (\text{Eq.II.1})$$

sendo $f_c(28)$ a resistência à compressão a 28 dias de idade de um determinado concreto e η a expressão para a

resistência relativa à compressão:

$$\eta = \frac{a_1 \cdot t^{b_1}}{1 + \frac{a_1}{a_2} \cdot t^{(b_1 - b_2)}} \quad (\text{Eq.II.2})$$

onde t é a idade (em horas) do concreto, a_2 , b_1 e b_2 são variáveis ligadas especialmente ao tipo de cimento, e a condições de cura, estando a variável a_1 correlacionada ao traço do concreto. Os valores das variáveis para o cimento Portland comum com cura cuidadosa de acordo com as normas convencionais serão respectivamente: $a_2=41.52\%$, $b_1=3.236$ e $b_2=0.135$ sendo a_1 obtido do gráfico apresentado na figura II.4.

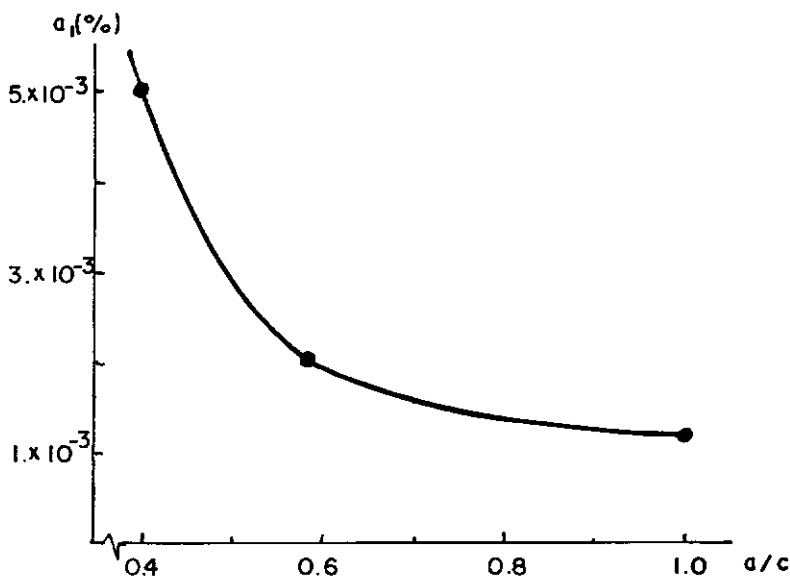


FIG. II.4 - VALORES DA CONSTANTE a_1
DE BYFORS.

Os valores e gráficos apresentados acima são referenciados do texto de MATS EMBORG [06].

O CEB [07] apresenta outra versão para a obtenção da curva de desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, também correlacionando a resistência em idade qualquer à resistência a 28 dias:

$$\frac{f_{cc}(t)}{f_{cc}(28)} = \frac{1}{1.276} \cdot \left(\frac{t}{4.2 + 0.85 \cdot t} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Eq. II.3})$$

Finalmente conhecendo-se a resistência mecânica a 28 dias de um concreto considerado convencional e a sua relação água-cimento pode-se determinar a sua curva de endurecimento, sendo isto fator preponderante em qualquer análise experimental de concreto, pois, como foi visto, esta relação une-se à praticamente todas as demais propriedades mecânicas deste material, o que permite de uma forma mais simples, (são ensaios simples e amplamente divulgados) que sejam avaliadas suas demais características. Também conclui-se, como vários outros autores que os métodos usuais de determinação de resistência à compressão são perfeitamente viáveis para o concreto jovem.

II.2.3 - Módulo de Deformação Longitudinal

Não sendo o concreto um material perfeitamente elástico, o mesmo apresenta uma relação tensão-deformação não linear o que gera uma variação do módulo de deformação longitudinal.

Em geral para as verificações e dimensionamentos de peças em concreto é utilizado o módulo estático, secante ou tangente na origem. BYFORS [04] aconselha a utilização do módulo de deformação longitudinal

secante para o concreto nas idades jovens. Este módulo é determinado baseado em ensaios simples de carregamento de um corpo de prova com acompanhamento dos valores das cargas e das deformações, durante ciclos de cargas e de descargas com variações das tensões aplicadas entre 30 e 50% da resistência última do corpo de prova na idade do ensaio.

Vários autores tem apresentado trabalhos sobre o comportamento do módulo de deformação longitudinal do concreto, estando entre eles HANSEN, BECKER e CLIFTON, apresentados no trabalho de BYFORS [04]. Todas as investigações levam, entretanto, a conclusões que apresentam o crescimento do módulo de deformação como sendo bem mais rápido que o da resistência à compressão, durante a fase do concreto jovem.

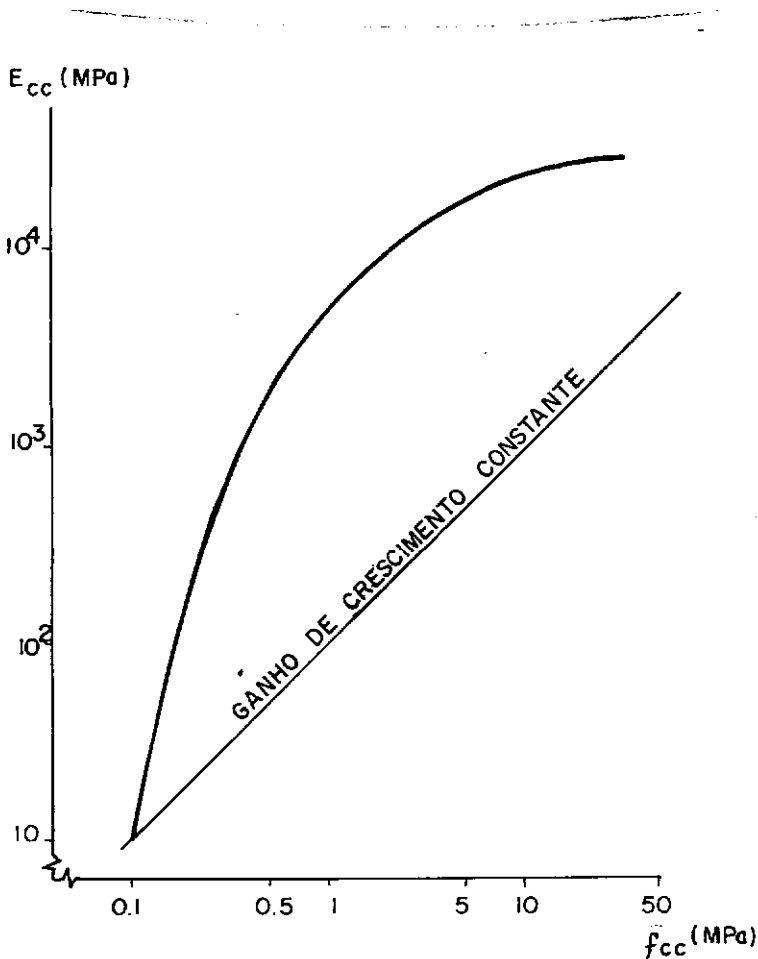


FIG. II.5 - CRESCIMENTO DO MÓDULO-E

Também neste caso, vários fatores influenciam no desenvolvimento do módulo de elasticidade, como relação água-cimento, temperatura de cura e tipo de cimento utilizado, sendo entretanto, bastante plausível que se relacione o módulo-E apenas com o ganho de resistência do concreto que como foi visto anteriormente é uma grandeza de mais fácil determinação e que como mostra BYFORS [04], segue um condicionamento bastante rigoroso.

A determinação do módulo-E estático é sempre afetada pela fluência do concreto, e como a tendência do concreto jovem é maior para as deformações diferidas, nesta idade, a determinação do módulo-E será mais afetada. O módulo dinâmico (obtido através de ensaio dinâmico, onde as características do corpo de prova são analisadas a partir de seu comportamento sob o efeito de uma excitação), é praticamente independente da fluência, sendo igual a $1,2.E_{est}$ para o concreto endurecido, sendo que esta pequena diferença é ainda creditada à fluência. Para o concreto jovem o módulo-E dinâmico chega a ser igual a $1,6.E_{est}$ [01].

Resultados de diversas experiências mostram ser o módulo-E do concreto função da relação água-cimento e do módulo-E dos agregados, portanto, variações da relação a/c mostram que o seu efeito não é o mesmo para a resistência à compressão e para o módulo-E. Uma das razões para a ocorrência disto é que estas duas propriedades não são afetadas similarmente por variações na composição do concreto. Uma relação a/c baixo, significa que a mistura contém uma maior quantidade de agregados.

Vários autores numa tentativa de melhor reproduzir os efeitos viscoelásticos buscam outros tipos de módulos de elasticidade, como o módulo efetivo, dado por $E_r(t,t') = 1 / J(t,t')$, ou como o módulo de TROST-BAZANT $E_{TB}(t,t') = E(t') / (1 + \chi(t,t') \cdot \phi(t,t'))$, onde χ é o coeficiente de retração, estando entre 0.75 e 0.85

(situações normais de concretos estruturais) e ϕ o coeficiente de fluência. Note-se que quando $\chi = 1$, tem-se o módulo reduzido. A relação matemática entre o módulo-E e ganho de resistência à compressão é sugerida por PAUW [04] como:

$E_{cc} = a \cdot \rho^3 \cdot f_{cc}$, sendo a um fator ligado ao tipo de agregado e ρ a massa específica do agregado.

Segundo a versão para o desenvolvimento do módulo-E apresentada por BYFORS [04] teremos:

$$E(t') = 9,93 \cdot 10^3 \cdot f_{cc}^{2,675} \text{ se } f_{cc} < 0,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Eq.II.4)}$$

$$E(t') = \frac{9,93 \cdot 10^3 \cdot f_{cc}^{2,675}}{(1 + 1,37 \times f_{cc}^{2,204})} \text{ se } 0,5 < f_{cc} < 2,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Eq. II.5)}$$

$$E(t') = 7,25 \times 10^3 \times f_{cc}^{0,471} \text{ se } f_{cc} > 2,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Eq. II.6)}$$

conforme é dado pela figura II.6 a seguir:

BAZANT [03] apresenta a seguinte função para o desenvolvimento do módulo de deformação longitudinal, em função do módulo a 28 dias:

$$E(t') = E(28) \cdot \frac{t'}{\sqrt{4 + 0.85 \cdot t'}} \text{ (Eq. II.7)}$$

Em outro trabalho, BAZANT, juntamente com PANULA [32] correlacionam o módulo-E com uma função de fluência:

$E(t') = 1 / J(t'+\Delta t, t')$, para Δt entre 0.5 e 144 min. (2,4 horas), onde a função J será a lei da dupla potência:

$$J(t, t') = \frac{1}{E'} + \frac{1}{E'} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot (t - t') \text{ (Eq.II.8)}$$

onde E' , m , α e n são parâmetros do material, como serão detalhados mais à frente em IV.1.6.

WILSON [06] também relaciona o módulo-E com a fluência de uma forma direta:

$$J(u, u') = \frac{1}{E_c} + \left[\frac{1}{\Psi(u')} + \varphi'(u-u') \right] \quad (\text{Eq. II.9})$$

sendo E_c o módulo-E do concreto a 28 dias, enquanto o tempo é transformado para u e u' conforme apresentado mais à frente quando a função de fluência de WILSON for detalhada. $\varphi'(u-u')$ expressa a influência da idade de carregamento e $\Psi(u')$ é a fluência básica definida em [03].

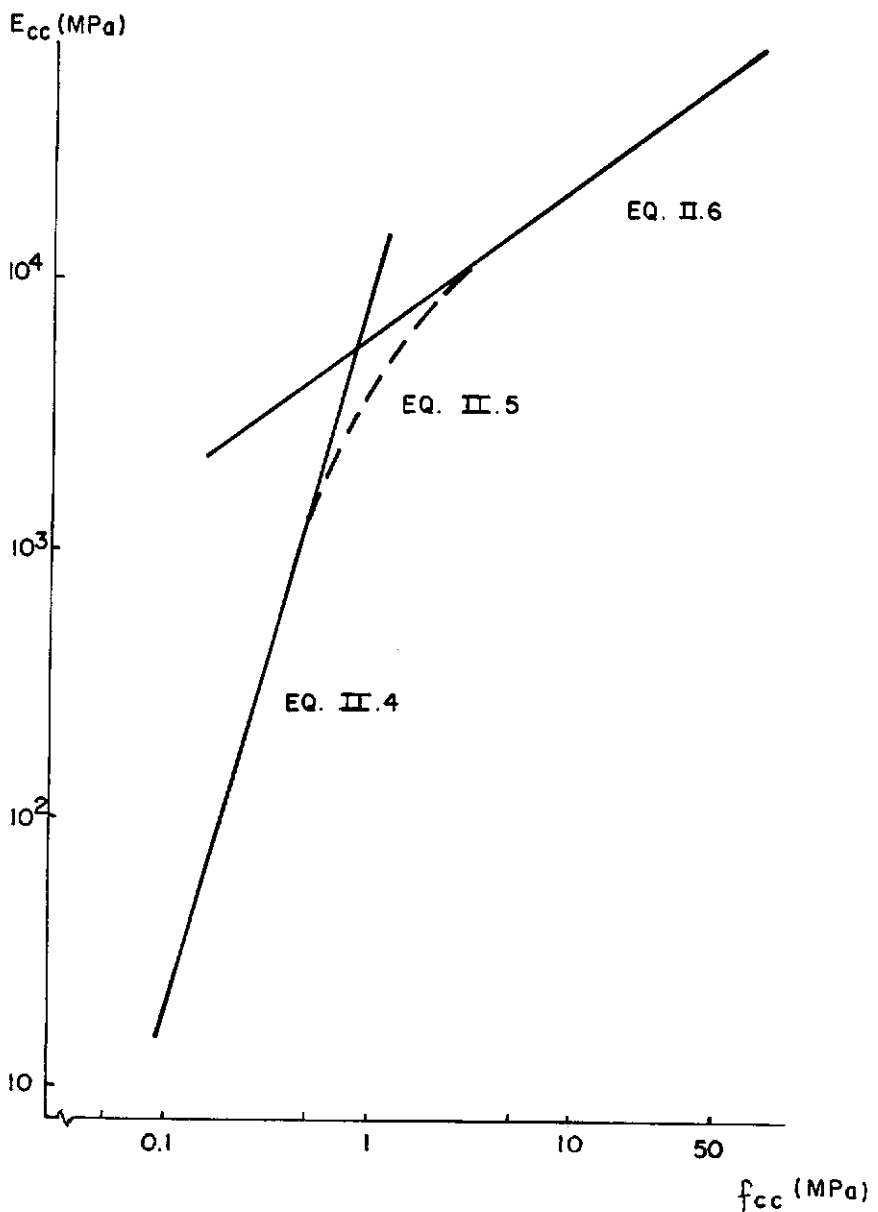


FIG. II.6 - RELAÇÃO DE BYFORS PARA MÓDULO - E

II.2.4 - Fluência (CREEP)

Já em 1905 WOOLSON [01] descrevia um certo fluxo do concreto em um tubo de aço sobre altas tensões axiais, dando início à análise de fluência do concreto. Em 1907, HATT [01] da Purdue University apresentava testes em vigas de concreto armado que demonstravam não ser o concreto um material totalmente elástico, como era imaginado e considerado.

Atualmente sabe-se que ao se aplicar uma carga sobre um corpo de prova de concreto obtém-se imediatamente uma deformação equivalente. Mantendo-se a carga constante, entretanto, a deformação crescerá. Esta variação de deformação será denominada de fluência (creep) do concreto.

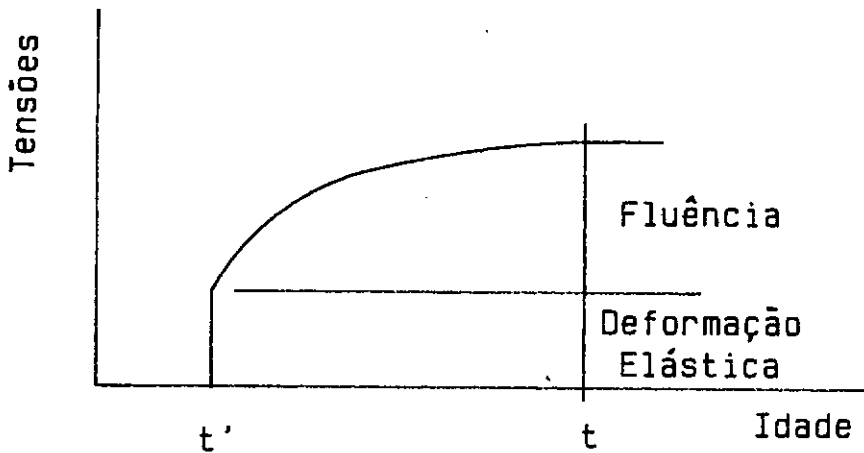


Fig.II.7 - Curva de fluência
sem retração

Conforme visto anteriormente a parcela ϵ_0 (creep) será obtida pela simples redução na deformação de um elemento carregado, daquela obtida nas mesmas condições em um elemento descarregado.

BAZANT [07] sugere uma subdivisão do efeito da fluência: fluência básica ("basic creep") e fluência de secagem ("drying creep"). A primeira seria a fluência dependente do tempo, ou seja, aquela que ocorre em um corpo de prova selado (com perda de umidade para o meio ambiente impedida) e a segunda, a diferença para o corpo de prova onde a cura ocorre sob carga com a possibilidade de perda de umidade para o ambiente.

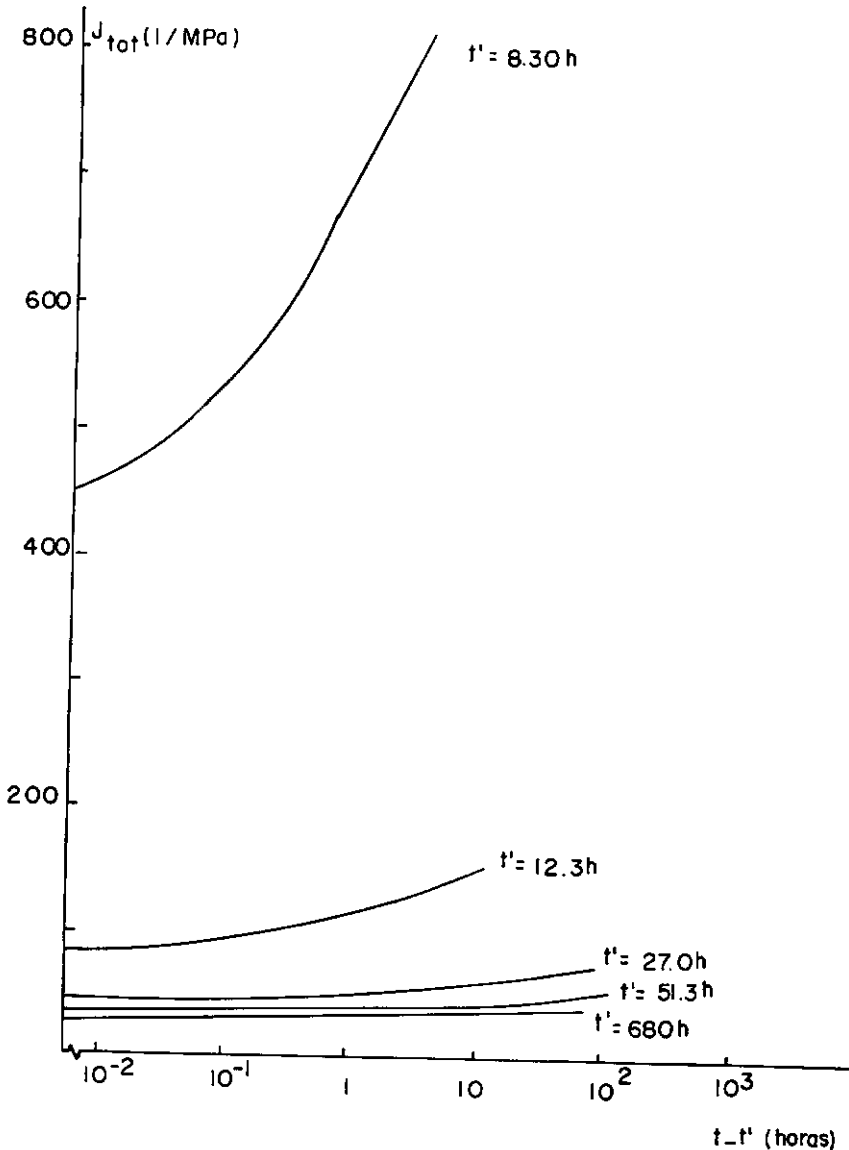


FIG. II. 8 - RELAÇÕES DE FLUÊNCIA COM A IDADE DE CARREGAMENTO.

A fluência é a deformação variável gerada pela aplicação da carga no instante t' , constituída por duas parcelas distintas: 1- parcela constante e recuperável (elástica) desde que as tensões atuantes estejam na faixa de 30 a 40% da tensão última do concreto. 2- parcela variável denominada de fluência propriamente dita, devida à reorganização interna das moléculas ao longo do tempo sob carregamento (ver fig. II.7). Estas duas partes são também chamadas de "retração devida à carga", ou deformação mecânica, e sua soma é função da idade de aplicação da carga e do tempo efetivo (veja fig.II.8) sob carga.

Num momento t qualquer, em um corpo de prova carregado, a deformação total será dada por:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\sigma}(t) + \varepsilon^0(t) \quad \text{(Eq.II.10)}$$

sendo ε_{σ} a deformação referenciada anteriormente, e ε^0 aquela oriunda de fatores independentes da carga, ou seja, efeito de retração (veja II.2.6) e de expansão ou de retração térmica. A parcela ε_{σ} será dada por:

$$\varepsilon_{\sigma}(t) = \sigma(t') J(t, t') \quad \text{(Eq.II.10a)}$$

onde $J(t, t')$ definida como sendo a função de fluência, será a deformação diferida para uma tensão $\sigma(t')$ unitária, aplicada em t' , sendo em geral formulada como:

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + C(t, t') \quad \text{(Eq.II.11)}$$

onde a primeira parcela será a parte instantânea elástica e a segunda a parcela de fluência propriamente dita ($C(t, t')$ = fluência específica, ou creep compliance), o que corresponde a dizer que $\varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_E + \varepsilon_c$, onde ε_E é a parcela elástica e ε_c é a parcela de fluência. A função $J(t, t')$ poderá ser reescrita como abaixo, tendo-se: $C(t, t') \times E(t') = \phi(t, t')$ sendo $\phi(t, t')$ o coeficiente de fluência:

$$J(t, t') = \frac{1 + \phi(t, t')}{E(t')} \quad \text{(Eq.II.12)}$$

Esta separação na prática, entretanto, não é considerada, utilizando-se nos ensaios apenas a referência da equação II.10. Também outros autores sugerem diferentes composições para o efeito da fluência, que embora corretas do ponto de vista teórico são excessivamente complexas de serem diferenciadas em laboratório (veja exemplo na fig.II.9), como é o caso da apresentada por BAZANT[07] anteriormente.

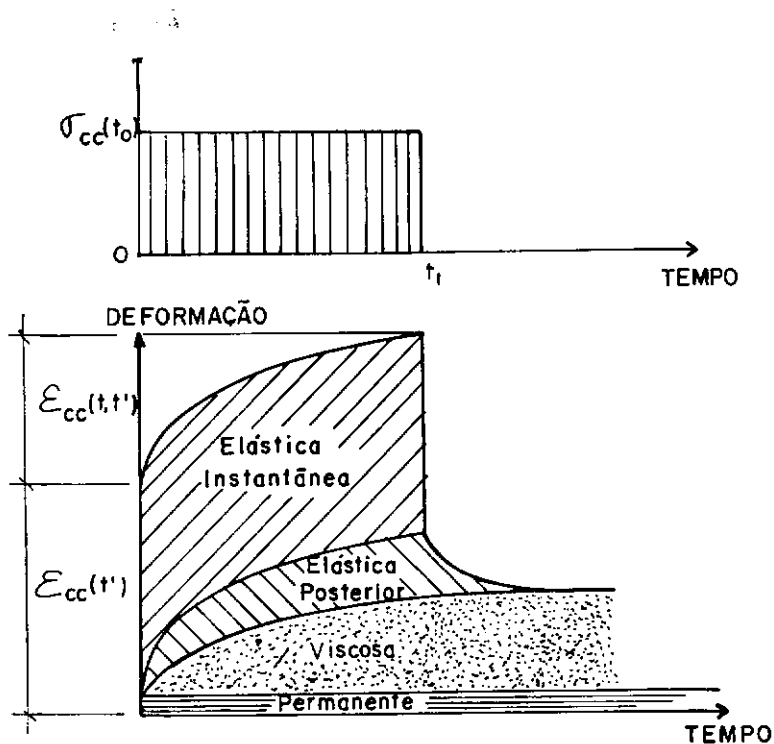


FIG. II.9 - PROCESSO DE DEFORMAÇÃO COM FLUÊNCIA.

Para as altas variações de tensões o crescimento da fissuração contribui para o desenvolvimento da fluência. HSU [04] mostra em seu trabalho que a não linearidade da relação tensão-deformação advém do intercâmbio entre agregados e a pasta de cimento hidratado. Observa ainda que se a relação tensão-resistência for maior que 0,7, esta carga inicial provocara fissuração imediata, propagação destas fissuras com o tempo até provocar a ruína da peça. Note-se que a microfissuração é responsável apenas pela parte irrecuperável da deformação associada à carga (cerca de 10 a 25% do total segundo MEYERS [04]). O restante depende da quantidade destas fissuras antes da aplicação da carga.

A fluência é descrita das mais diferentes formas pelos mais variados autores. Podem-se citar os principais mecanismos que a descrevem como sendo [01]:

1- Fluidez viscosa da pasta de cimento causada pelo escorregamento ou corte de partículas gel-lubrificadas por leis de absorção de água.

2- Consolidação devido a infiltrações na forma de absorção de água ou a decomposição de leis internas de hidratação.

3- Elasticidade retardada devido a ação da pasta de cimento como gerador de restrições da deformação elástica do esqueleto, formado por agregados e cristais de gel. Este componente acompanha 1 e 2.

4- Deformação permanente causada por ruptura local (microfissuração e ruptura dos cristais) bem como recristalização e formação de outro corpo físico.

Entre os numerosos outros autores que apresentam descrições para o comportamento da fluência estão: Kesler, Ruetz, Cilosani, Feldman, Sereda e Ishai e Powers (ver [01]).

A teoria da viscosidade e da visco-elasticidade apresenta um dos muitos mecanismos que

tentam explicar o funcionamento fenomenológico da fluência e é considerada uma das mais importantes. Seu principal argumento é que a pasta de cimento hidratada é um líquido altamente viscoso que tem sua viscosidade aumentada com o tempo devido a mudanças químicas dentro de sua estrutura, possivelmente cristalização, ou que age no sentido de reduzir a superfície das partículas.

Nesta teoria THOMAS citado em [01] divide o concreto em duas partes: 1- Material "cimentoso" com comportamento viscoso sob carga, e 2- agregados inertes que não fluem sob carga.

A razão pela qual, entretanto, a fluência não foi até aqui totalmente analisada e que além de tratar-se de um fenômeno extremamente complicado, apresenta muitos fatores de influência, os quais, alteram fundamentalmente seu comportamento, como por exemplo.

- Idade de carregamento (grau de hidratação).
- Tempo sob carga.
- Composição do concreto.
- Temperatura
- Condições de mistura e cura.
- Variação das tensões.

Uma grande correlação existe entre a fluência e a resistência à compressão [04], desde que as tensões aplicadas estejam entre 30 e 40% da de ruptura da peça, especialmente nas baixas idades (primeiro mês), embora ainda ocorram efeitos de fluência sem praticamente qualquer acréscimo das resistências em cargas aplicadas nas altas idades (varios meses).

BYFORS [04] chama a atenção ainda, para o comportamento da deformação total e da deformação real de fluência, as quais nas baixas idades mantem uma separação menor quanto menor seja a idade do concreto, o que significa ser a fluência propriamente dita maior nas baixas idades proporcionalmente a deformação total, ou ainda,

$\epsilon_{tot}(t,t')$, isto é, a deformação instantânea e a deformação de fluência somadas, ao serem analisadas, mostrarão que a deformação de fluência representa um percentual maior do total quanto mais novo for o concreto, devido ao fato de a deformação total crescer proporcionalmente ao módulo $E(t')$, enquanto a fluência cresce proporcionalmente ao desenvolvimento da resistência à compressão, o qual é bem mais lento que o primeiro.

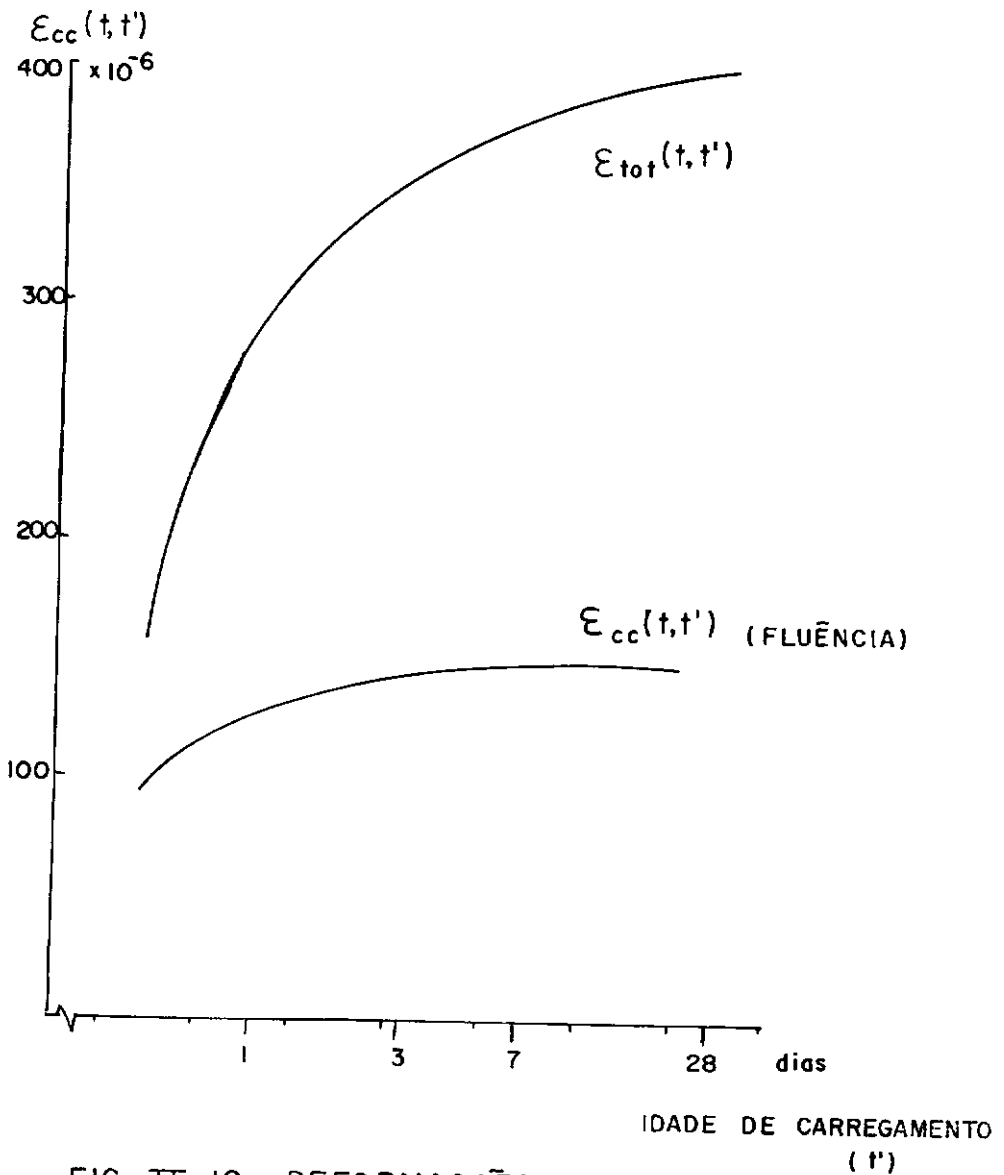


FIG. II. 10 - DEFORMAÇÕES.

A correlação da fluência que mais chama a atenção pela discrepância dos resultados é com a idade de carregamento, onde a fluência cresce numa grande exponencial à medida que a idade de aplicação da carga é reduzida apresentando também uma sequência de crescimento muito mais acentuada para os concretos jovens, conforme indicado na figura II.11 a seguir.

As maiores deformações instantâneas nas baixas idades são de imediato explicadas pelos menores módulos de deformação que como foi visto anteriormente nestas baixas idades tem um crescimento excessivamente acelerado. Observe-se ainda que, os concretos mal compactados apresentam fluência mais elevada devido ao acréscimo de vazios que facilitam a evaporação da água e a maior acomodação da estrutura interna.

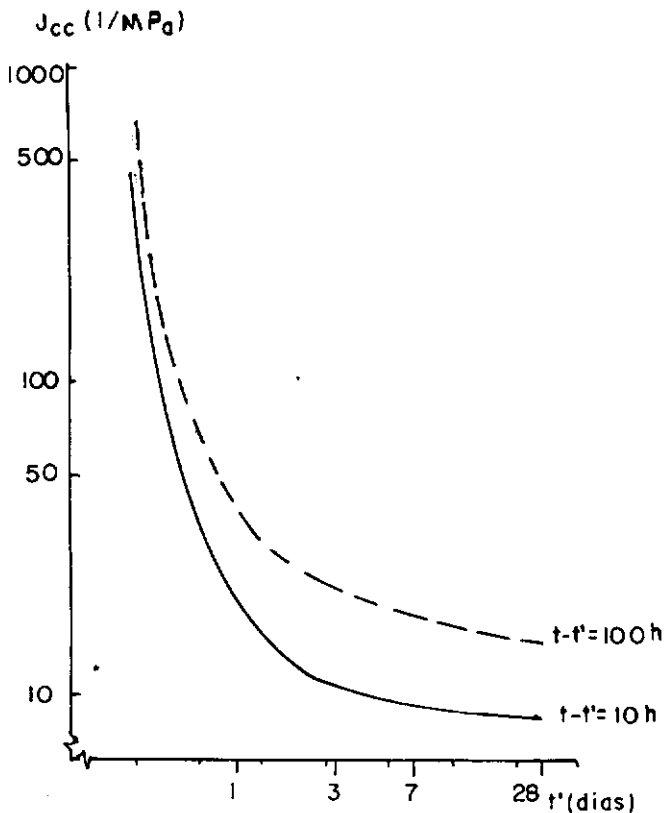


FIG. II.11 - A DEPENDÊNCIA DA IDADE DA FLUÊNCIA.

Frequentemente a fluência é descrita pelo coeficiente de fluência $\phi(t,t')$, conforme já visto na eq. II.12. Este coeficiente é a relação entre a deformação de fluência após um certo tempo de carregamento e a deformação instantânea.

$$\phi(t,t') = \frac{\epsilon_{cc}(t,t')}{\epsilon_{cc}(t')} \quad \text{(Eq.II.13)}$$

Este coeficiente será menor quanto menor for a idade do carregamento t' .

Os métodos relacionados aos coeficientes de fluência são baseados na anteriormente citada subdivisão entre partes elásticas e viscosas do concreto. Então, a deformação total é descrita como uma função de fluência dependente da idade, do coeficiente de fluência $\phi(t,t')$ e do módulo de deformação no tempo de carregamento, $E(t')$.

A modelização matemática do problema reológico tem se apresentado principalmente sob a forma de formulação integral ou de formulação diferencial.

Nas formulações integrais, mais comumente utilizadas, as deformações são introduzidas como dependentes de uma história de tensões por superposição da contribuição de cada acréscimo de tensões. Neste caso o princípio da superposição de BOLTZMANN, aplicado ao concreto por MC HENRY [07] em 1943, pode ser totalmente aplicado. Entretanto, para concretos com fortes propriedades de dependência do tempo a solução das integrais acima pode se tornar tão complexa que na análise passo-a-passo, mesmo em grandes computadores pode tender para o insolúvel. Assim sendo, para análise de sistemas estruturais muito complexos torna-se necessária a utilização da formulação diferencial, o qual dispensa o armazenamento da história de tensões, o que reduz em muito o espaço de memória computacional utilizada, viabilizando a análise de diversos casos mais complexos. (Veja III.3).

Quanto à modelagem física existem vários métodos e conjuntos de resultados na bibliografia apresentada. Entretanto, neste trabalho, como será visto adiante, optou-se pela modelagem do efeito de relaxação, o qual mais raramente aparece na bibliografia, sendo esta modelagem descrita e detalhada no item V.

II.2.5 - Relaxação (RELAXATION)

Ao se aplicar uma deformação a um elemento de concreto, surge conseqüentemente um estado de tensões. Mantendo-se esta deformação constante ao longo do tempo as tensões irão decrescer devido à relaxação do concreto.

Como é bastante claro, o efeito da relaxação nada mais é que o efeito contrário ao da fluência, isto é, relaxação e fluência são conceitos fisicamente fechados, e têm as mesmas explicações e comportamentos similares em geral. Naturalmente para se obter uma seqüência compatível com os efeitos da fluência, a deformação aplicada não poderá gerar tensões superiores a 30 ou 40% (regime linear) da de ruptura do concreto na idade do carregamento.

Definiremos então função de relaxação como sendo a tensão originária de uma deformação unitária imposta ao corpo de prova em uma idade t' (ver figura II.12), originando então a equação abaixo quando consideramos válido o princípio da superposição:

$$\sigma(t) = \int_{t_0}^t R(t, t') ds(t') \quad (\text{Eq. II.14})$$

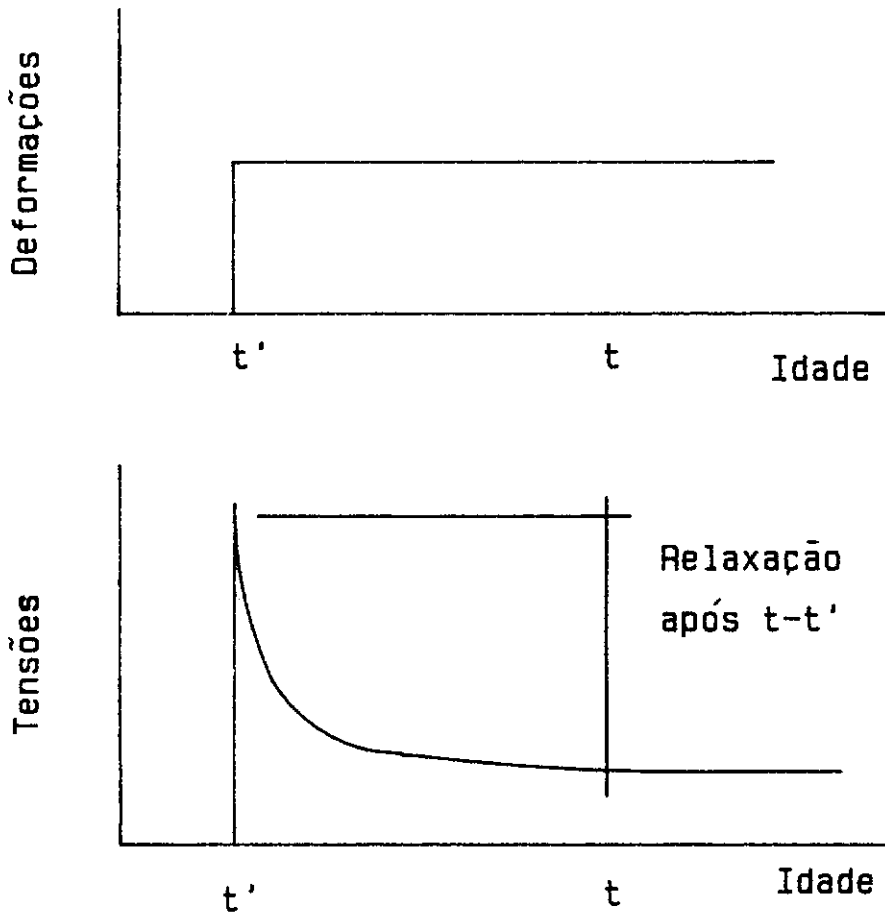


Fig.II.12 - Curva de relaxação

Nos ensaios de relaxação pode-se, ainda, através da variação das deformações impostas manter o efeito da retração compensado para se ter a relaxação do concreto sem a influência deste fenômeno. Como na fluência, o comportamento da função de relaxação está relacionado especialmente com as condições de existência do concreto nas baixas idades, ou seja, com a idade de aplicação da

carga, com as condições de cura, controle da evolução do grau de hidratação entre outros fatores. Assim sendo, quanto mais jovem for o concreto ao sofrer carregamento, mais acentuada será a curva de relaxação em seu início, especialmente devido ao baixo módulo de elasticidade do material.

Neste trabalho, buscou-se condições de aplicação do carregamento em idades o mais jovem possível. Como será visto à frente, entretanto, ocorrem diversos fatores que impedem que t'_0 nas condições de ensaio realizadas, seja reduzido para valores menores que 3 horas.

II.2.6 - Retração (SHRINKAGE)

Ao se manter um elemento de concreto ao ar, o seu grau de hidratação sofrerá variações (veja fig.II.13) provocando um rearranjo de suas moléculas e provocando conseqüentemente um acréscimo continuado de deformações sem que esteja sujeito a tensões provenientes de esforços externos. Este fenômeno recebe o nome de retração e em determinadas condições gera fissurações exageradas e como resultado redução da resistência à compressão do concreto, quando o mesmo nas idades jovens não recebe cuidados adequados quanto ao seu grau de hidratação, seja por cura em temperaturas elevadas, em baixas umidades relativas do ar ou sob outras condições danosas à evolução do amadurecimento do grau de hidratação.

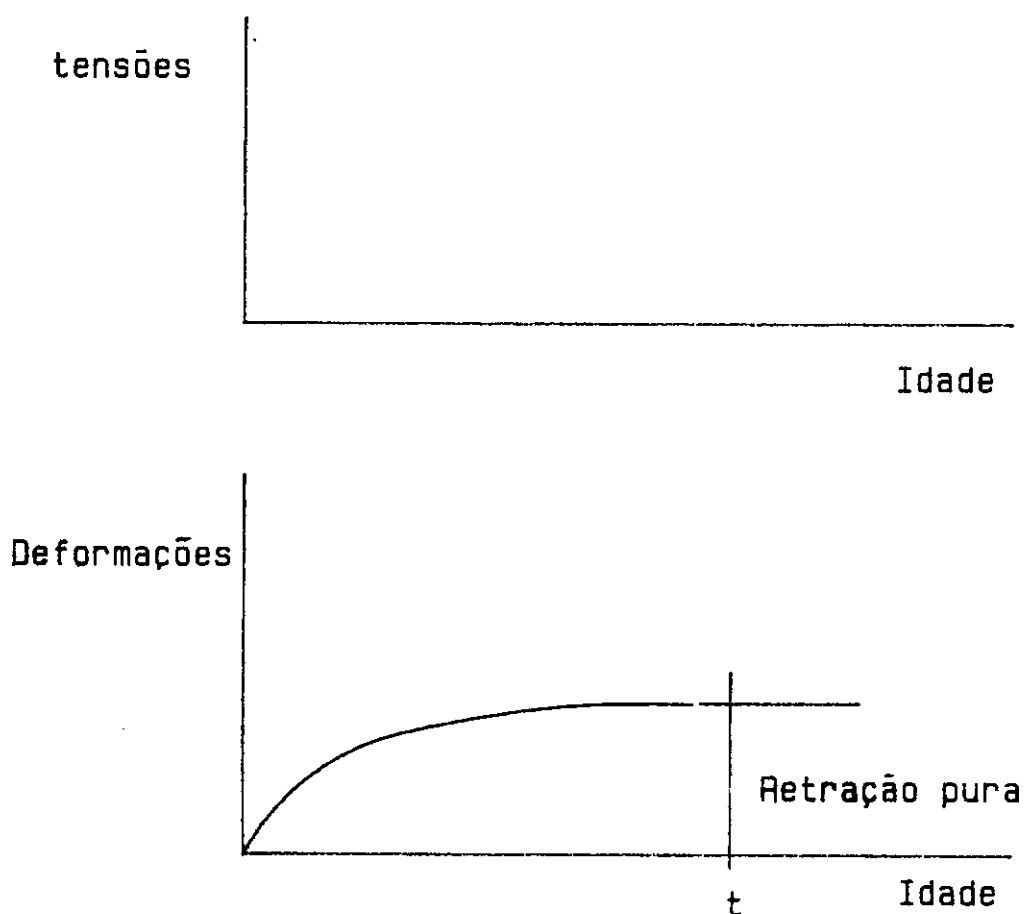


Fig.II.13 - Curva de retração

Segundo BYFORS [04] a retração pode ser dividida em 2 partes: retração plástica e retração do concreto endurecido (retração ordinária).

A retração plástica ocorre antes do endurecimento do concreto, ou seja, nas primeiras horas, a seguir teremos a retração ordinária. Existem casos de ocorrência de rutura por retração plástica.

Conforme WITTMANN citado em [04] (1976) pode-se subdividir a retração plástica em tres outras partes:

1- A superfície do concreto ainda está molhada, conseqüentemente nenhuma pressão capilar ou

retração pode ocorrer. (Equivale a cerca de 1 hora após a moldagem).

2- A camada de água superficial está acabando. As superfícies curvas de água surgem e a retração é iniciada. Um aumento da secagem gera a redução destas superfícies curvas (water menisci) o que provoca um aumento da pressão capilar e conseqüentemente um aumento da retração. Período em geral entre 3,5 ou 4 horas após a moldagem.

3- A seguir a pressão nos capilares é reduzida rapidamente. A água dos capilares vai constituir um sistema compacto. Nesta etapa o endurecimento tem início e o concreto propriamente dito começa a existir (etapa do concreto jovem). Aqui termina a retração plástica dando início à retração ordinária.

A magnitude da retração plástica em geral é maior que a da retração ordinária, (ver fig.III.14) principalmente porque a matriz do concreto ainda está começando a endurecer.

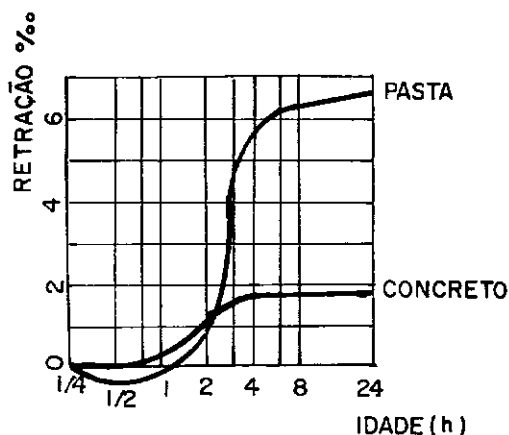


FIG. II.14 - RETRAÇÃO PLÁSTICA
(20°C)

A ocorrência de fissuras devido à retração plástica é motivada entre outras coisas pelo fato de que a deformação última do concreto diminui ao mesmo tempo que a retração plástica do concreto cresce, o que é mostrado nos estudos de WEIGLER e KARL citados em [01] (1974), ou seja, a deformação última do concreto decresce entre a moldagem e até cerca de 7 a 8 horas de idade, quando então lentamente começa a crescer. Finalmente a forma e a razão da retração plástica adicionados ao grau de resistência do elemento influenciam consideravelmente a formação de fissuras.

A principal motivação, entretanto, para a formação de fissuras oriundas da retração plástica é a taxa de evaporação existente sob condições atmosféricas normais. Experiências mostram que um forte risco de fissuração existe para taxas acima de $1\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$, sendo que fissuras podem na realidade ocorrer para taxas acima de $0,5\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$. Existe ainda uma relação direta da quantidade de cimento (pasta) e o valor final da retração, aumentando o primeiro, maior será o segundo.

Pode-se ainda utilizar a retração química (veja fig.II.15) como um indicador do estágio de endurecimento do concreto (cimento). JUNG citado em [01] em 1974 encontrou em suas pesquisas um relacionamento linear entre a resistência de compressão e a retração química, pesquisando sobre corpos de prova de concreto, o que apresentou divergências dos resultados de CZERNINS que pesquisou em argamassa de cimento e areia, concluindo-se ser o motivo da divergência a maior facilidade de acesso da água para o interior do concreto.

KNUDSEN T. e GEIKER M. citados em [04] sugerem a colocação de um dilatômetro dentro do elemento de concreto, que consiste de um tubo onde o estado da mistura água-cimento pode inclusive ser constatado visualmente e no qual a retração química pode ser lida. Em suas experiências são obtidas linhas que variam apenas com a temperatura.

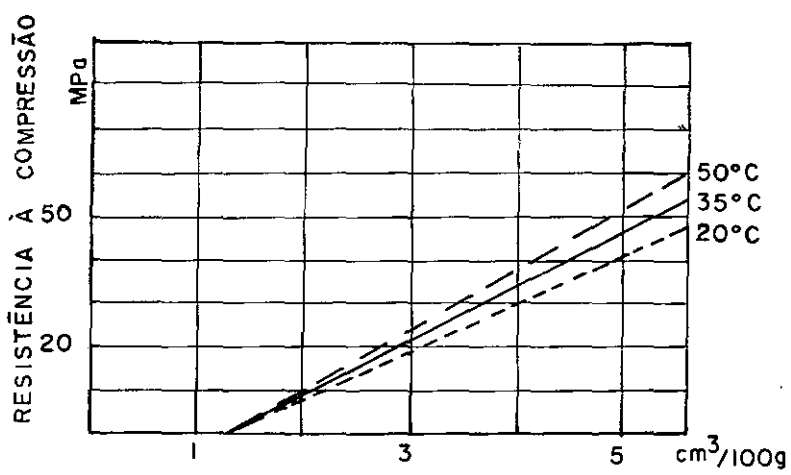


FIG. II.15 - RETRAÇÃO QUÍMICA.

CAPÍTULO III

MODELAGEM TEÓRICA

III.1 - MODELOS MATEMÁTICOS

Ao se objetivar uma análise teórica sobre o comportamento reológico do concreto em geral, encontra-se a solução através da utilização de modelos matemáticos, o que não poderia deixar de ser regra ao, de uma forma particular, se analisar o concreto em suas primeiras idades.

A partir da modelagem do concreto, um grande número de tentativas tem sido feitas para simular as relações tempo-deformação através de modelos reológicos. São montadas equações envolvendo tempo, tensões e deformações e/ou suas derivadas em relação ao tempo. As soluções destas equações são deformações como função de tempo e de tensões (fluência) ou tensões como função de tempo e de deformações (relaxação).

As deformações idealizadas são usadas para construir desenvolvimentos reais elásticos, viscosos ou plásticos e são representados por molas, amortecedores e por elementos de fricção mais modernamente.

Os corpos com estas propriedades lineares são referidos como sólidos Hookeanos, líquidos Newtonianos ou ainda corpos de Saint Venant.

Os elementos básicos considerados para a modelização reológica dos materiais são então a mola e o amortecedor. No caso da mola, se considerarmos o caso geral de um material com envelhecimento, podemos colocar sua equação constitutiva como sendo [03]:

$$\sigma_E(t) = E(t) \cdot \dot{\epsilon}_E(t) \quad \text{(Eq.III.1)}$$

onde o sub-índice E indica mola e o ponto indica derivação em relação ao tempo.

Para o amortecedor viscoso, considerando também o envelhecimento do material, podemos formular:

$$\sigma_\eta(t) = \eta(t) \cdot \dot{\epsilon}_\eta(t) \quad \text{(Eq.III.2)}$$

onde o sub-índice η indica o amortecedor.

A união, ou combinação de diversos destes elementos acima definidos, ou mesmo cada um isoladamente, formam um diferente modelo. Deve-se também considerar nestas combinações os elementos de fricção já mencionados.

Existem 2 modelos básicos fundamentais, comumente utilizados: modelo de Kelvin (ou Voigt) e o modelo de Maxwell (veja figuras III.1 e III.2).

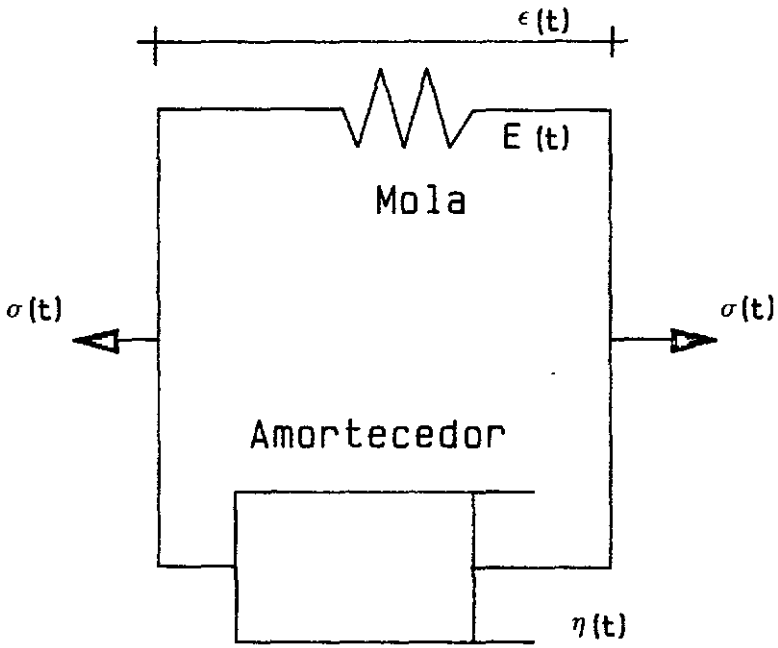


FIG.III.1 - Modelo de Kelvin

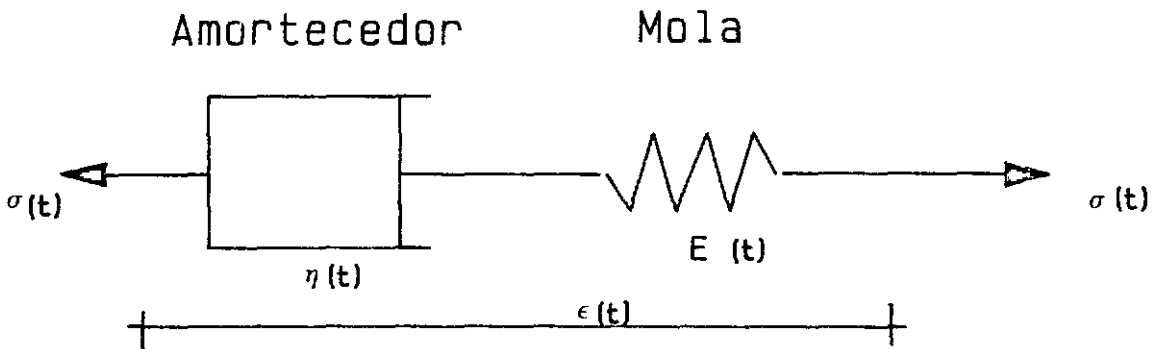


FIG.III.2 - Modelo de Maxwell

O modelo de Kelvin pode ser composto de diversos dos chamados elementos de Kelvin, sendo este definido como uma mola e um amortecedor interligados em paralelo. A relação tensão-deformação deste elemento é definida por:

$$\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon(t) + \eta(t) \cdot \dot{\varepsilon}(t) \quad (\text{Eq.III.3})$$

O modelo de Maxwell é composto por molas e amortecedores interligados em série. A relação tensão-deformação dada por uma equação diferencial será, no caso geral de um material com envelhecimento dada por:

$$\dot{\sigma}(t) + \frac{E(t)}{\eta(t)} \sigma(t) = E(t) \cdot \dot{\varepsilon}(t) \quad (\text{Eq.III.4})$$

Neste modelo a deformação total será a soma das dos elementos.

Modelos mais complicados podem dar uma maior adaptabilidade na descrição da resposta de vários materiais. Uma combinação, por exemplo, de um elemento de Kelvin ligado em série com um elemento de Maxwell é chamado de modelo de Burgers (ver fig.III.3).

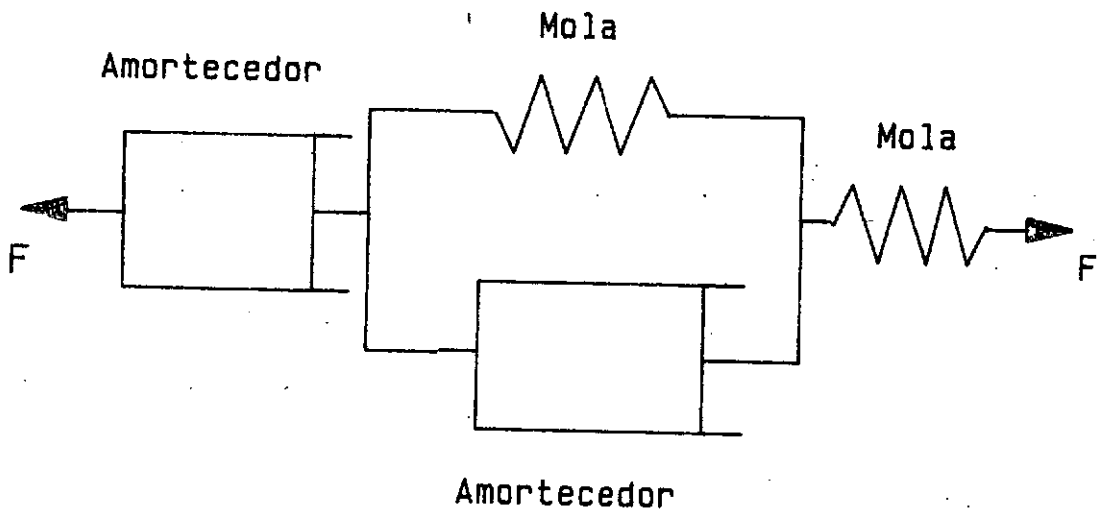


Fig.III.3 - Elemento de Burgers

Existem vários outros modelos reológicos baseados nos elementos vistos anteriormente. Dentre eles uma atenção especial é dada hoje em dia à cadeia em série de elementos de Kelvin (cadeia de Kelvin) (veja fig.III.4) e à cadeia em paralelo de elementos de Maxwell (cadeia de Maxwell) (veja fig.III.5) principalmente pelas vantagens computacionais destes modelos.

No concreto jovem, como será visto adiante, surgem inúmeras dificuldades adicionais para a modelagem das principais propriedades devido às suas mudanças rápidas e acentuadas durante o processo de endurecimento do cimento. Como visto na análise destas características para as idades jovens do concreto, surgem diversas teorias e resultados de experiências, que adicionados aos ensaios

integrantes deste trabalho, mostram bem as dificuldades nesta modelagem. O modelo da cadeia de Maxwell foi utilizado neste trabalho por tratar-se de um modelo bem conhecido e definido para o concreto endurecido, e que portanto apresentava indícios de um bom comportamento nesta nova linha de análise, devendo ser a princípio bem estudado para que possa apresentar sugestões para futuras adaptações de modelos para o concreto jovem.

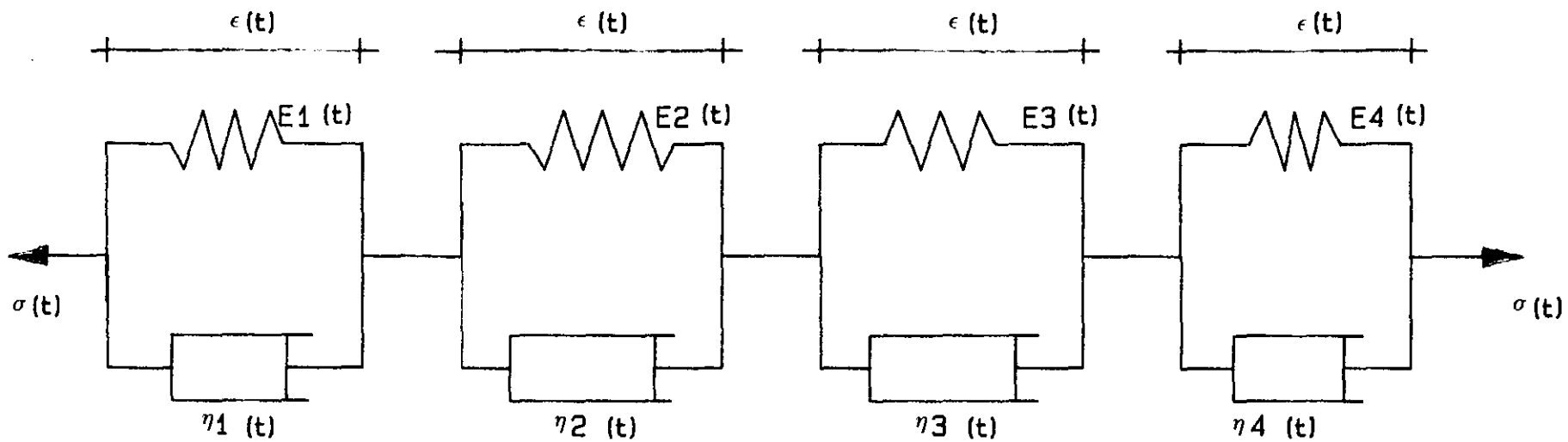
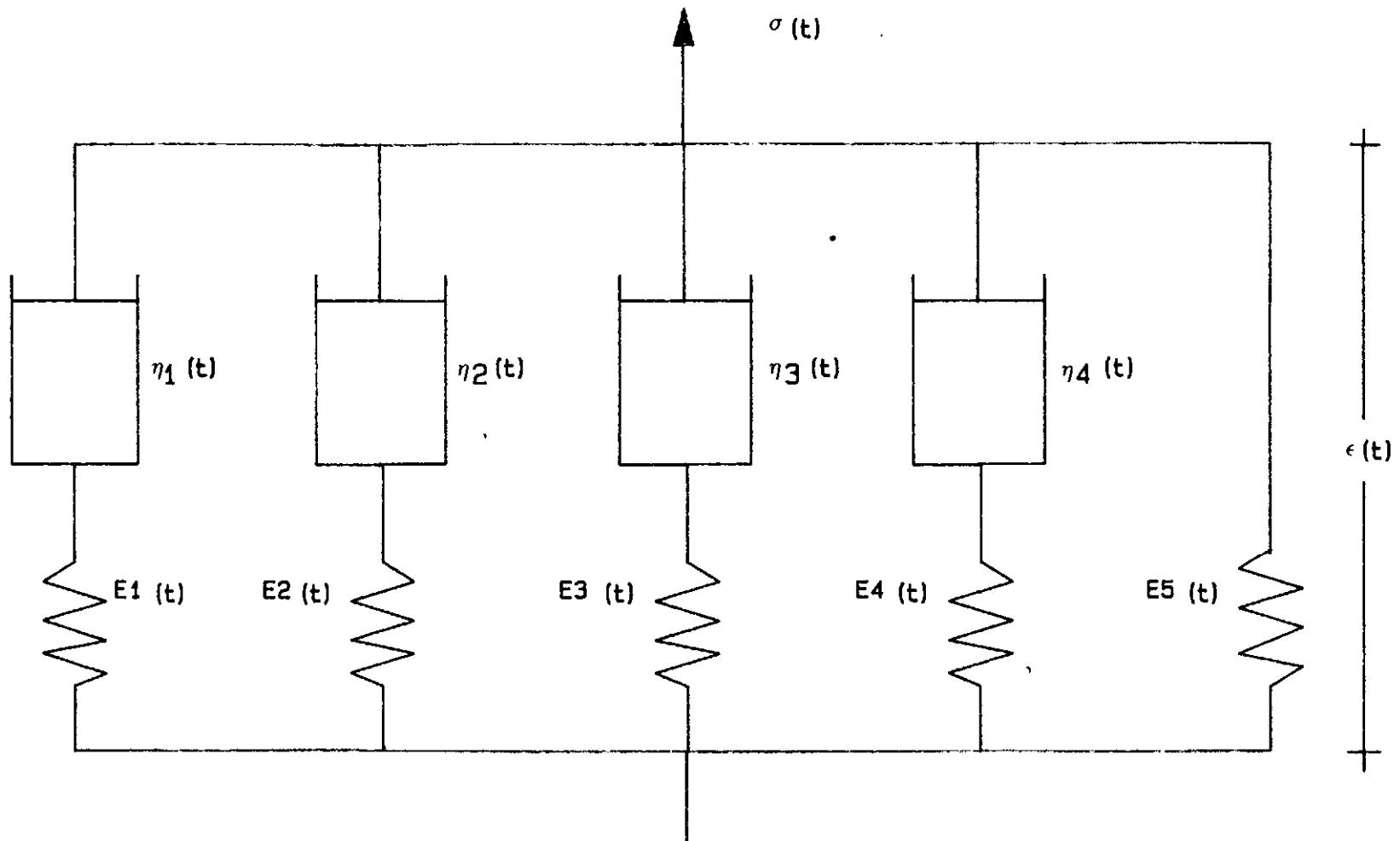


Fig.III.4 - Cadeia com 4 elementos de Kelvin



III.2 - MÉTODOS INTEGRAIS E DIFERENCIAIS

Em toda a análise reológica o princípio da superposição é amplamente utilizado. Como foi explicado anteriormente, pode-se obter uma história de deformações causada por uma história qualquer de tensões. Considera-se assim ser a história de tensões composta por uma série de funções de Heavyside ("steps") infinitesimais. A superposição das respostas aos aumentos de tensões é permitida se, e somente se, cada resposta for puramente linear com respeito às tensões. Assim sendo uma função de fluência pode ser transformada numa de relaxação pela solução de uma equação integral (método integral).

Um método diferencial elimina a necessidade de se utilizar uma história completa de tensões, gerando uma grande economia de memória nos computadores. Esta formulação baseia-se em aproximar o integrando na equação integral, ou seja, efetuar a soma dos produtos das funções t e t' , após o que, como pode ser visto em [02,03] com a introdução das funções exponenciais obtém-se as chamadas séries de Dirichlet, que compõem as funções diferenciais de fluência e de relaxação [11].

Finalmente pode-se comprovar que os dois métodos fornecerão resultados equivalentes qualitativa e quantitativamente [36]. Esta equivalência entre as duas formulações da equação constitutiva de um material viscoelástico linear com envelhecimento (caso do concreto, desde que, submetido a tensões de até 30 ou 40% de seu limite de ruptura) será obtida mediante a demonstração da seguinte proposição:

"A equação constitutiva integral de um material viscoelástico linear com envelhecimento é equivalente a um conjunto de equações constitutivas diferenciais, se, e somente se, o núcleo da equação

integral for degenerado mediante uma série de Dirichlet", o que confirma o caminho acima proposto.

Partindo-se da equação constitutiva de um material nas condições acima,

$$\sigma(t) = R(t,t') \cdot \varepsilon(t') + \int_0^t R(t,t') \, d\varepsilon(t') \quad (\text{Eq.III.5})$$

poderemos obter como apresentado no anexo. 2 uma equação constitutiva diferencial, ou uma família de equações constitutivas diferenciais, correspondentes à equação integral acima apresentada:

$$\sigma_{\mu}(t) + \frac{E_{\mu}(t)}{\eta_{\mu}(t)} \cdot \sigma_{\mu}(t) = E_{\mu}(t) \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{Eq.III.6})$$

Desta forma, no próximo capítulo será utilizada uma formulação diferencial para o modelo de Maxwell a fim de se proceder ajustes das funções de relaxação oriundas das de fluência.

III.3 - RELAÇÕES ENTRE FLUÊNCIA E RELAXAÇÃO

Como foi anteriormente visto, fluência e relaxação são dois aspectos de um único fenômeno, o que gera um especial interesse de se conhecer o comportamento deste fenômeno sob os dois ângulos. Neste trabalho a parte experimental gera curvas de relaxação as quais serão comparadas por superposição direta com as equivalentes obtidas de transformações por métodos numéricos (utilizou-se método do CEB [06] - Ver listagem no anexo 1) das curvas de fluência teóricas geradas por funções já desenvolvidas em outros trabalhos.

Baseado no modelo de Maxwell, pode-se partir de uma função de relaxação:

$$R(t,t') = E \cdot e^{-E(t-t')/\eta} \cdot H(t-t') \quad (\text{Eq.III.7})$$

sendo $E(t, t') = E$ em $t = t'$ a qual é solução da seguinte equação diferencial:

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{d}{dt} \cdot R(t, t') + \frac{1}{\eta} \cdot R(t, t') = \delta(t, t') \quad (\text{Eq.III.8})$$

que ao ser integrada dará:

$$\frac{R(t, t')}{E} + \frac{1}{\eta} \int_0^t R(t, t') dt' = H(t-t') \quad (\text{Eq.III.9})$$

e que finalmente chegará a uma função de fluência:

$$C(t, t') = \frac{1}{E} + \frac{1}{\eta} \cdot (t-t') \quad (\text{Eq.III.10})$$

onde E e η são constantes, e $d(t-t') = 1/\eta$.

A transformação acima foi possível com a utilização da seguinte função de substituição:

$$H(t-t') = \frac{R(t, t')}{E(t)} + \int_0^t d(t, t') R(t, t') dt' \quad (\text{Eq.III.11})$$

sendo $E(t) = E$ conforme condições iniciais e de acordo com o trabalho apresentado por G. J. Creus [02], sendo esta uma equação integral de Volterra que aparece geralmente nos problemas de viscoelasticidade, tendo sua solução apresentada inclusive sob forma de listagem para micro-computadores em BASIC no trabalho anteriormente referido.

Este trabalho é baseado no conhecido método trapezoidal, o qual, em linhas gerais simplificadas baseia-se na obtenção dos valores de deformações considerando como um trapézio a cada área sob 2 pontos discretos da curva da função de fluência considerados em somatório simples conforme segue em sua forma geral (veja fig.III.6):

$$\varepsilon(t) - \varepsilon^0(t) = \int_0^t J(t, t') d\sigma(t') \quad (\text{Eq.III.12})$$

sendo para o método do retângulo:

$$\varepsilon(t) - \varepsilon^0(t) = \sum_{i=1}^k J(t, t_i) \Delta\sigma(t_i) \quad (\text{Eq.III.13})$$

e para o método do trapézio, em geral considerado com um

maior grau de precisão:

$$e(t) - e^0(t) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} \left[\varphi(t_k, t_i) + \varphi(t_k, t_{i-1}) \right] \Delta\sigma(t_i)$$

(Eq.III.14)

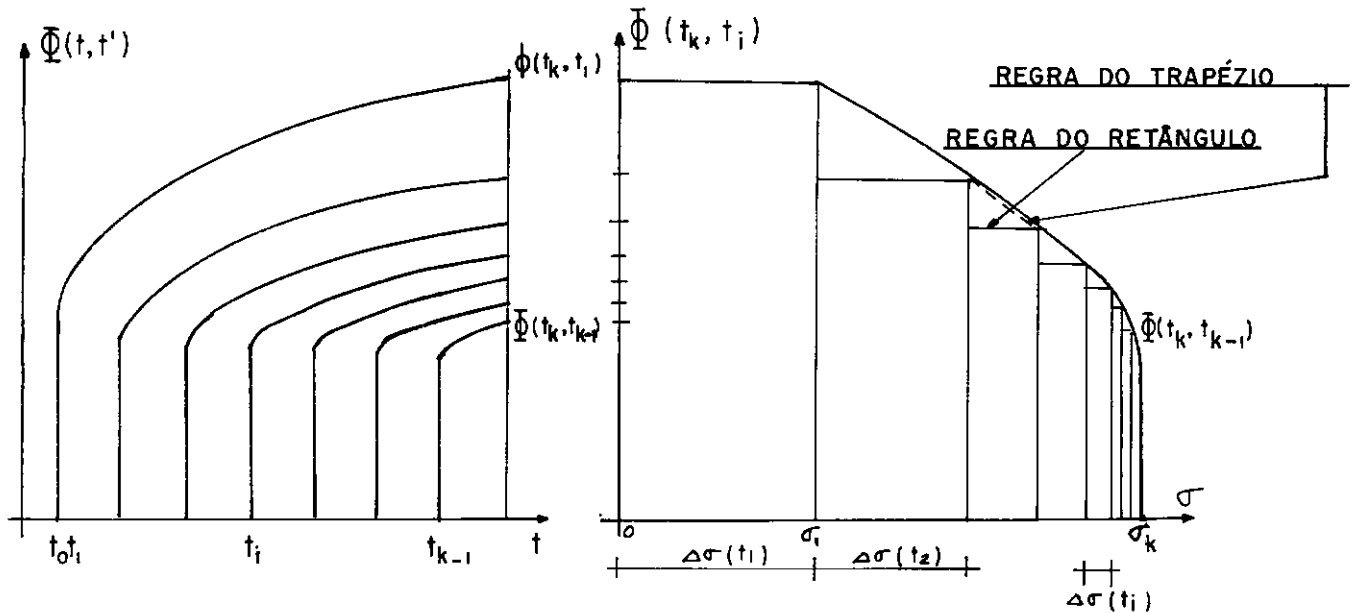


FIG. III 6 - MÉTODOS DO RETÂNGULO E DO TRAPÉZIO.

Assim sendo a função de relaxação poderá ser obtida por cada um dos 2 diferentes caminhos conforme o grau de precisão desejado. Considerando a aplicação de uma deformação unitária a ser mantida constante teremos pelo método dos trapézios a seguinte função de relaxação:

$$\Delta R(t_1) = \frac{1}{J(t', t_0)} \quad e$$

$$\Delta R(t_k) = - \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \Delta R(t_i) \left[\frac{J(t_k, t_i) + J(t_k, t_{i-1}) - J(t_{k-1}, t_i) - J(t_k, t_k) + J(t_k, t_{k-1}) - J(t_{k-1}, t_{i-1})}{J(t_k, t_k) + J(t_k, t_{k-1})} \right]}{\dots} \quad \text{(Eq.III.15)}$$

•

Esta equação será utilizada nos capítulos V e VII para gerar as funções de relaxação que darão origem às curvas de relaxação para as devidas análises teórico-experimentais, através do programa do Anexo 1.

CAPÍTULO IV

DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS FUNÇÕES DE RELAXAÇÃO

IV.1 - CURVAS DE RELAXAÇÃO OBTIDAS DAS FUNÇÕES DE FLUÊNCIA

Conforme foi visto no capítulo anterior podemos inverter a função de fluência para obter a função de relaxação com o emprego do algoritmo descrito em III.3 que origina o programa do anexo 1.

Apresentaremos a seguir diversas funções de fluência oriundas da literatura. Ao final deste item apresentaremos, a título ilustrativo, uma figura, a IV.1 onde aparece o aspecto gráfico das funções de relaxação obtidas a partir das funções de fluência aqui descritas (estas funções foram calculadas para o concreto utilizado por EMBORG [06]).

IV.1.1 - Função de Byfors e Pfefferle.

A função de fluência dada pelo Swedish Handbook for Concrete Construction é:

$$\varphi(t, t') = \varphi_0 \cdot \varphi_h \cdot \varphi_t \cdot \varphi_{t-t'} \quad (\text{Eq. IV.1})$$

sendo: φ_0 o valor da fluência básica, dependente da composição do concreto.

φ_h é a influência da umidade do concreto.

φ_t é a influência da idade de aplicação da carga no concreto.

$\varphi_{t-t'}$ é a influência do tempo sob carga.

Em geral a influência da umidade do concreto pode ser negligenciada, de forma especial no concreto massa, por tratar-se, na maioria dos casos, de efeito de dimensões reduzidas se comparado aos demais, logo a

função será:

$$\varphi(t, t') = \varphi_0 \cdot \varphi_{t'} \cdot \varphi_{t-t'} \quad (\text{Eq.IV.2})$$

onde φ_0 é proposto pelo Swedish Handbook como estando na faixa entre 1,0 e 3,0, enquanto Byfors propõe [04] $\varphi_{t'}$ como uma função da resistência à compressão do concreto aos 28 dias:

$$\varphi_{t'} = \left[\frac{\frac{f_{cc}(t')}{f_{cc}(28)} + a}{1 + a} \right]^{-\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq.IV.3})$$

sendo geralmente, $a=0,17$ (sugestão de Byfors para os concretos comuns) e $\varphi_0=2,0$.

Pferffele estudou a influência do tempo sob carga:

$$\varphi_{t-t'} = 1 - \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-b_i \sqrt{t-t'}} \quad (\text{Eq.IV.4})$$

onde a e b são constantes que definem as características da fluência. b_i tem dimensão $1/\sqrt{\text{dias}}$ e a_i não tem dimensão. Os coeficientes foram utilizados conforme sugestão de WILSON [06] que comparou esta fórmula com concretos de vários pesquisadores e obteve como melhores resultados para $i = 4$:

$a_1=0,015$, $b_1=24,0$; $a_2=0,085$, $b_2=2,3$; $a_3=0,85$,
 $b_3=0,085$; $a_4=0,05$, $b_4=0,01$, formando finalmente a seguinte equação:

$$\varphi(t, t') = 2,0 \times \left[\frac{\frac{f_{cc}(t')}{f_{cc}(28)} + 0,17}{1,17} \right] \times \left(1 - \sum_{i=1}^4 a_i \cdot e^{-b_i \sqrt{t-t'}} \right) \quad (\text{Eq.IV.5})$$

IV.1.2 - Função do CEB

O CEB apresenta sua versão da função de fluência do concreto em geral:

$$\varphi(t, t') = \frac{E_{cc}(t')}{E_{cc}(28)} \cdot \varphi_{28}(t, t') \quad (\text{Eq. IV.6})$$

onde: $\varphi_{28}(t, t') = \beta_a(t') + \varphi_d \beta_d(t-t') + \varphi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t')] \quad (\text{Eq. IV.7})$

O primeiro termo representa o fluxo viscoso inicial, sendo:

$$\beta_a = 0,8 \times \left[1 - \frac{f_{cc}(t')}{f_{cc}(28)} \right] \quad (\text{Eq. IV.8})$$

Os demais termos que representam as deformações elásticas retardadas e os fluxos viscosos posteriores são:

$$\varphi_d = 0,4, \quad \beta_d(t-t') = 0,73 \cdot [1 - e^{-0,01 \cdot (t-t')}] + 0,27 \quad (\text{Eq. IV.9})$$

e φ_f obtido de curvas (veja [01]) sendo tomado o valor de 3,30 para condições de ar normal e espessura de elemento na faixa de 200mm. Finalmente teremos:

$$[\beta_f(t) - \beta_f(t')] = \left[\frac{t}{t+H_f} \right]^{1/3} - \left[\frac{t'}{t'+H_f} \right]^{1/3} \quad (\text{Eq. IV.10})$$

sendo H_f uma função de $h_o = \frac{2 \cdot A}{u} \cdot \lambda$, na qual A é a área

da seção, u o perímetro desta área e $\lambda = 1,5$ para condições normais de ambiente. O valor de H_f será 330(dias) para $h_o = 50\text{mm}$, 570 para 200mm e 1500 para 800mm (Veja outros valores em [01]).

IV.1.3 - Função do ACI

No ACI Model Code a função de fluência é dada

$$\varphi(t, t') = \frac{(t - t')^{0,6}}{10 + (t - t')^{0,6}} \times \varphi_{\infty}(t') \quad (\text{Eq.IV.11})$$

onde: $\varphi_{\infty}(t') = 2,35 \times k'_1 \cdot k'_2 \cdot k'_3 \cdot k'_4 \cdot k'_6 \cdot k'_7$ sendo:

$k'_1 = 1,27 - 0,006 \times h$ - função da umidade

(h=umidade relativa $\leq 40\%$)

$k'_2 = 1,25 \times t'^{-0,118}$:cura úmida } função da idade

ou
 $k'_2 = 1,13 \times t'^{-0,095}$:cura de vapor } | de
 carregamento

$k'_3 = 0,82 + 0,00264 \times S_r$ - função da composição do concreto.

$k'_4 = (2/3) \left[1 + 1,13 \cdot e^{-0,01212(V/S)} \right]$ função da espessura do elemento

sendo d a espessura média do elemento e maior que 38cm.(V = Volume, S = Superfície)

$k'_6 = 0,88 + 0,0024 \cdot s/a \rightarrow s = \text{areia e } a = \text{total de agregados.}$

$k'_7 = 0,46 + 0,09A$: A = ar contido no concreto.

Para o concreto testado foi considerado um h=70%, cura úmida, slump=12 cm, e A=8%, sendo os demais dados utilizados conforme visto em [06].

IV.1.4 - Função de Bazant

No trabalho "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method" de BAZANT [32] é apresentada uma função direta de creep

$$J(t,t') = \frac{\varphi_u(t')(t-t')^{0,6}}{10 + (t-t')^{0,6}} \quad (\text{Eq.IV.12})$$

ou ainda: $J(t,t') = \varphi_u(t') \times 0,113 \ln(1+t-t')$ (Eq.IV.13)

muito utilizada nos cálculos de barragens, e basicamente a mesma apresentada pelo American Concrete Institute, como será apresentada a seguir, e onde:

$$\varphi_u(t') = \phi(\infty,7) \times 1,25 \times t'^{-0,118} \quad (\text{Eq.IV.14})$$

no qual t' é dado em dias e onde $\phi(\infty,7)$ para as idades reduzidas de aplicação de carga estará próximo de 0,5.

IV.1.5 - Função de BAZANT-PANULA

Em "Practical prediction of time-dependent deformations of concrete", BAZANT e PANULA [07], recomendam como função de fluência a chamada lei da Dupla Potência:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} (t'^m + \alpha)(t-t')^n \quad (\text{Eq.IV.15})$$

sendo E_0 o módulo assintótico negativo: $\frac{1}{E_0} = 0,09 + \frac{1}{1,7Z_1^2}$
(Eq.IV.16)

sendo $Z_1 = 5,10^{-5} \times f'_c \times \delta^2$ para δ = unidade de massa do concreto (lb/ft³) e f'_c = a resistência a 28 dias do concreto em ksi.

$\alpha = 1/40(w/c) \Rightarrow w/c =$ fator água-cimento

$m = 0,28 + 1/(f'_c)^2$ e $n = 0,12 + \frac{0,07x^6}{5130+x^6}$ para

$x > 4$, ou $n = 0,12$ se $x \leq 4$, onde

$$x = \left[\frac{2,1x \frac{a/c}{s/c^{1,4}} + 0,1(f'_c)^{1,5} \times (w/c)^{1/3} \times (a/g)^{2,2}}{a_1 - 4} \right]$$

na qual: a/c \rightarrow agregado/cimento

s/c \rightarrow areia/cimento

a/g \rightarrow agregado/brita

$a_1 = 1,0 \rightarrow$ cimento portland comum

0,93 \rightarrow cimento de pega rápida

1,03 \rightarrow cimento de pega lenta

$$\varphi_1 = \frac{10}{2(28^{-m} + \alpha)} \quad (\text{Eq.IV.17})$$

Finalmente para o caso considerado foi tomado $E_0 = 59,6\text{GPa}$, $\varphi_1 = 3,2$, $m = 0,348$, $n = 0,12$, $\alpha = 0,0431$
 $f'_c = 26,5\text{MPa}$.

IV.1.6 - Função de WILSON

WILSON [06] tem descrito a fluência com uma equação onde t e t' são transformados nas variáveis u e u' :

$$J(u, u') = \frac{1}{E_{28}} \left[\frac{1}{\psi(u')} + \varphi_0(u, u') \right] \quad (\text{Eq. IV.18})$$

onde $\psi(u')$ é a influência da idade de carregamento e φ_0 é a fluência básica, sendo:

$$u = 0,483 \ln t \quad \text{para } t \leq 100 \text{ dias}$$

$$u = 0,483 \left[3 - \left(\frac{4 - \ln t}{2} \right) \right] \quad \text{se } 100 < t \leq 10000 \text{ dias}$$

$$u = 1,45 \quad \text{para } t > 10000 \text{ dias}$$

$$\psi(u') = \frac{1 - 0,545(0,996 - u')^3}{1 + 0,25\varphi} \quad \text{se } 0,258 \leq u' \leq 0,996$$

$$\psi(u') = \frac{1}{1 + 0,25\varphi} \quad \text{se } 0,996 < u' \leq 1,45$$

Se o cimento não for Portland Comum outra função mais geral deverá ser utilizada para $\psi(u')$. φ é o coeficiente de fluência tomado em um tempo ∞ para uma idade de carga de 28 dias e mostrado por MATS EMBORG [06] como sendo igual a 2 para os concretos normais. A curva de relaxação a seguir bem demonstra o comportamento desta função de Wilson.

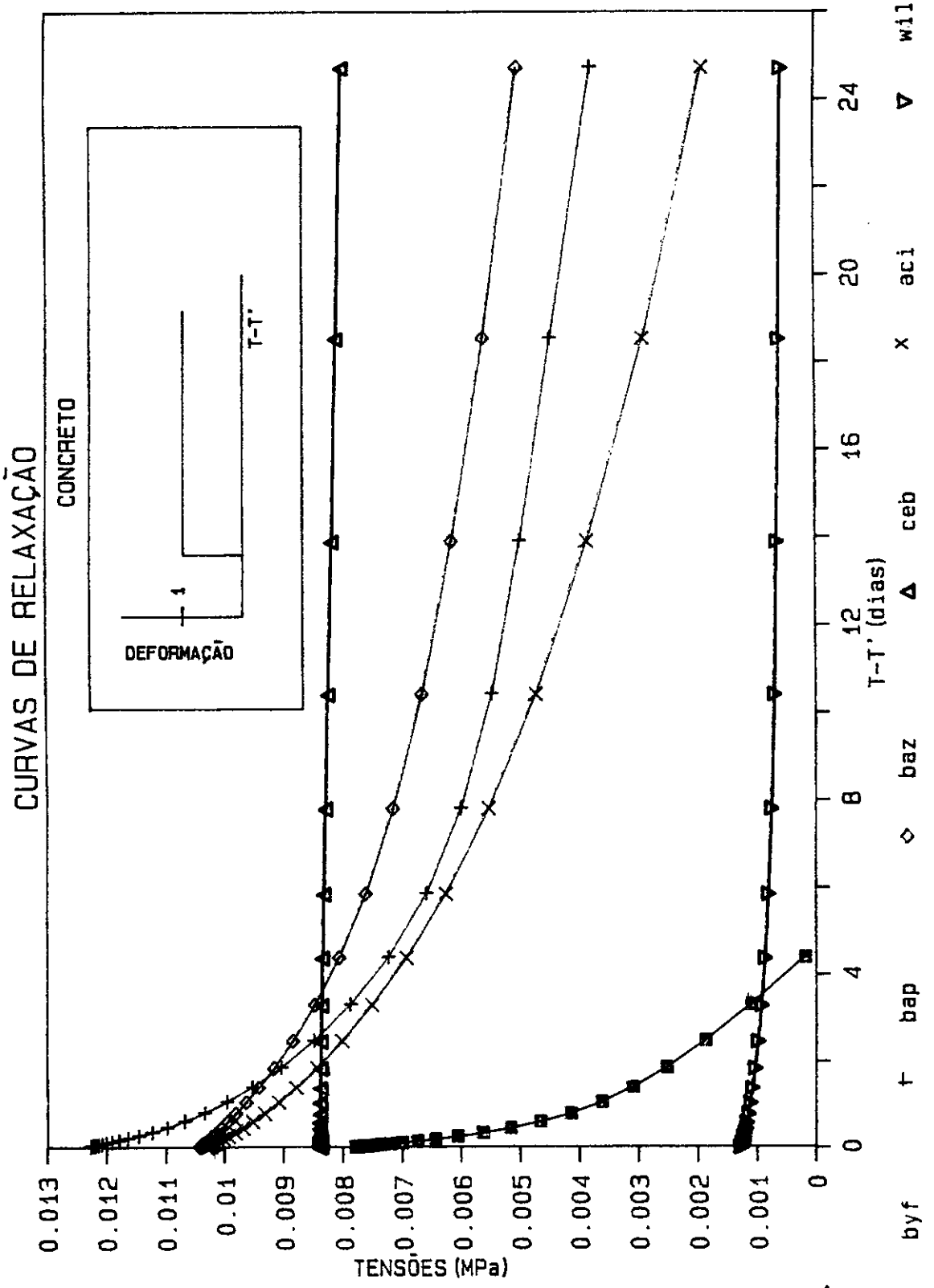


FIG. IV.1-Curvas de relaxação para deformação unitária ■

IV.2 - APLICAÇÃO DO MODELO DE MAXWELL (SÉRIE DE DIRICHLET)

Neste estudo é utilizada uma formulação matemática da relaxação do concreto baseada no modelo de Maxwell, de acordo com o apresentado em [34]. Trata-se de uma formulação diferencial que necessita apenas de alguns pontos discretos, oriundos diretamente de laboratório ou de alguma função de fluência invertida (em geral as formulações são feitas pela fluência) para gerar uma curva contínua de relaxação.

A curva obtida é baseada na série de Dirichlet, a qual apresenta um grau de adaptação extremamente compatível com a relaxação do concreto.

$$R(t,t') = \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') \cdot e^{-\left(\frac{t-t'}{\tau_{\mu}}\right)} \quad (\text{Eq.IV.19})$$

Um dos presentes objetivos visa a verificação da qualidade da curva oriunda de Dirichlet para as idades jovens, tendo em vista que os resultados conhecidos não englobam este período.

Na figura IV.2 é apresentada uma curva de relaxação oriunda da inversão da função de Byfors-Pfefferle ajustada pelo modelo de Maxwell composto de uma cadeia de 10 elementos:

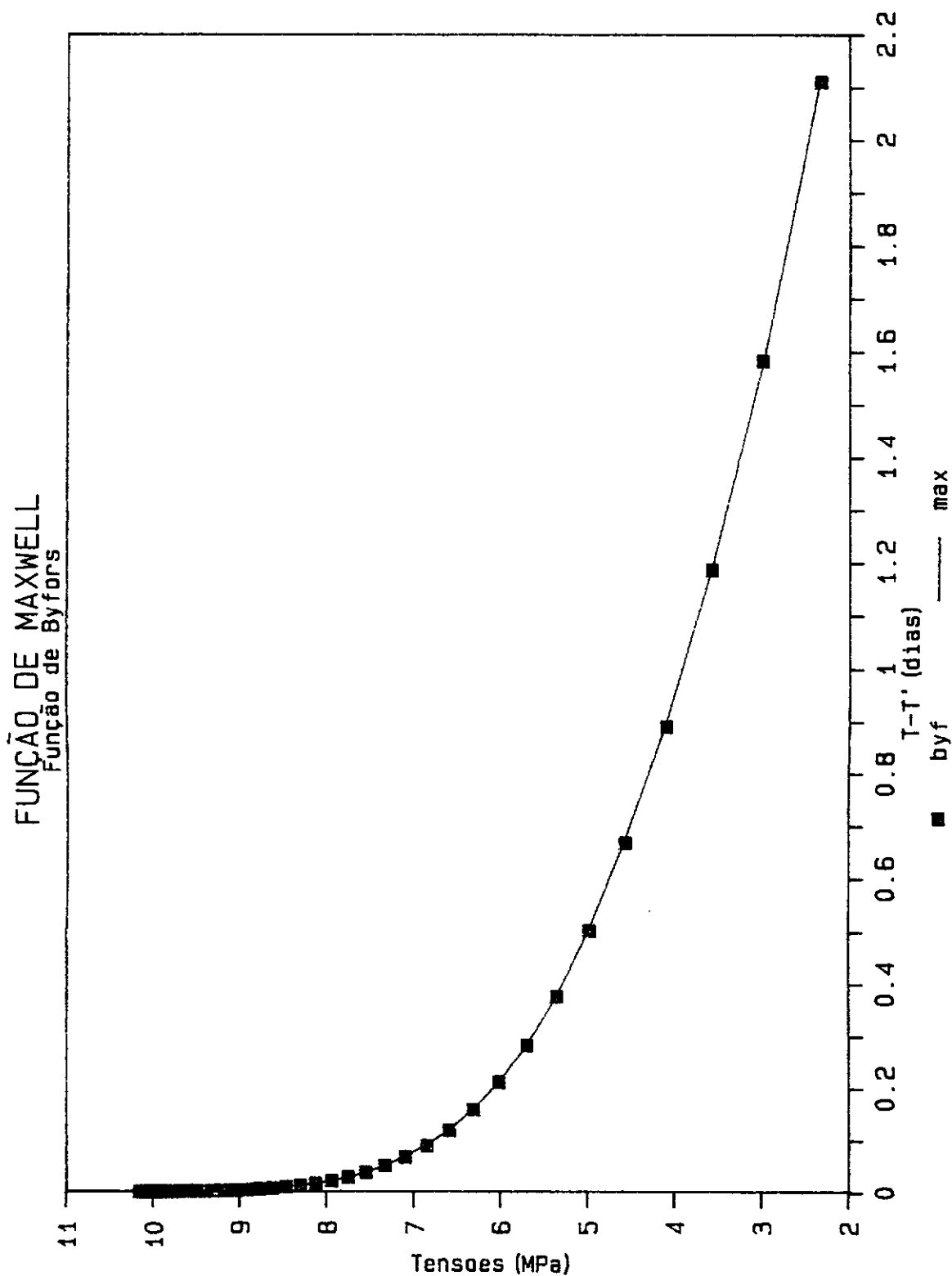


FIG.IV.2-Curva de ajuste da função de Byfors
pela série de Dirichlet

CAPÍTULO V

LABORATÓRIO - DETERMINAÇÕES EXPERIMENTAIS

V.1 - OBJETIVOS

O presente trabalho experimental visa a obtenção em laboratório das curvas de relaxação do concreto jovem em primeira visão e da análise do comportamento e das condições de ensaio do concreto recém-moldado até basicamente a idade de 3 dias quando então, o material deixa a sua juventude (veja II.1), estando a observação aberta a todos os mínimos detalhes de características e de comportamento.

Analizou-se desde a relaxação, passando conseqüentemente pela retração (obtida para que através de compensação da mesma se encontre a relaxação pura), pelo desenvolvimento da resistência à compressão, do módulo de elasticidade longitudinal, das variações de comportamento geradas pela variação de temperatura externa, e ainda, da variação da temperatura interna devida às reações de endurecimento do cimento.

Durante as preparações para que os objetivos fossem alcançados a principal dificuldade foi a determinação dos equipamentos a serem utilizados no concreto jovem, tendo em vista que o mesmo além de apresentar características físicas distintas do concreto endurecido sofre variações destas mesmas características com acentuada velocidade, o que gera importantes implicações de ordem prática nas leituras e nos ensaios propriamente ditos.

V.2 - MONTAGEM DOS ENSAIOS E PRÉ-ENSAIOS.

No Laboratório de Reologia do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ foi esta a primeira vez que se tentou estudar o concreto jovem. Assim sendo vários detalhes tiveram que ser pré-ensaiados ou analisados para a viabilização dos ensaios. Partiu-se da idéia de aproveitar as máquinas de ensaios já existentes para a determinação de curvas de relaxação e de métodos de ensaio utilizados com o mesmo fim para concreto em idades convencionais e adaptá-los para receberem o "novo" material. Quanto às máquinas e instrumentos de leituras (leitores Alfa, caixas comutadoras e leitores Carlson), nenhum problema foi encontrado, já que os mesmos apresentavam níveis de precisão compatíveis com os elementos a serem estudados, entretanto, como proceder estas leituras era o problema.

O primeiro ponto discutido foi a questão da temperatura no concreto jovem, já que o mesmo por si, libera uma quantidade considerável de calor que pode gerar efeitos parasitas nos equipamentos, sendo ainda importante conhecer o comportamento desta curva de temperaturas geradas pelas reações químicas, bem como, os efeitos da temperatura externa sobre os corpos de prova, muito mais sensíveis do que os concretos "maduros".

Testou-se os extensômetros elétricos de resistência da Kyowa, do tipo KM-120-H2-11L100-3 envolvidos ou não em concreto (quando envolvidos estavam em corpos de prova de 5x5x15 cm) submetidos à elevação de temperatura externa até na ordem de 500C (grau de variação obtido de reações exotérmicas do cimento em concretos de barragem, considerado inicialmente) através do aquecimento da água que envolvia o corpo de prova. Os extensômetros sob estas condições não apresentavam comportamento coerente (veja figura V.1 a seguir) não apresentando leituras compatíveis ao retornar à temperatura original, ou mesmo, apresentando

fortes oscilações nas temperaturas simplesmente crescentes ou decrescentes, o que não seria de se esperar e que colocou este instrumento sob suspeitas para a utilização em condições similares.

Entretanto, ao se analisar mais tarde a variação da temperatura interna dos corpos de prova a serem ensaiados, ou seja, com dimensões na ordem de 20 cm, constatou-se que esta variação de temperatura provavelmente não passaria dos 300C, e que então, seria razoável a utilização destes extensômetros em conjunto com os do tipo Carlson para que por um lado se pudesse obter uma maior precisão das medidas de deformação, através de média, checando-se inclusive a qualidade das medidas, e por outro lado, como veio a ocorrer, se tivesse um meio de leituras para o caso de ocorrerem problemas com o Carlson. Outro objetivo para a utilização dos extensômetros elétricos é que continuarão a ser feitas leituras por um certo período de tempo após alcançados os objetivos deste trabalho, a fim de que possa ser feita uma verificação do comportamento destes extensômetros.

Os estudos quanto aos equipamentos a serem utilizados conduziram ao extensômetro do tipo Carlson (tipo CS-10F) que por suas características permite a detecção da variação de temperatura e do comprimento (deformações) em leituras distintas. Foram realizados testes similares aos anteriormente descritos quando além do aquecimento, também resfriou-se o elemento, e então pode-se obter respostas bem mais compatíveis (veja figura V.2) definindo-se, então, a opção por sua utilização nos ensaios de concreto jovem.

Foi considerada ainda a possibilidade da fixação de placas nas faces do corpo de prova para determinação da deformação do concreto através do tenso-tast, como é feito habitualmente para o concreto envelhecido, entretanto, a hipótese foi descartada pois a superfície do concreto jovem apresenta um grau de umidade

excessivo, o que impede a perfeita colagem das plaquetas gerando em muitos casos erros de leitura pelo deslizamento das placas na superfície, por vezes de valores imperceptíveis à visão. A solução apresenta viabilidade apenas para medidas a partir de cerca de 1 dia (os ensaios tiveram início - aplicação de carga - com cerca de 8 horas de idade).

O load-cell não apresentou problemas, tendo sensibilidade suficiente para medições de cargas compatíveis com a resistência do concreto jovem.

Para a determinação da resistência à compressão, bem como para aplicação da deformação imposta para os ensaios de relaxação, o problema elementar é a necessidade de desforma numa idade em que o concreto apenas acaba de assumir a condição de sólido, fisicamente falando, e apresenta uma facilidade de quebra, especialmente nos cantos, muito elevada se comparada ao esforço necessário para se movimentar o corpo de prova (cada corpo de prova pesa cerca de 50kgf - 20x20x60 cm). Para a determinação da idade em que passava a ser possível este manuseio de forma tranquila, a única solução foi pelas tentativas, obtendo-se condições mínimas para cuidadosamente executar-se a desforma (naturalmente o limite foi definido pelos corpos de prova prismáticos, acima mencionados, pois os cilíndricos de $\phi 15 \times 30$ cm são perfeitamente manuseáveis a menores idades) com cerca de 7.5 horas após a moldagem.

Nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade com o uso de um dispositivo da COPPE (veja descrição em V.8) constatou-se a necessidade de colocação de placas de cobre entre os pontos de apoio do aparelho e o concreto com menos de 1 dia de idade, pois a resistência superficial do concreto é tão pouca que os apoios penetram no corpo de prova e ainda movem-se dentro do concreto quando este sofre deformação.

As formas foram escolhidas com 20x20x60 cm para que minimizassem o efeito de armação provocado pelo extensômetro Carlson com 10 cm de comprimento e 2.5 cm de diâmetro colocado no centro do corpo de prova, e para que reduzissem a influência em escala dos agregados graúdos, embora estas dimensões tenham gerado dificuldades de manuseio como já visto anteriormente, para o que as formas também tinham que facilitar ao extremo o processo de desforma quando, então, elas abrem totalmente através de parafusos sem que seja necessário arrancar o corpo de prova.

Na sequência de ajustes e de pré-ensaios, a escolha do traço do concreto teve uma importância fundamental. Partiu-se da utilização de um traço a princípio igual ao utilizado por MATE EMBORG [061] chamado de concreto I, mencionado anteriormente (veja IV.1), o qual gerou um concreto extremamente seco e com uma trabalhabilidade péssima (o que geraria sérios problemas para o adensamento do concreto tendo em vista a existência dos extensômetros no interior da forma), devido ao excesso de areia na dosagem e às características do cimento Portland brasileiro, optando-se então pela utilização de um traço conhecido no laboratório e mais próximo dos traços comumente utilizados no Brasil, ou seja, 1:2,7:3,2 em peso, com fator água-cimento de 0,7, o que resultou de fato em um concreto de ótima trabalhabilidade e aparência, sendo então adotado este traço para toda a pesquisa.

Outro ponto de fortes dificuldades para o ensaio do concreto jovem foi a necessidade, especialmente, nas mais baixas idades, de realizações de diversos ensaios quase simultaneamente, devido à velocidade da variação das características do concreto nesta fase. Ao se iniciar o ensaio de relaxação na idade t' deve-se conhecer a resistência à compressão e o seu módulo de elasticidade nesta idade, os quais devem ser determinados muito cuidadosamente devido ao estado fragil do material, sendo que o tempo necessário à sua determinação pode ser

suficiente para que, quando o ensaio de relaxação tenha início os dados já estejam obsoletos. Como poderá ser constatado, em 1/2 hora a resistência do concreto, ou o seu módulo de deformação, ou sua retração terá crescido de forma extremamente acentuada, em idades inferiores a 24 horas. Este problema não foi totalmente vencido, porém a solução encontrada foi a desforma paralela por duas equipes distintas, a seguir, enquanto um corpo de prova prismático era montado na máquina de relaxação e o outro preparado para leituras de retração, com ligações de cabos e leituras dos estados iniciais por uma equipe, a outra procedia aos ensaios de determinação de resistência à compressão e módulo de elasticidade, e então, imediatamente após a estas duas determinações, a deformação era aplicada no elemento a ser ensaiado à relaxação dando início ao acompanhamento do ensaio propriamente dito.

TESTE EER-KIOWA
TEMP - 25 E 67 C

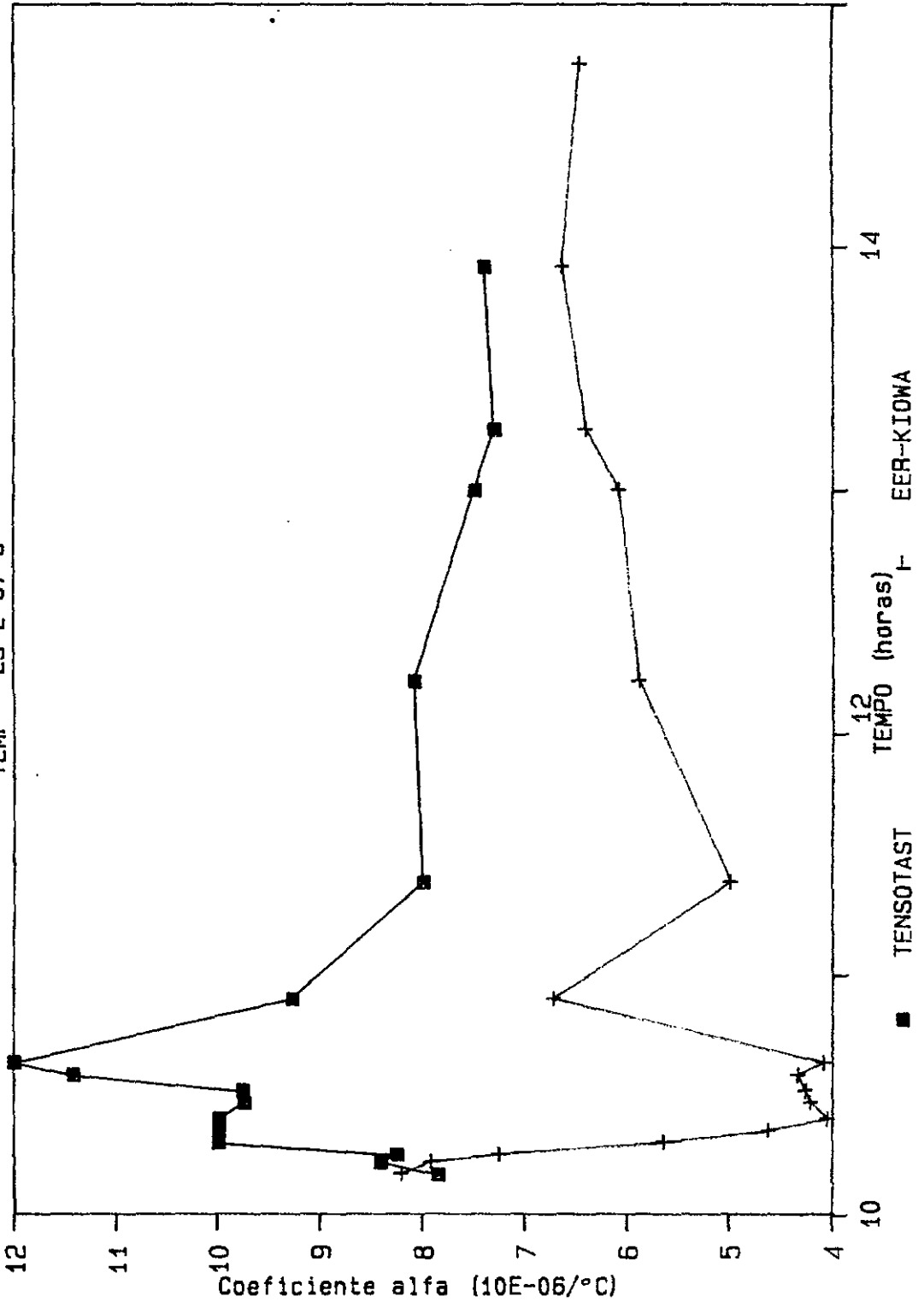
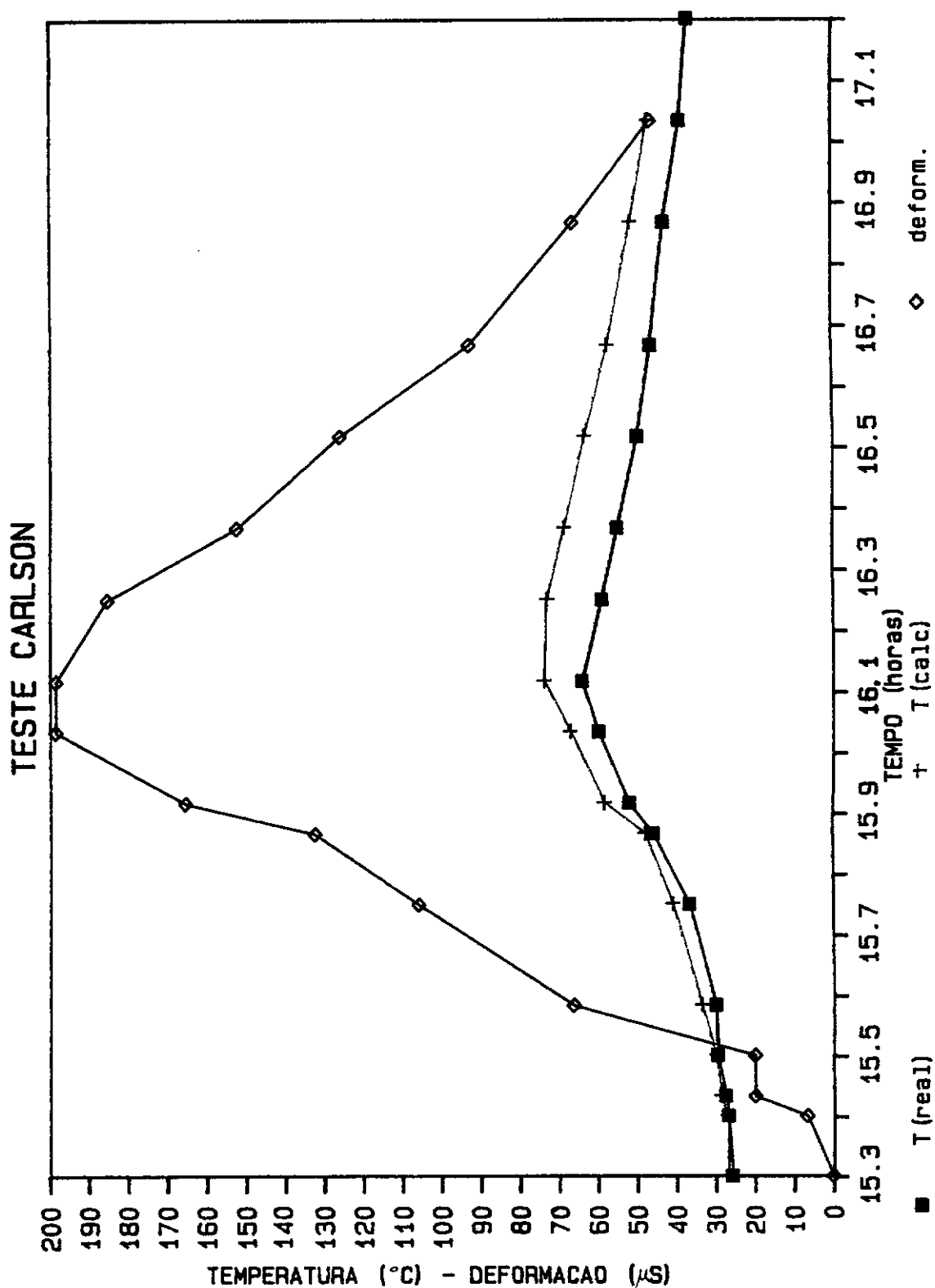


Fig.V.1-Comportamento do eer sob variação de temperatura



Finalmente o conhecimento do concreto jovem requer um acompanhamento ininterrupto pelo menos em suas primeiras 24 horas aproximadamente, quando a sua variação de características tem modificações excessivamente grandes, o que obriga a observações no mínimo durante toda uma noite. O esquema adotado foi o preparo das formas na véspera, a concretagem no dia escolhido, pela manhã, bem cedo, e o início dos ensaios ao final da tarde com leituras a aproximadamente cada 10 minutos durante a primeira hora, a cada 30 minutos até cerca de 5 horas e a cada hora até o final das primeiras 24 horas, quando então o espaçamento pode ser aumentado sem que haja perda nas mudanças bruscas de características. A partir do momento da concretagem são feitas leituras de retração e de temperatura interna do corpo de prova, com o concreto ainda dentro da forma, para um acompanhamento da liberação de calor e da sequência de reação química do cimento, a qual provoca a retração plástica, anteriormente mencionada.

Estes ensaios de concreto jovem geraram dificuldades consideráveis de mão-de-obra devido ao fato de, como visto, vários ensaios terem de ser executados fora do horário padrão de funcionamento do laboratório, como o que levou a se tentar uma vez, de se executar a concretagem às 20 horas para início dos ensaios na manhã seguinte, ou como acabou sendo executado por diversas vezes, com a concretagem logo no início do expediente do laboratório (problemas ocorrem com atrasos, etc.) e manutenção do pessoal necessário após o horário para realização dos ensaios e acompanhamentos necessários até uma estabilização mínima do material que permita a uma só pessoa proceder ao acompanhamento e correções durante toda a madrugada.

Fig. V.3-Cronograma dos ensaios

dia anterior	preparo das formas
8 horas	preparo do concreto
8:30 horas	concretagem
9:30 horas	transporte dos corpos de prova para o laboratório
10 horas	preparo dos equipamentos de leitura
10:30 horas	início das leituras de retração e temperatura
16 horas	desforma dos corpos de prova
17 horas	execução dos ensaios: compressão, módulo-E início da relaxação
ate 3 dias	acompanhamento por leituras e correções obtendo relaxação pura

V.3 - ELEMENTOS DOS ENSAIOS

Após a definição dos elementos básicos para a realização dos ensaios partiu-se para a execução dos mesmos. A previsão inicial era de 3 séries de ensaios numa primeira etapa para posteriormente se decidir sobre a necessidade ou não de novas séries.

V.3.1 - Concreto utilizado

Como visto em IV.1 foi utilizado o concreto 1:2.7:3.2 em peso, com fator água-cimento de 0.7. Utilizou-se cimento Portland do tipo CP-32 da Mauá, areia lavada e brita 1 com abatimento médio de 12 cm.

V.3.2 - Corpos de Prova

Para cada ensaio foram moldados 2 corpos de prova prismáticos de 20x20x60 cm, sendo 1 para relaxação e outro para retração, além de 15 corpos de prova cilíndricos com $\phi 15 \times 30$ cm sendo 5 para resistência à compressão (8,5h, 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias), 8 para determinação de módulo de elasticidade (2 com 8.5h, 2 com 3 dias 2 com 7 dias e 2 com 28 dias) além de 2 outros utilizados para esclarecer ou complementar alguns dos ensaios previstos.

V.3.3 - Cura

A cura durante as primeiras 8 horas de idade foi realizada no mesmo ambiente do ensaio, ou seja, temperatura aproximadamente constante, através de aparelhos de ar condicionado, a cerca de 22°C, cobertos com sacos de linhagem úmidos para evitar perdas de umidade para o meio ambiente.

Após iniciado o ensaio, os corpos de prova ficavam expostos ao ar, mantendo-se ainda a temperatura constante. O ambiente de ensaio é desprovido de correntes de ar.

V.3.4 - Desforma

A desforma dos corpos de prova prismáticos foi realizada com cerca de 7.5 horas de idade, com o maior cuidado para evitar quaisquer choques e quebras de cantos, sendo que este último detalhe ocorreu por várias vezes devido a dificuldades de manuseio.

Quanto aos corpos de prova cilíndricos, eram desformados os necessários para os primeiros ensaios durante o primeiro dia, e os demais após completarem 24 horas, após o que eram mantidos no ambiente do ensaio principal.

V.3.5 - Máquina de carga

Foi utilizado equipamento próprio para ensaio de relaxação conforme figura V.4, composto por barras e placas de aço, especialmente projetados [05] para este tipo de ensaio com correção de retração, pois o sistema de fixação das placas através de porcas permite o acréscimo ou liberação de tensões do corpo de prova.

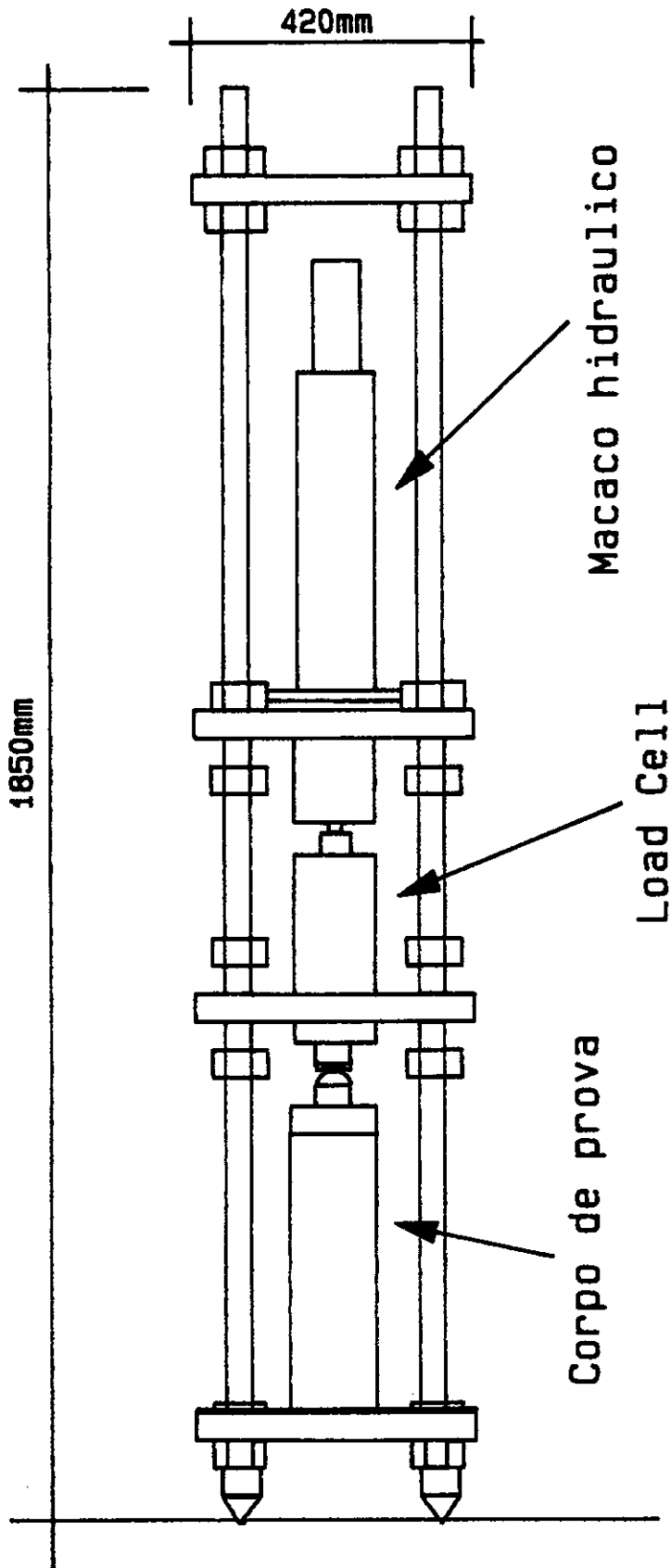


Fig.V.4-Maquina de ensaios

V.3.6 - Demais equipamentos

Foi utilizado um macaco hidráulico com capacidade de 30 tf, células de carga do tipo Kyowa semelhantes com constantes $0.002498\text{tf}/\mu\text{S}$ e $0.00125\text{tf}/\mu\text{S}$. Em cada corpo de prova foram colocados 1 extensômetro tipo Carlson no centro e 2 extensômetros elétricos de resistência, Kyowa, do tipo KM-120-H2-11L100-3 conforme figura V.5 afixados através de sistemas de arames de modo a impedir sua movimentação durante a concretagem e adensamento.

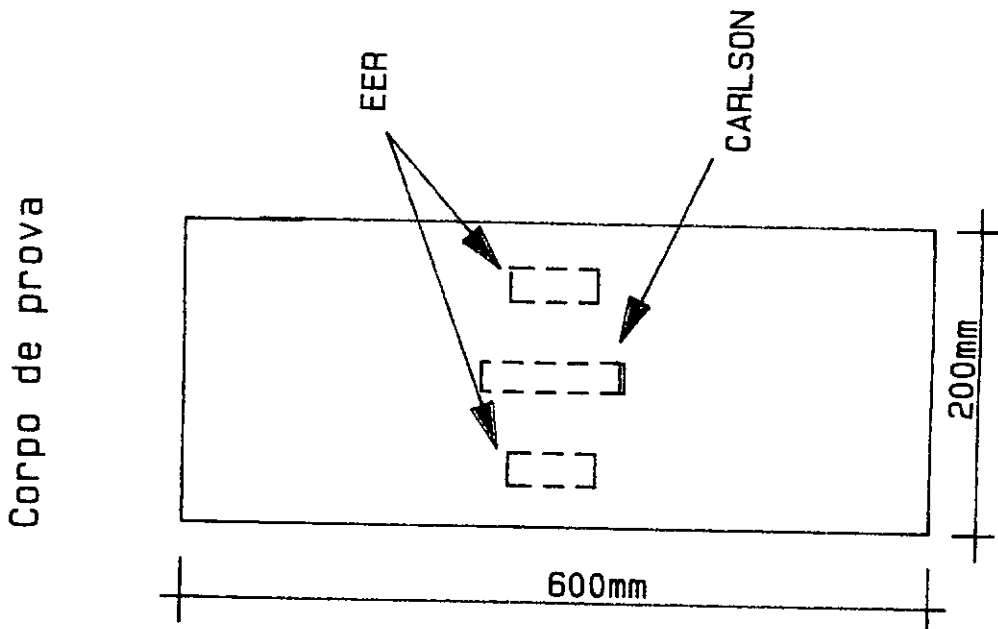


Fig.V.5-Esquema de colocação dos extensômetros

As leituras das células de carga e extensômetros elétricos foram feitas através de caixas comutadoras e de leitores Alfa (foram utilizados dois de cada) que fornecem leituras em μS diretamente, enquanto os

extensômetros Carlson tiveram suas leituras de deformação e de temperatura em seus próprios leitores. Os extensômetros Carlson foram ligados através de caixas de passagem que permitiam leituras simultâneas e de um mesmo leitor. Também foram utilizados micro-computadores para verificação imediata da necessidade, ou não, de aplicação de correção no carregamento.

V.3.7 - Correções

As leituras de deformações específicas devidas à retração do corpo de prova testemunho permitiam que a deformação imposta ($\epsilon - \epsilon^0$) fosse mantida constante com consideração deste efeito. Ou seja, ocorrendo uma deformação $\Delta\epsilon^0$, lida no corpo de prova testemunho, esta seria prontamente imposta (com o mesmo sinal) ao corpo de prova sob deformação imposta. Cabe lembrar aqui, que os sensores instalados no corpo de prova testemunho são sensíveis a deformações térmicas decorrentes de uma variação de temperatura ambiente $\Delta\epsilon^T$. Logo a deformação $\Delta\epsilon^0$ lida é igual à deformação $\Delta\epsilon^T$ devida à retração somada à deformação $\Delta\epsilon^T$ devida à temperatura.

Entretanto, um outro efeito decorrente da máquina de ensaios foi considerado e paulatinamente corrigido: A relaxação da carga referente ao corpo de prova de concreto é equilibrada por um decréscimo da força de tração nas barras de aço que sofrem por conseguinte um decréscimo de deformação. Ora, este decréscimo de deformação deve ser compatibilizado pelas deformações do corpo de prova de concreto, ocorrendo então uma variação da deformação imposta a este corpo de prova. A esta variação chamaremos de $\Delta\epsilon^i$. Logo, quando é constatada uma variação $\Delta\epsilon^i$ (de compressão), isto significa que uma deformação de tração com o mesmo módulo ($\Delta\epsilon^i$) deveria ser prontamente imposta ao corpo de prova, para que a deformação imposta resultante fosse constante ao longo do tempo.

Para ser mantida uma deformação imposta resultante constante ao longo do tempo, devemos então fazer a superposição dos dois efeitos ($\Delta\epsilon^0$ e $\Delta\epsilon^1$) e tomarmos a decisão de proceder, ou não, às correções a partir desta superposição.

Assim, se considerarmos o sinal "+" para compressão, quando a diferença entre $\Delta\epsilon^0$ e $\Delta\epsilon^1$ é positiva significa que as porcas deverão ser apertadas, e quando ocorrer o contrário, ou seja, diferença negativa as porcas deverão ser relaxadas para permitir que o corpo de prova se deforme o necessário a fim de retornar à situação aplicada inicialmente (veja figs. V.8 e V.11 a seguir).

Para $\Delta\epsilon$ "+" quando compressão:

Se $\Delta\epsilon^0 > \Delta\epsilon^1$ aperta-se as porcas

Se $\Delta\epsilon^0 < \Delta\epsilon^1$ afrouxa-se as porcas.

Estes apertos e afrouxos eram executados à base de tentativas de tal forma a se obter variações de deformações impostas nulas.

V.4 - PRIMEIRO ENSAIO DE RELAXAÇÃO

Este ensaio realizado em 15 de março de 1988 deixou-nos algumas informações que embora o tenham comprometido quanto aos fins esperados, tiveram importância fundamental para a boa qualidade dos demais.

1 - Como havia apenas uma equipe para montagem do ensaio, a aplicação da carga geradora da deformação acabou só ocorrendo com idade superior a 11 horas (o esperado seriam 8 horas), pois os ensaios de determinação do módulo de elasticidade foram especialmente

demorados devido às dificuldades já mencionadas de manuseio do concreto jovem, tendo que se refazer os ensaios até ao andamento correto esperado, o que gerou a busca de soluções de ultima hora, como por exemplo, a utilização das plaquetas de cobre para viabilizar o uso do dispositivo COPPE para medição do módulo de elasticidade longitudinal e ainda a desforma dos corpos de prova prismáticos, 20x20x60 cm foi dificultada pela falta de experiência em seu manuseio, bem como, somente foi efetuada após a conclusão dos primeiros ensaios mencionados.

2 - As correções mencionadas no item anterior não foram realizadas rapidamente, ou seja, deixou-se acumular valores elevados de deformações residuais ocorridas com um módulo de elasticidade muito baixo, para compensá-las com módulo de elasticidade muito elevados, o que ocasionou a eliminação da carga a ser relaxada em intervalo de tempo mínimo, ou seja, após a correção não havia carga para relaxar.

Observe-se que, ao se aplicar uma deformação $\Delta\epsilon$ no tempo t'_1 em um elemento estrutural com módulo de elasticidade $E(t'_1)$ obtém-se uma tensão $\Delta\sigma(t'_1)$. Se por outro lado aplica-se a mesma deformação $\Delta\epsilon$ em um tempo t'_2 no mesmo elemento estrutural, com $E(t'_2)$ muito maior que $E(t'_1)$ a tensão resultante será $\Delta\sigma(t'_2)$ muito maior que $\Delta\sigma(t'_1)$, ou seja, se a correção é efetuada logo após a geração da deformação residual, esta correção será de $\Delta\sigma(t'_1)$, entretanto, se o tempo passar, $E(t'_1)$ se transformará em $E(t'_2)$ e a correção necessária à mesma deformação será $\Delta\sigma(t'_2) \gg \Delta\sigma(t'_1)$.

3 - Outro fator importante foi o tamanho das deformações de retração que nos surpreendeu, já que ao regularmos as porcas de fixação da deformação deixou-se as que deveriam ficar livres, muito próximas da placa, e quando a placa se movimentou devido à retração acabou por se apoiar nestas porcas impedindo a continuidade desta deformação a qual deveria ser livre.

Assim sendo este primeiro ensaio não teve utilidade quanto à retirada dos dados de relaxação, objetivo principal do ensaio.

V.5 - SEGUNDO ENSAIO DE RELAXAÇÃO

Neste ensaio iniciado em 22 de março de 1988 houveram cuidados e programações para não se repetir os erros anteriores: a utilização de duas equipes, o que proporcionou o início do ensaio de relaxação com $t'=9$ horas; o uso do micro-computador no laboratório para proporcionar os valores das correções necessárias quase que imediatamente, permitindo a execução das correções quase com o mesmo módulo de deformação; cuidou-se da liberação suficiente das placas para a retração inicial do concreto que é consideravelmente grande.

Após 26 horas aproximadamente da moldagem ocorreu falta de energia elétrica em todo o laboratório o que acarretou um forte aumento de temperatura no ambiente de ensaio, especialmente por tratar-se de dia com temperatura muito elevada (próximo aos 40°C). Durante este período de cerca de 24 horas sem energia não foi possível o acompanhamento da relaxação e das deformações pelo fato de serem os equipamentos de leituras eletrônicos, entretanto, após a normalização, pode-se observar que as esperadas correções deste período, não chegaram a ser necessárias, pois o aumento da temperatura gerou uma deformação térmica (que pode ser captada pelo sensor instalado no corpo de prova testemunho - retração) que veio se somar à deformação por retração que compensou o efeito $\Delta \epsilon^i$, conforme descrito em V.3.7, em geral contrário, da máquina de ensaio. Assim, logo que a temperatura interna do concreto começou a reduzir, devido à volta da atividade do ar condicionado, as correções voltaram a se fazer necessárias.

Embora com a interrupção da aquisição dos dados de relaxação durante mais de 1 dia, obteve-se uma curva de qualidade bastante boa, como pode ser observado na figura V.6 a seguir.

O ensaio teve continuidade até aos 28 dias, seguindo-se após apenas para captação de dados para o laboratório. A carga inicial, geradora da deformação fixa capaz de gerar tensões de compressão de cerca de 30% da resistência do concreto com 9 horas de idade, relaxou totalmente após cerca de 80 dias, sendo que após os 28 dias o concreto deixou de receber as correções eventualmente necessárias, o que provavelmente fez com que a carga relaxasse totalmente. As planilhas dos ensaios podem ser analisadas no Anexo 3.

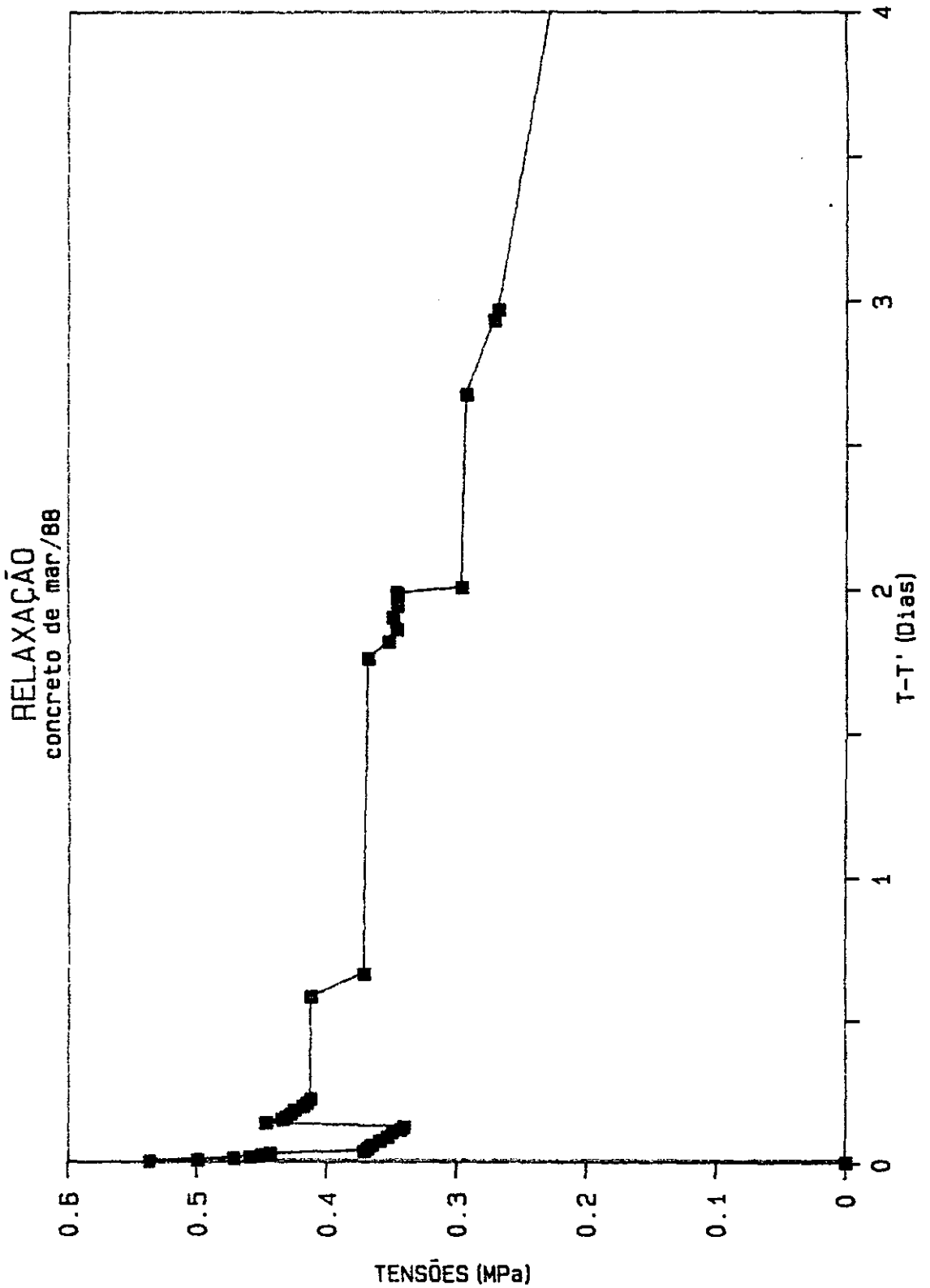


Fig.V.6 - Curva de relaxação do concreto de mar/88

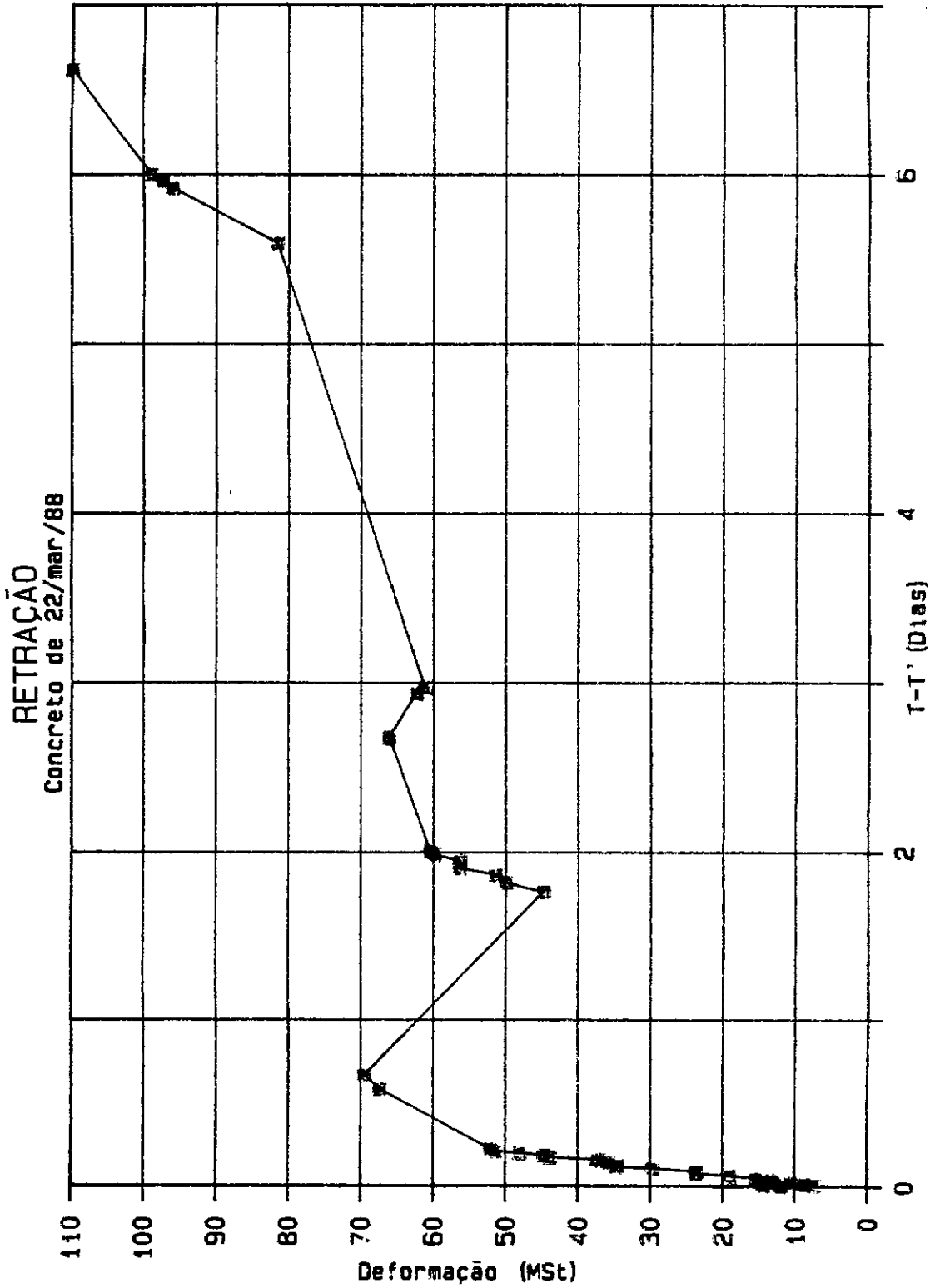


Fig.V.7-Curva de retração do concreto 2

CORREÇÕES
Concreto de 22/mar/88

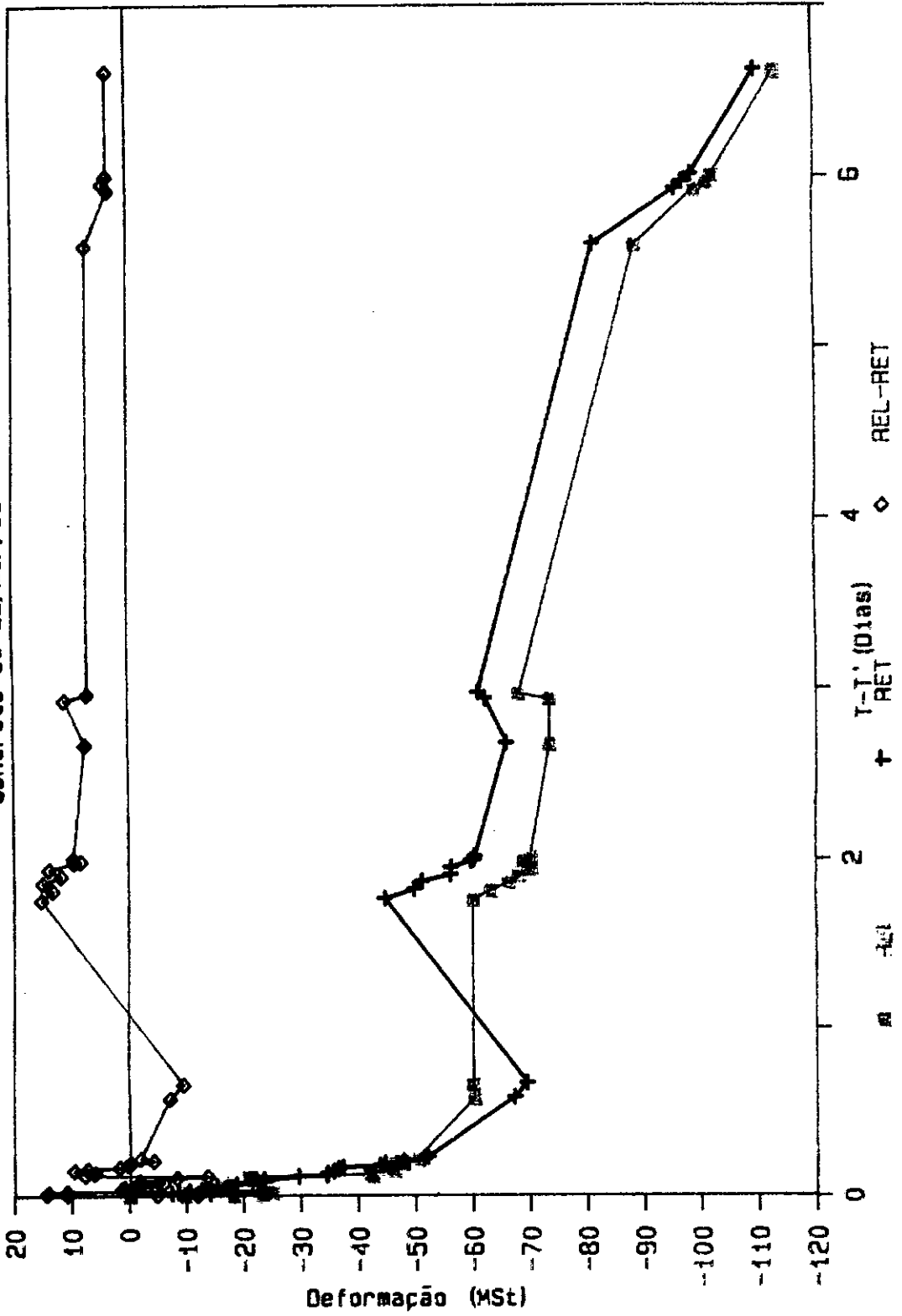


Fig.V.8-Correções aplicadas durante o ensaio

V.6 - TERCEIRO ENSAIO DE RELAXAÇÃO

Neste terceiro e último ensaio, realizado em 12 de maio de 1988, além dos cuidados anteriores, preparou-se um gerador para se prevenir do único problema ocorrido no segundo ensaio, mas não chegou a ser necessária sua utilização, e assim o ensaio chegou aos 28 dias apresentando resultados da melhor qualidade como podem ser vistos e analisados, a seguir, as planilhas estão no anexo 4 para complementação das observações:

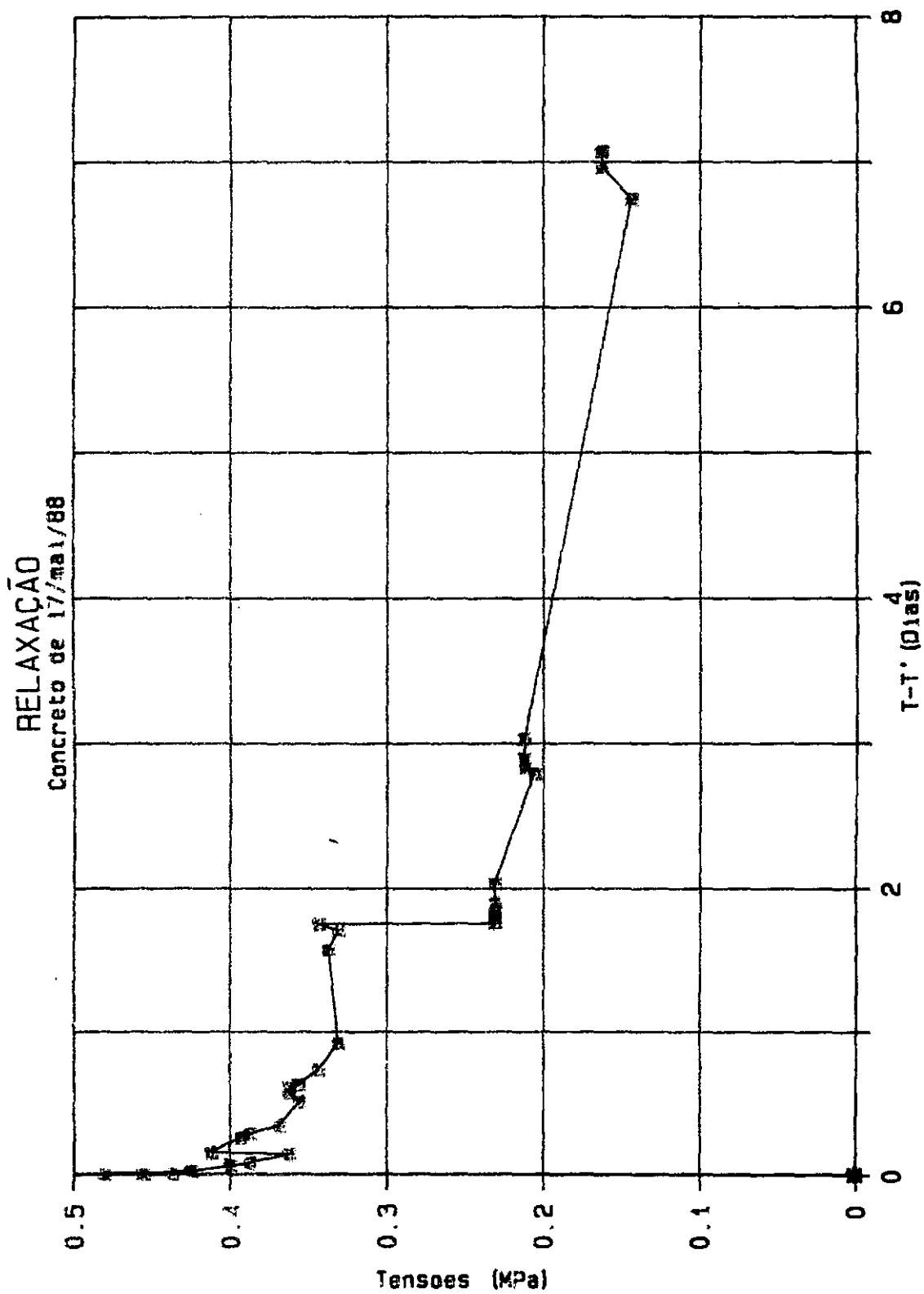


Fig.V.9-Curva de relaxação do concreto 3

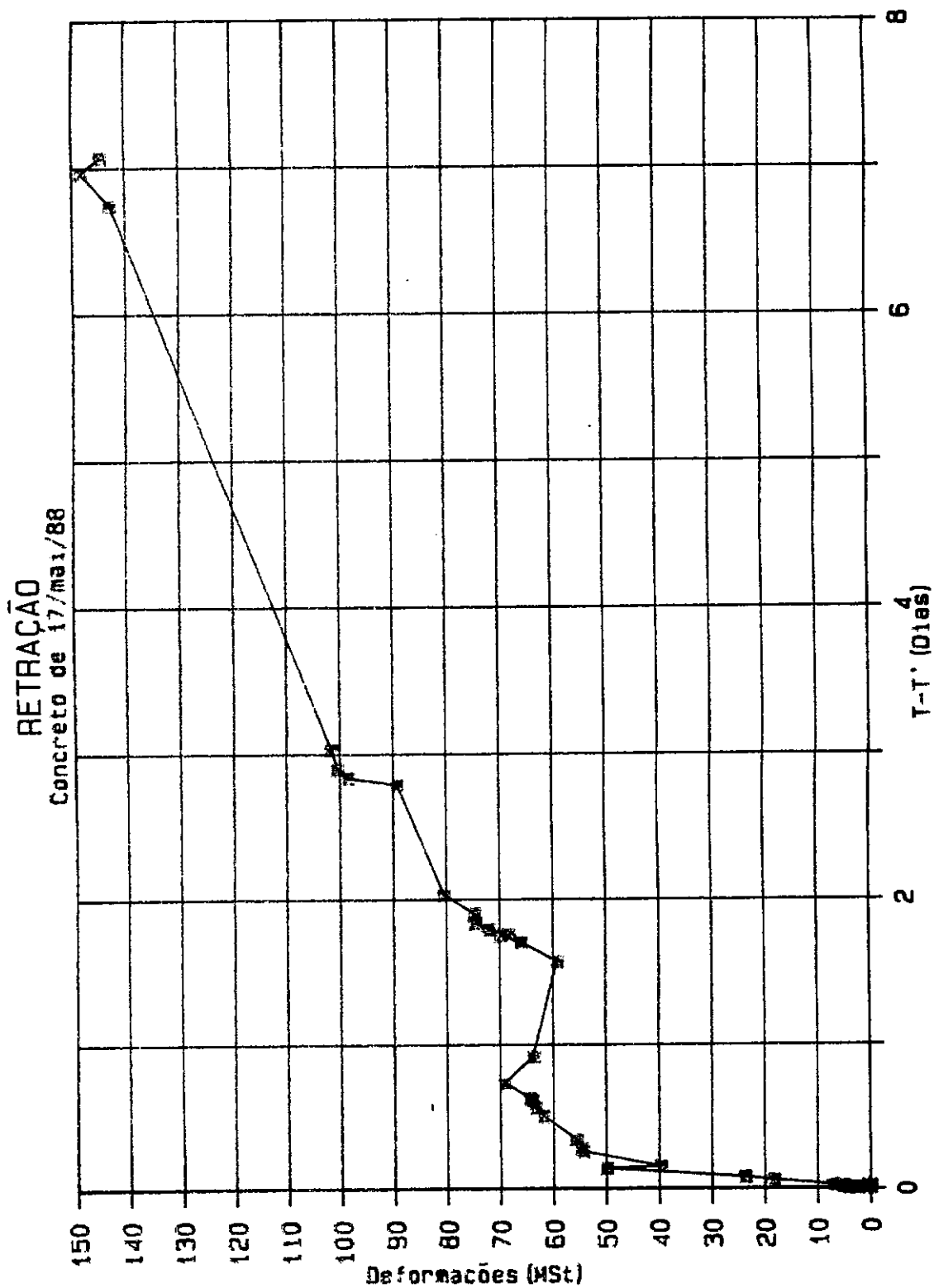


Fig.V.10-Curva de retração do concreto 3

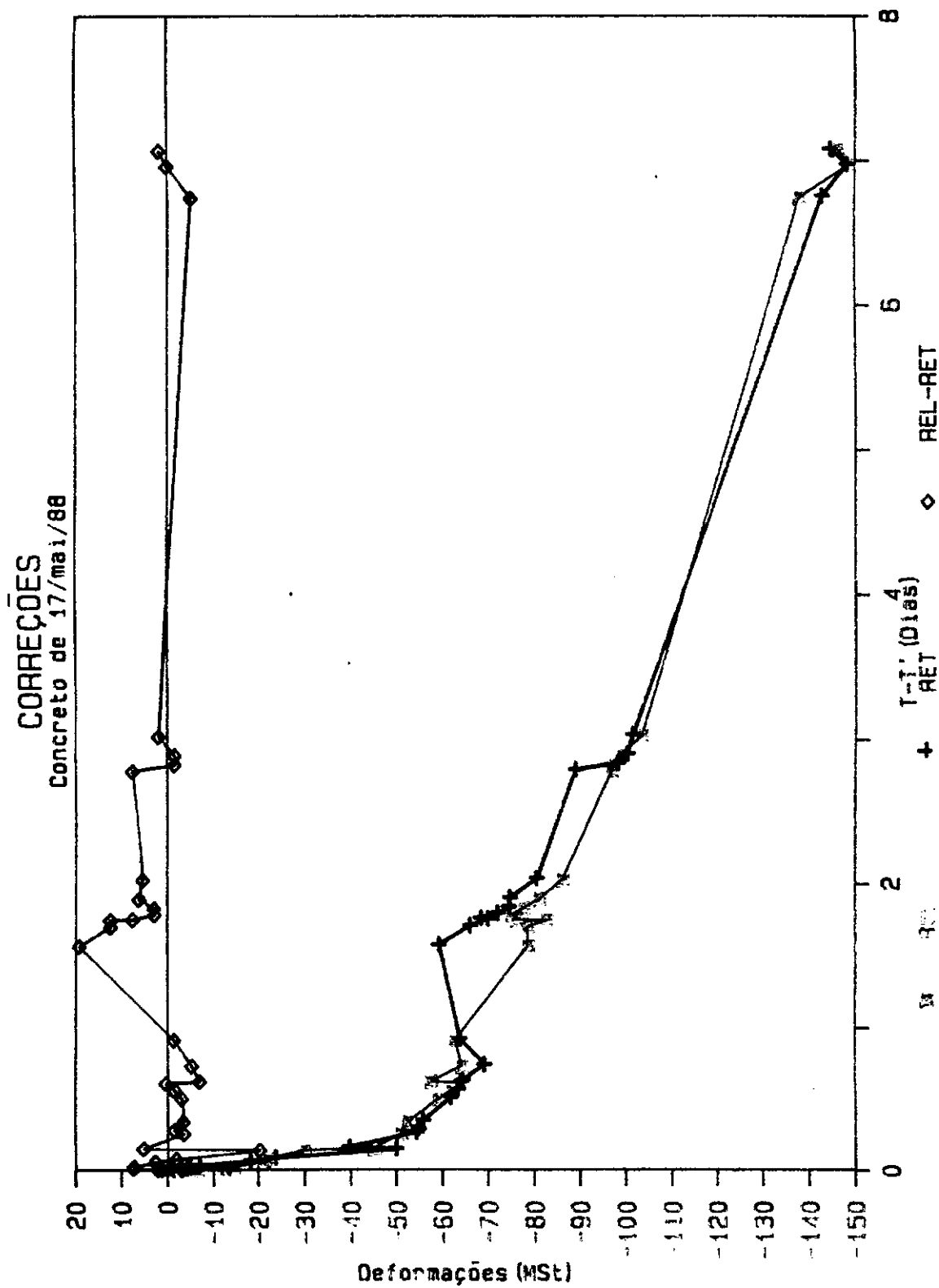


Fig.V.11-Correções aplicadas durante o ensaio

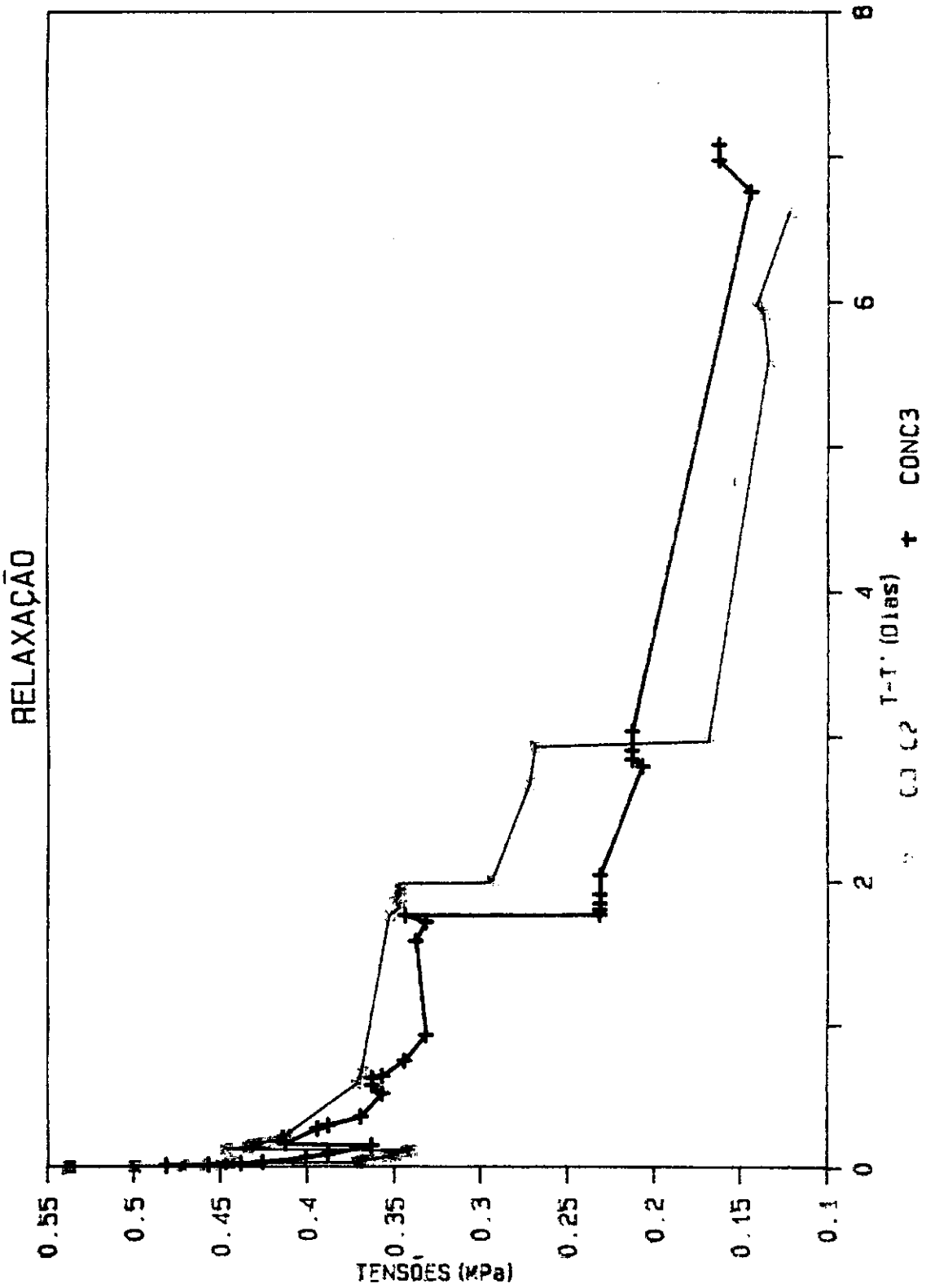


Fig. V.12-Curvas de relaxação dos 2 concretos sobrepostas

V.7 - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova $\phi 15 \times 30$ cm na prensa hidráulica Amsler. Os concretos foram ensaiados com 9 horas, 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias e com a consequente obtenção das curvas resistência \times tempo apresentadas nas figs. VI.1 e VI.1a. Durante os ensaios, a carga em geral, foi aplicada com velocidade de 4t/min. para ensaios a partir dos 3 dias e com velocidade de 1t/min. para as primeiras idades.

Estes ensaios são importantes para chamar a atenção para a velocidade de crescimento durante a fase denominada concreto jovem, em relação às demais fases.

	Concreto II	Concreto III
9 horas	0.98	1.17
1 dia	----	6.36
3 dias	8.30	11.72
7 dias	12.74	13.78
28 dias	17.28	16.78

Tab. V.1-Resistência à compressão (em MPa).

Estes resultados são mostrados adiante a fim de permitir análise e comparação do concreto jovem e da adaptabilidade das funções empíricas.

V.8 - ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

LONGITUDINAL

Estes ensaios realizados a 9 horas, 3, 7 e 28 dias para todos os concretos foram realizados com corpos de prova cilíndricos de $\phi 15 \times 30$ cm e no mínimo com duas determinações para cada idade. A determinação foi feita através de carga aplicada pela mesma prensa do ensaio anterior e com as medidas de deformações através do chamado dispositivo COPPE, aparelho composto de duas estruturas de alumínio, uma superior e outra inferior, que abraçam o corpo de prova e tem interligando-as de cada lado uma outra outra estrutura aporticada em alumínio, instrumentada com extensômetros elétricos de resistência que ligados a um leitor Alfa por exemplo, informam a deformação do corpo de prova submetido a tensões.

As cargas são aplicadas segundo método da RILEM, ou seja, vai-se aplicando cargas e lendo as consequentes deformações até uma carga de cerca de $1/3$ da resistência do corpo de prova, a seguir cria-se uma oscilação de carga e deformação, até que elas se estabilizem nos limites inferiores e superiores de carga já atingidos. Quando esta estabilização é obtida a carga é então elevada até a rutura do corpo de prova, sendo que desta última curva é tirado o módulo de deformação longitudinal secante do concreto, utilizado nas funções de fluência e de relaxação. A velocidade de aplicação das cargas obedece ao item anterior.

A seguir pode-se ver os dados obtidos do laboratório, enquanto que as curvas serão analisadas em conjunto com as funções empíricas nas figs.VI.2 e VI.3.

	Concreto II	Concreto III
9 horas	3540	3490
1 dia	17500	16000
28 dias	19100	18000

Tab.V.2 - Módulo de Deformação (em MPa).

V.9 - TEMPERATURA

Como já foi mencionado anteriormente, foi feito um acompanhamento da variação da temperatura no interior dos corpos de prova desde a moldagem até o final dos ensaios de relaxação do concreto com cerca de 28 dias de idade.

Assim, durante este acompanhamento pode-se observar o período forte da liberação de calor pelas reações exotérmicas do cimento (ver fig.V.13 a/b) no período próximo a 12 horas de idade, sendo importante notar nesta fase que o concreto foi moldado em ambiente com temperatura elevada e transportado para ambiente de temperatura baixa e controlada com cerca de 1 a 2 horas de idade, período em que se pode observar que a curva de temperatura do concreto cresce, embora pouco, quando a temperatura de seu ambiente foi fortemente reduzida. A seguir a temperatura do corpo de prova sofre um queda vertiginosa tendendo a um equilíbrio com o meio ambiente, o que ocorre com cerca de 18 horas, quando então apresentou um comportamento até certo ponto inesperado ao continuar baixando, para então sofrer uma inflexão e a partir da idade de 1 dia apresentar um acompanhamento com a temperatura ambiente, conforme apresentado nas figuras V.15a e V.15b.

Nesta rápida análise do comportamento térmico dos concretos ensaiados pode-se através das figuras V.14a e V.14b, proceder-se a um relacionamento entre o comportamento da curva de temperaturas de cada concreto e a curva de diferenças entre variação da deformação imposta e variação da deformação por retração e temperatura apresentada anteriormente, o que mostrou haver uma forte interligação entre as reações de uma e de outra, conforme mostrado em V.3.7.

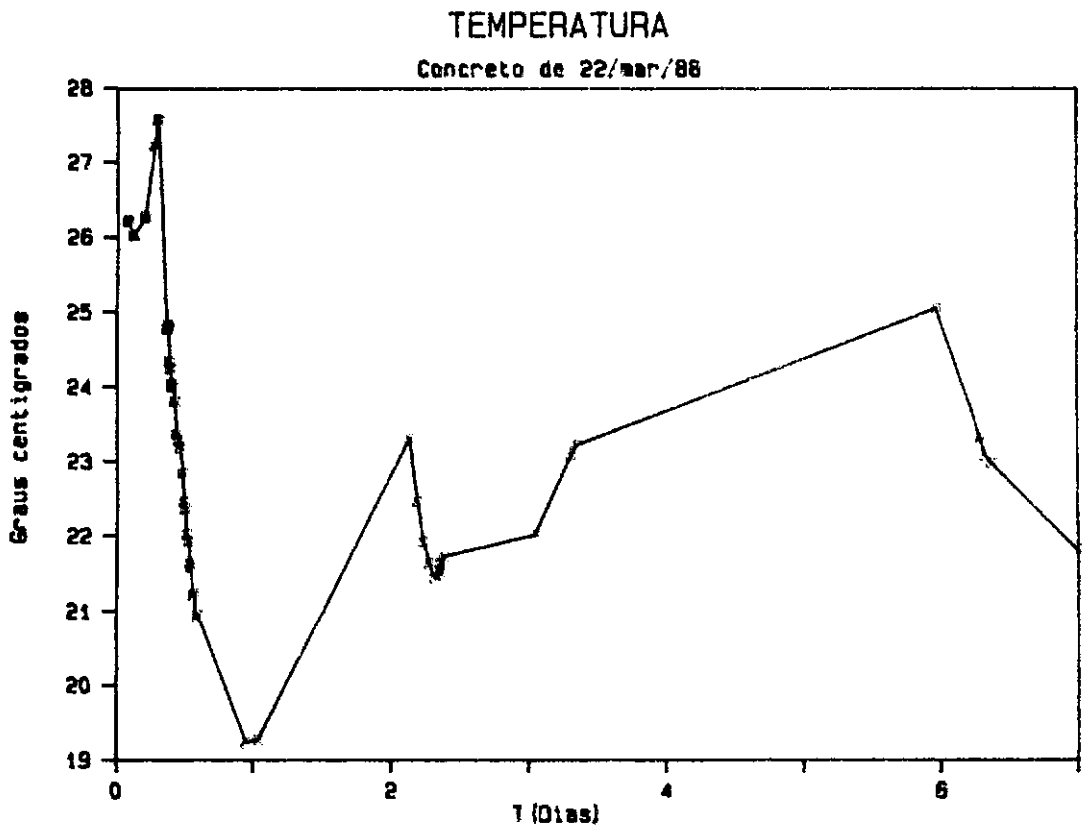


Fig.V.13.A-Temperatura do concreto 2

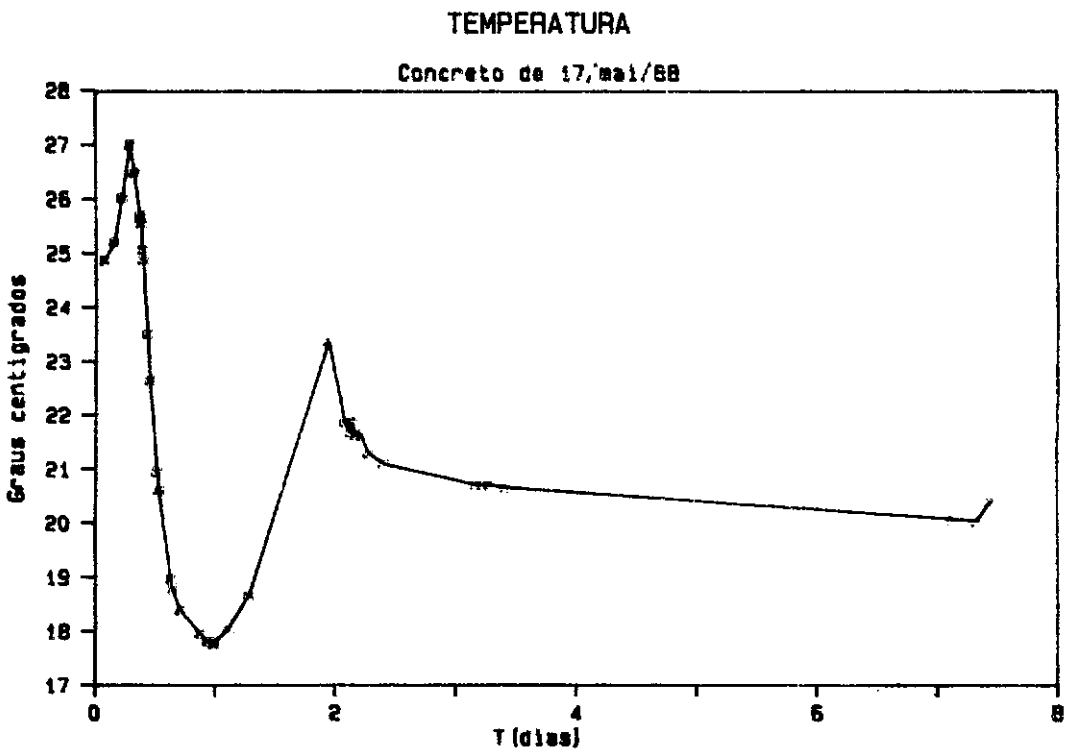


Fig.V.13.B-Temperatura do concreto 3

Efeitos da temperatura
 Concreto de 22/mar/68

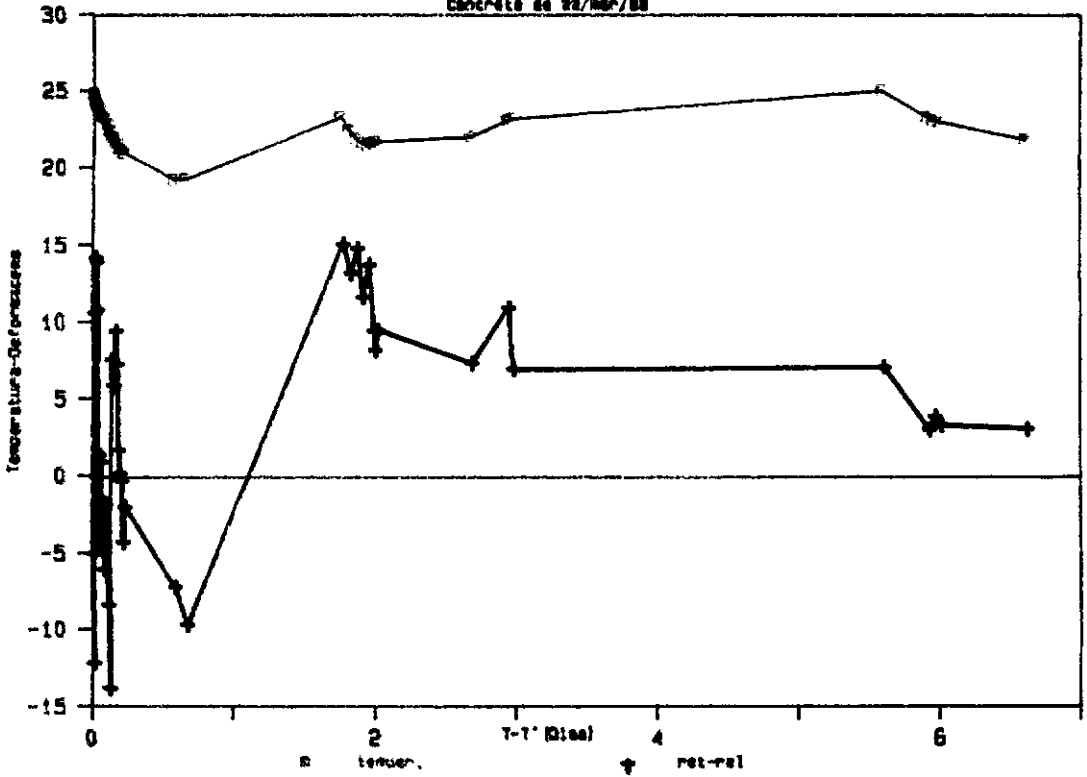


Fig.V.14.A-Efeitos da temperatura

Efeitos da temperatura
 Concreto de 17/mai/68

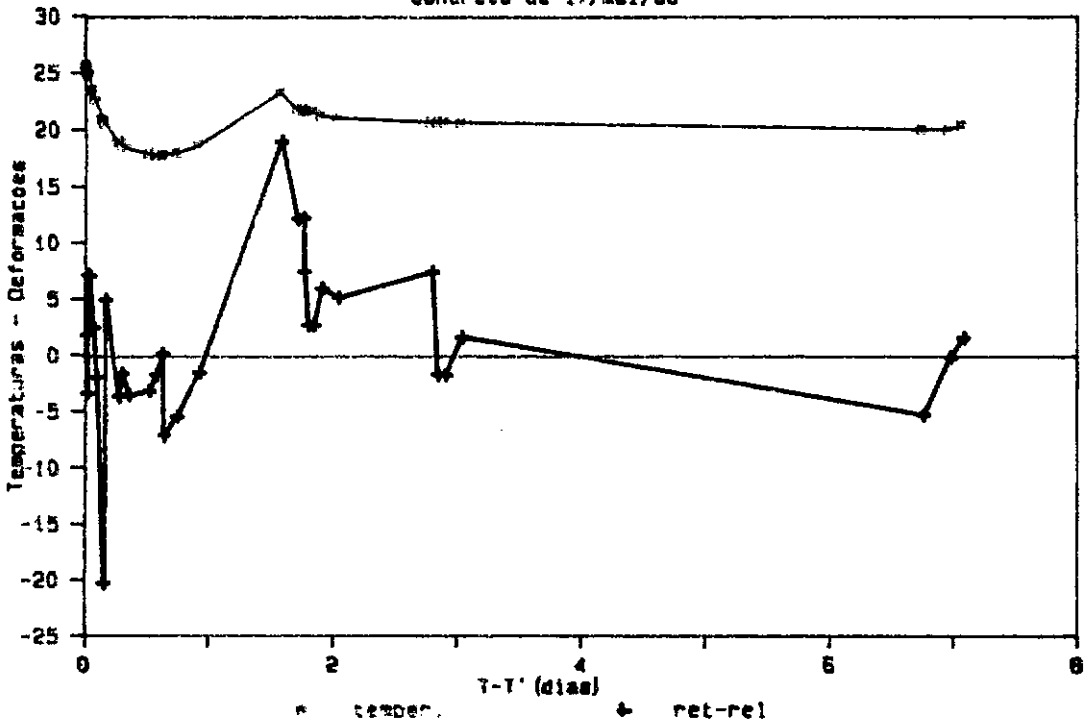


Fig.V.14.B-Efeitos da temperatura - Concreto 3

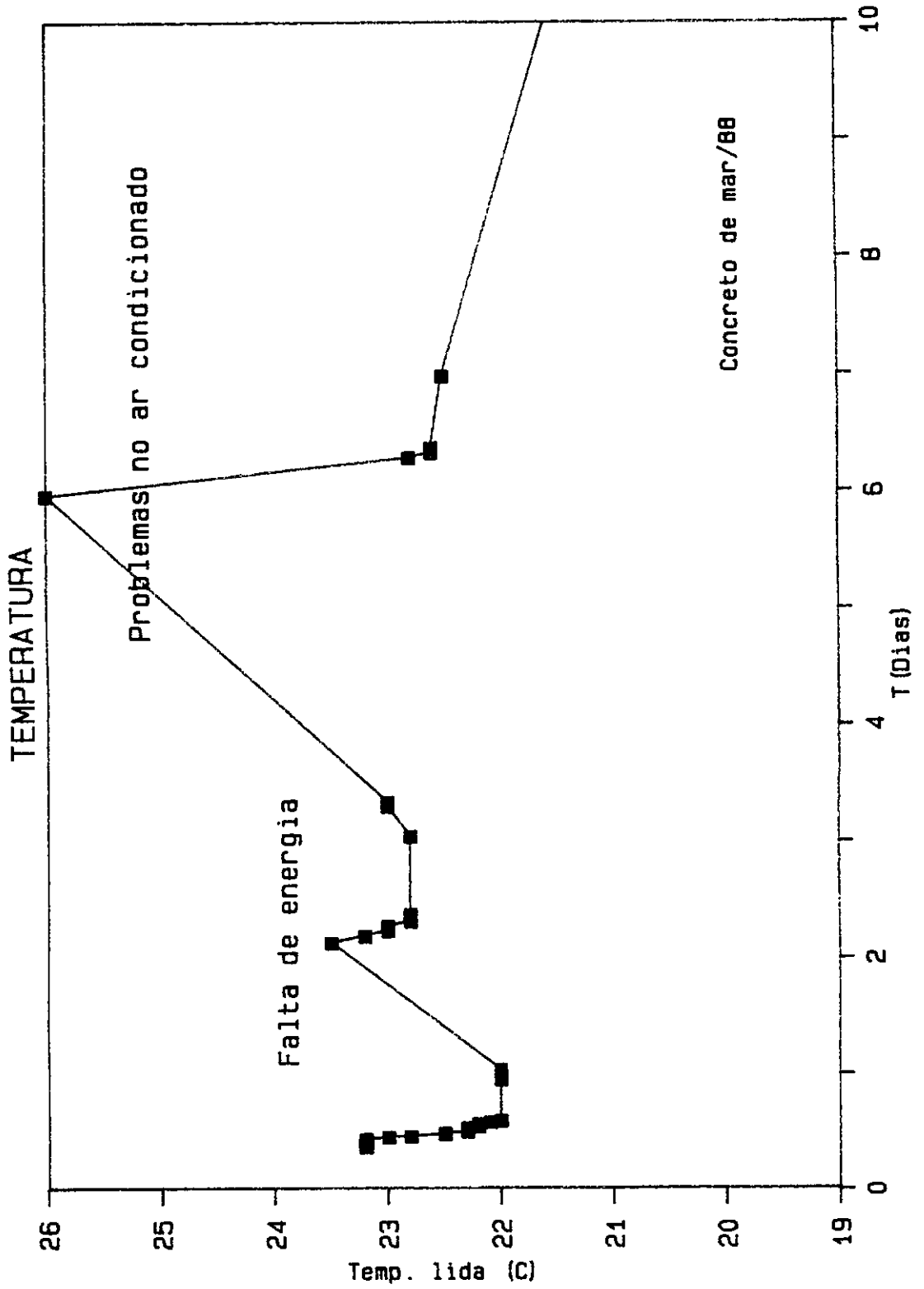


Fig.V.15a - Curva de temperaturas ambientes

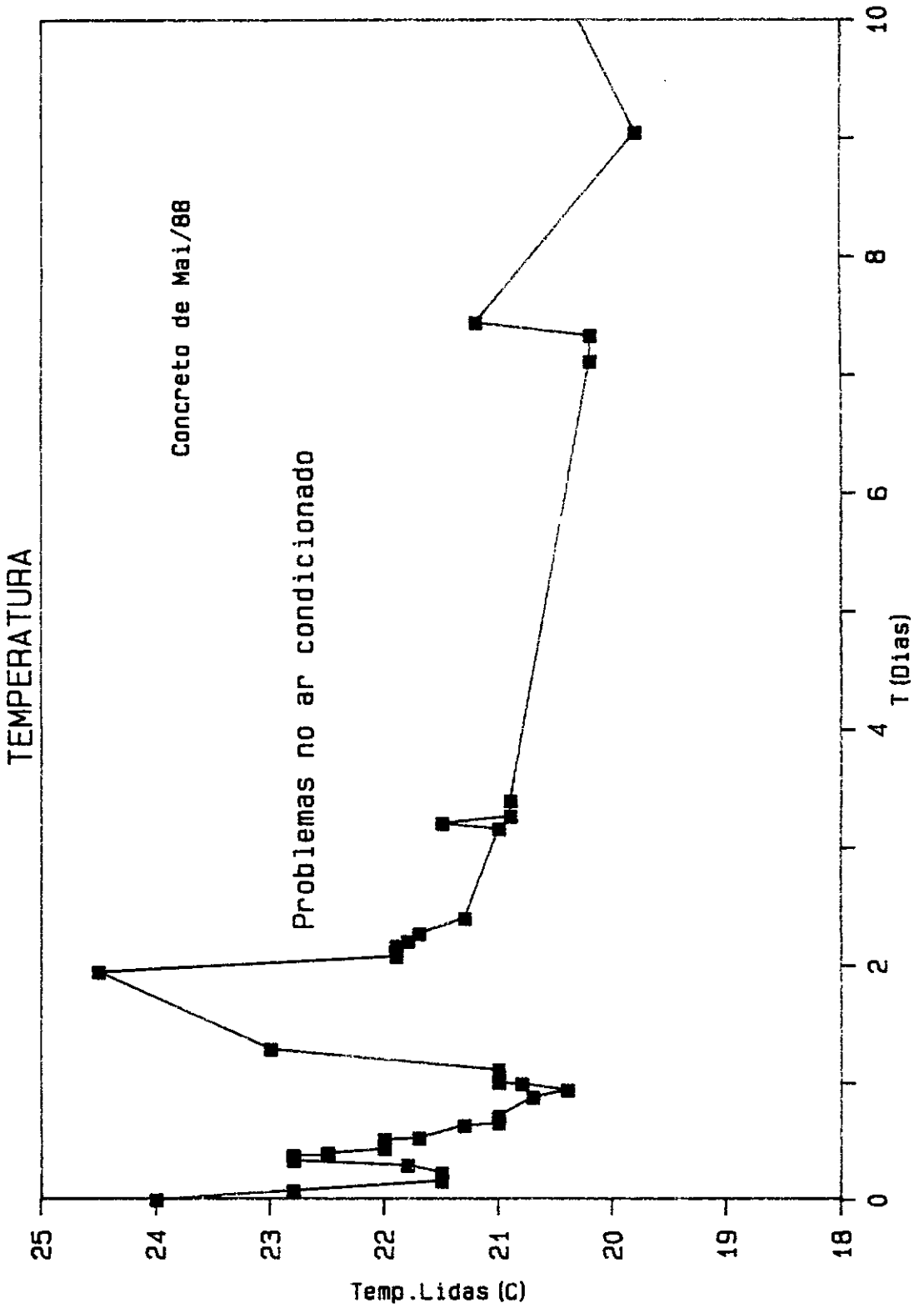


Fig.V.15b - Curva de temperaturas ambientes

CAPÍTULO VI

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL

VI.1 - ANÁLISE DAS FUNÇÕES EMPÍRICAS

VI.1.1 - Resistência à compressão

Como foi visto anteriormente, a literatura oferece funções empíricas para determinação do desenvolvimento da resistência à compressão, como é o caso de forma especial das funções de BYFORS [04] e do CEB [07], baseada na resistência alcançada, ou prevista, para a idade básica de 28 dias.

Para a função de Byfors (Eq.II.1 e II.2) utilizou-se $a_1 = 1,5 \times 10^{-3}$; $a_2 = 0,4152$; $b_1 = 3,236$ e $b_2 = 0,136$ para $f_{cc,28}$ o valor da resistência a 28 dias de cada um dos concretos utilizados no laboratório. Assim na fig.VI.1 poderemos observar o comportamento desta função, comparada com os resultados obtidos com o concreto de março de 88.

Para a função do CEB, enunciada na Eq. II.3 podemos visualizar na mesma figura a sua forma de curva, também utilizando-se para $f_{cc,28}$ os valores das resistências do concreto obtidas no laboratório.

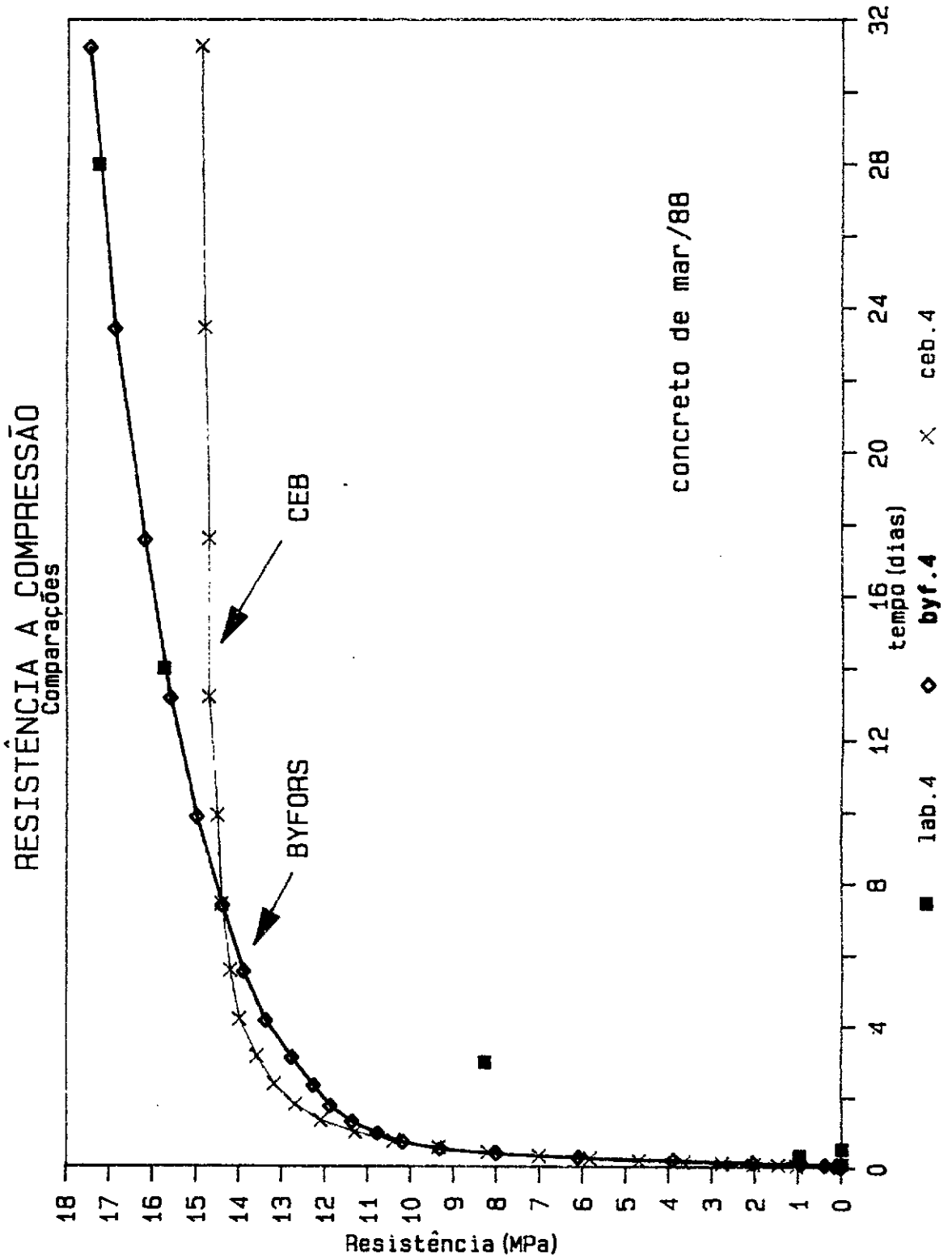
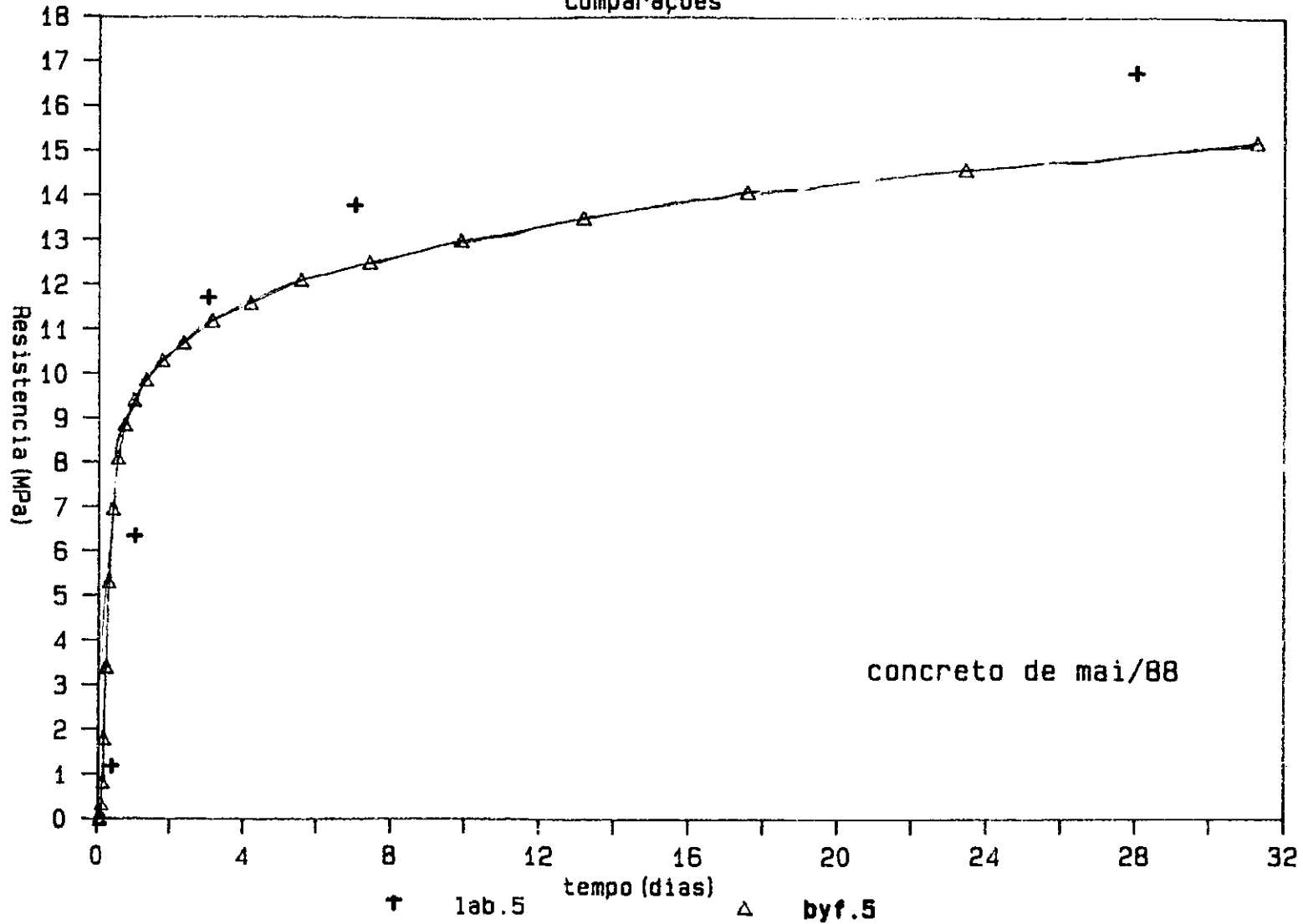


Fig.VI.1 - Resistência a compressão

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Comparações

Fig. VI.1-a - Curva de resistência a compressão



As figuras anteriores (Figuras VI.1 e VI.1a) mostram serem as funções discutidas de qualidade bastante satisfatória quanto ao comportamento real do concreto, inclusive de forma especial na fase considerada concreto jovem, que como a figura muito bem deixa transparecer, para a resistência à compressão nos ensaios realizados, tem sua faixa até os 2 dias.

A curva de Byfors, entretanto, apresenta uma ajustagem consideravelmente melhor que aquela apresentada pelo CEB, sendo portanto adotada nas aplicações das funções de fluência que correlacionam estes dois parâmetros.

De uma forma geral, a função de Byfors para o acompanhamento do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto apresenta uma boa qualidade também quando os dados analisados não se referem ao concreto jovem.

VI.1.2 - Módulo de Deformação Longitudinal

Da mesma forma que a resistência à compressão, as funções do módulo de elasticidade são empíricas buscando da melhor forma possível acompanhar o desenvolvimento desta propriedade em cada concreto em relação ao seu envelhecimento. Para o concreto jovem a dificuldade de ajuste de uma função é consideravelmente maior devido à velocidade com que os valores do módulo de elasticidade se modificam. Nesta análise das diversas funções possíveis foram descartadas as de Byfors e as de Bazant-Panula, por ter-se encontrado resultados menos precisos que os a seguir apresentados e também porque, MATS EMBORG [06] chama a atenção para maus resultados obtidos especialmente ao analisar a função de fluência de Byfors-Pfefferle em conjunto com as 2 funções acima referenciadas. Desta maneira, a função de BAZANT (eq.II.7), como é demonstrado a seguir, nas figuras VI.2 e VI.3 apresenta resultados de qualidade consideravelmente

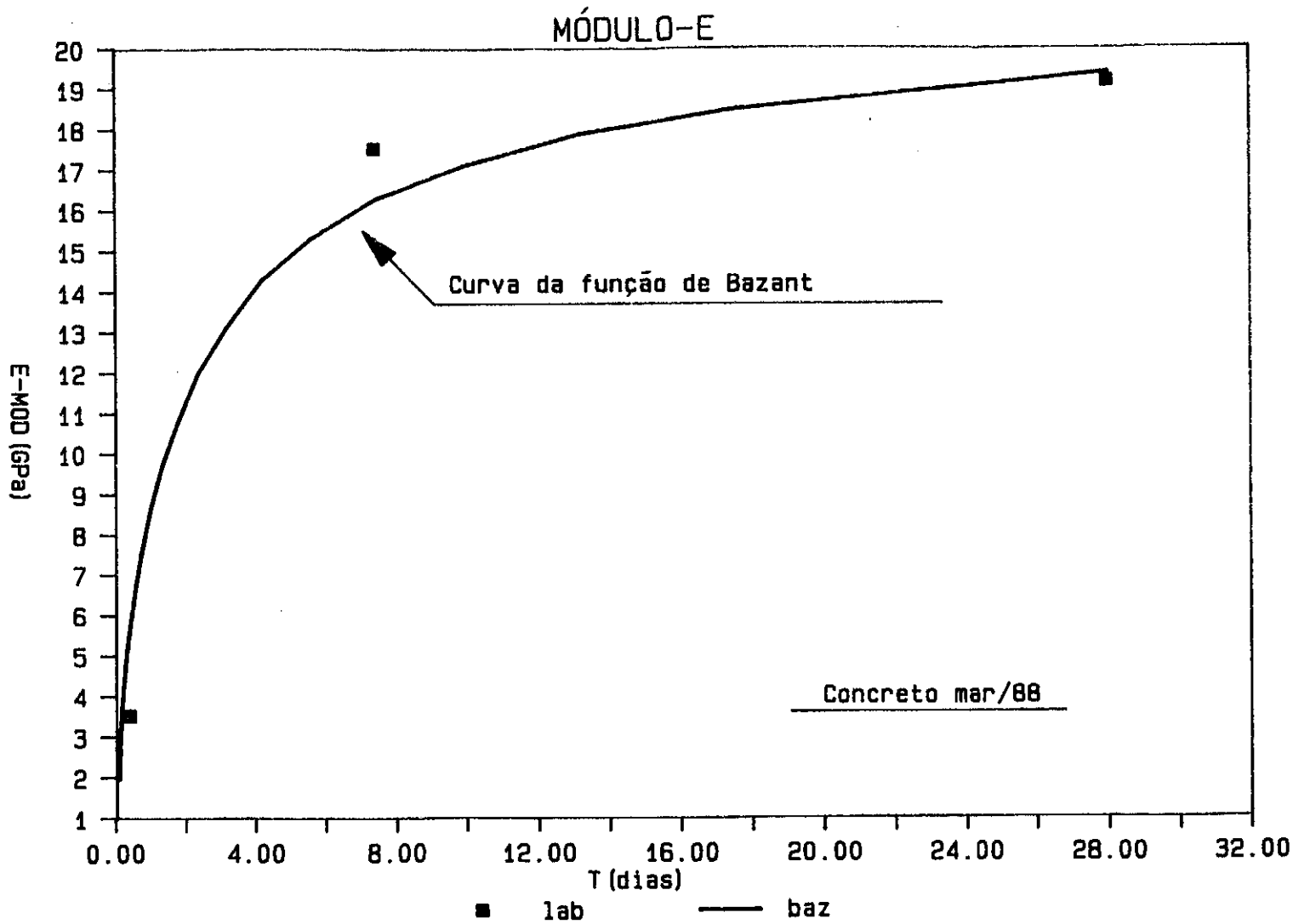
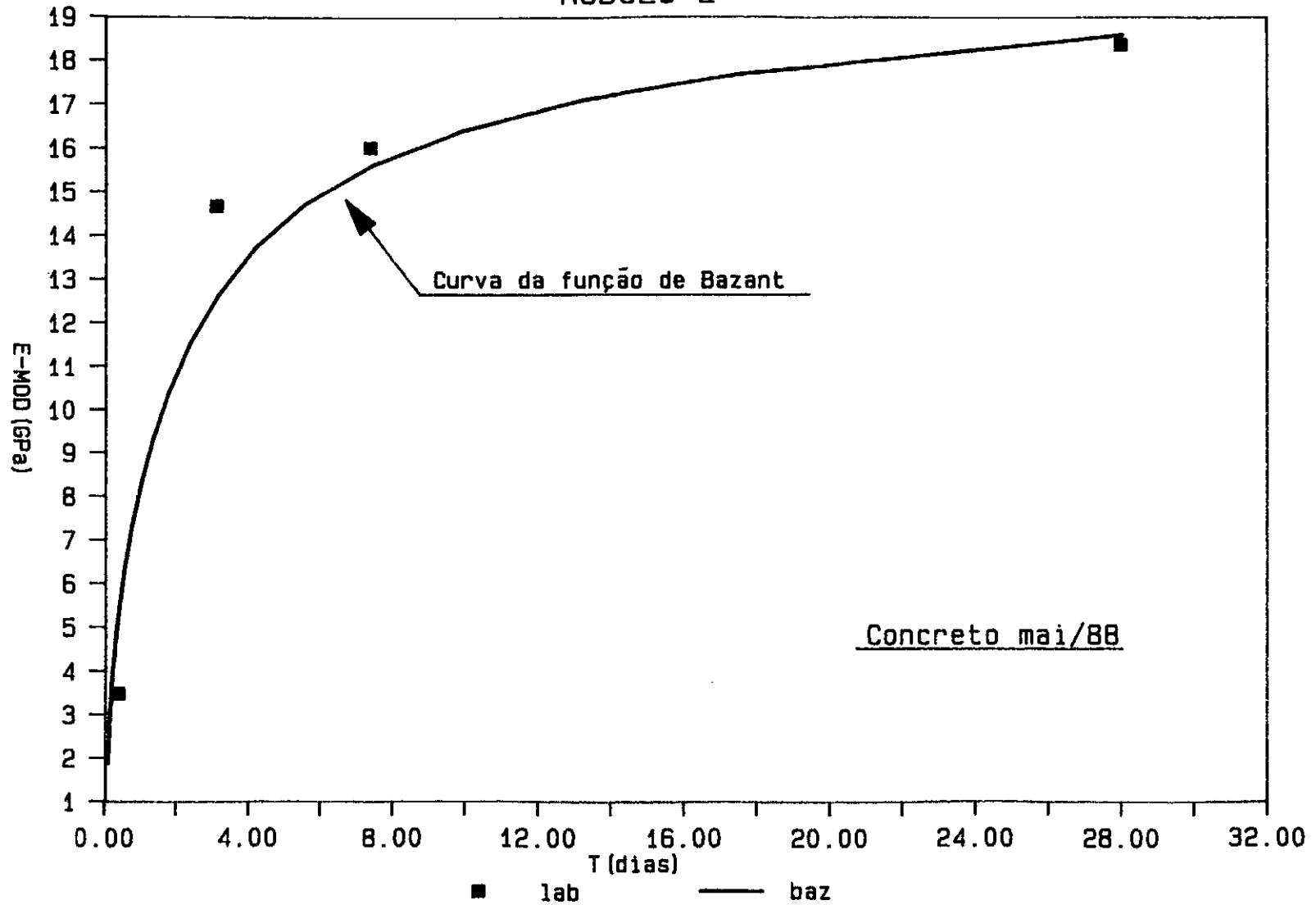


Fig.VI.2 - Módulo de elasticidade

MÓDULO-E

Fig. VI.3 - Módulo de elasticidade



Esta curva apresenta de uma forma clara o final da etapa do concreto jovem, (ver II.1) pela ocorrência de alteração considerável no direcionamento da mesma, quando o tempo encontra-se próximo a dois dias, como já havia sido indicado pelas curvas de resistência à compressão. Neste caso a curva altera seu direcionamento em quase 90 graus, coincidindo de forma apreciável com os dados obtidos dos ensaios de laboratório referentes ao módulo de elasticidade.

Concluindo-se, a escolha pela função de Bazant para representar o comportamento do módulo de elasticidade longitudinal, em geral, e em especial para o concreto jovem, apresenta um índice de confiabilidade consideravelmente elevado, ou seja, fazendo com que os valores deste módulo tomados durante a inversão das funções de fluência tenham uma grande proximidade com a realidade.

VI.2-GERAÇÃO DAS CURVAS DE RELAXAÇÃO DO CONCRETO JOVEM

A seguir serão mostradas as curvas de relaxação geradas a partir de diversas funções de fluência invertidas pelo método apresentado por Bazant no CEB I071 apresentadas em IV.1. Estas funções de fluência foram ajustadas com constantes e dados provenientes dos ensaios realizados neste estudo, bem como adaptadas das funções de resistência à compressão e do módulo de elasticidade longitudinal indicadas no item anterior. As curvas de relaxação obtidas desta forma foram então comparadas com os resultados provenientes dos concretos ensaiados no laboratório, tomando-se especialmente a sua idade jovem.

As curvas são apresentadas até idades de 7 dias para uma maior clareza de sua forma, bem como, para permitir uma boa visualização dos limites entre concreto jovem e concreto quase-endurecido, como descrito em II.1.

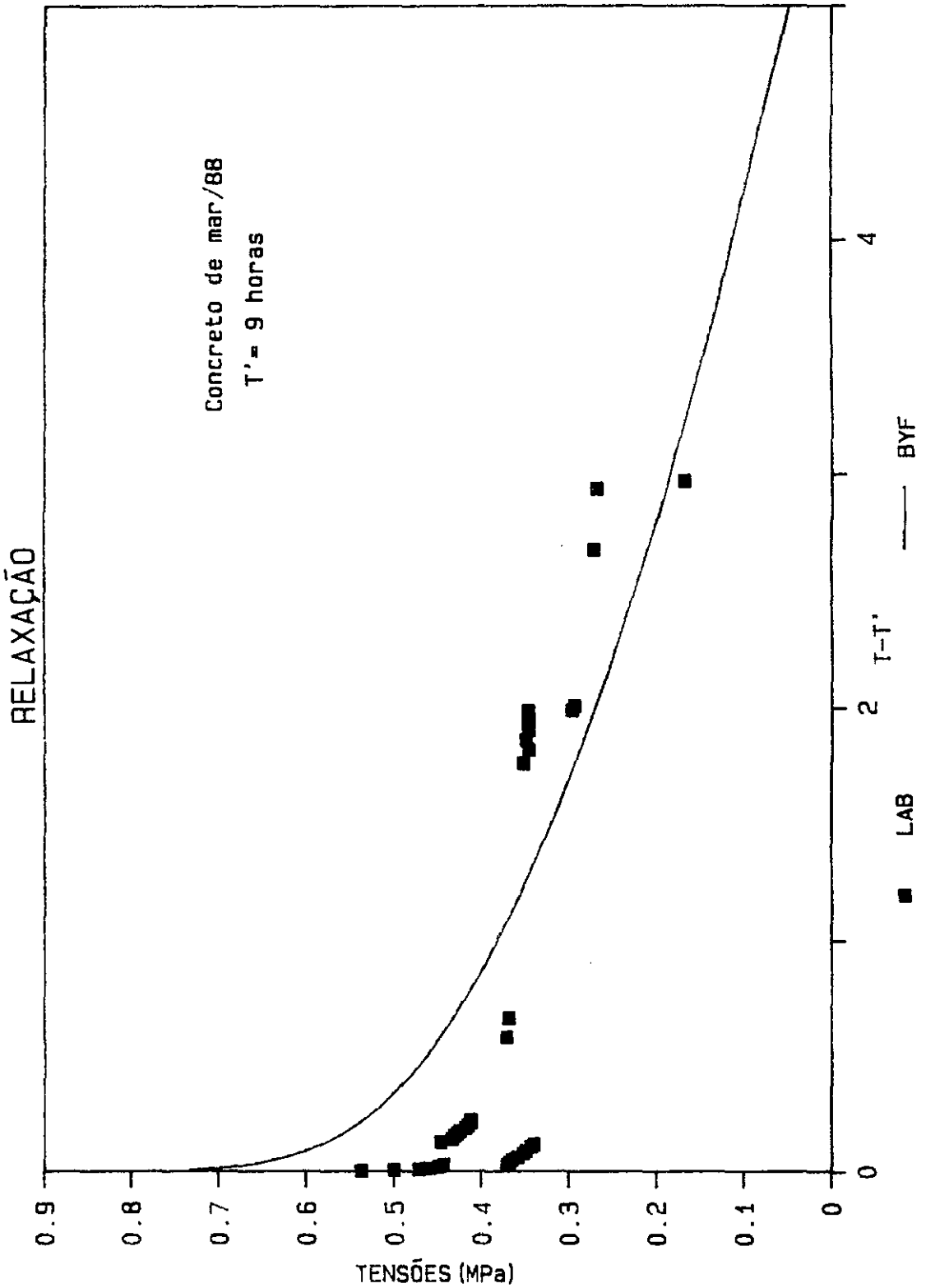


Fig.VI.4 - Curva de relaxação obtida pela inversão da função de fluência de Byfors-Pfefferle

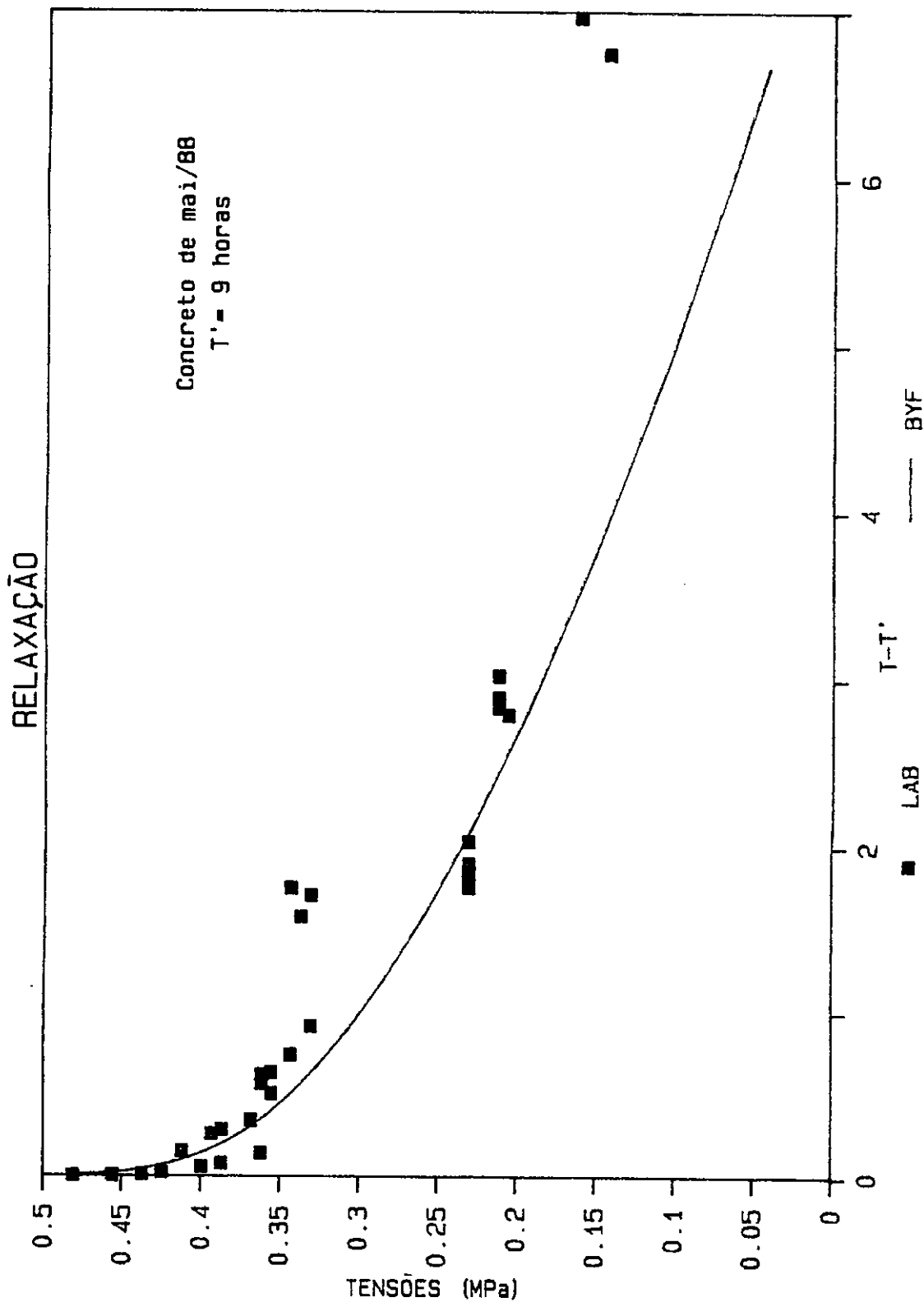


Fig.VI.5 - Curva de relaxação obtida pela inversão da função de fluência de Byfors-Pfefferle

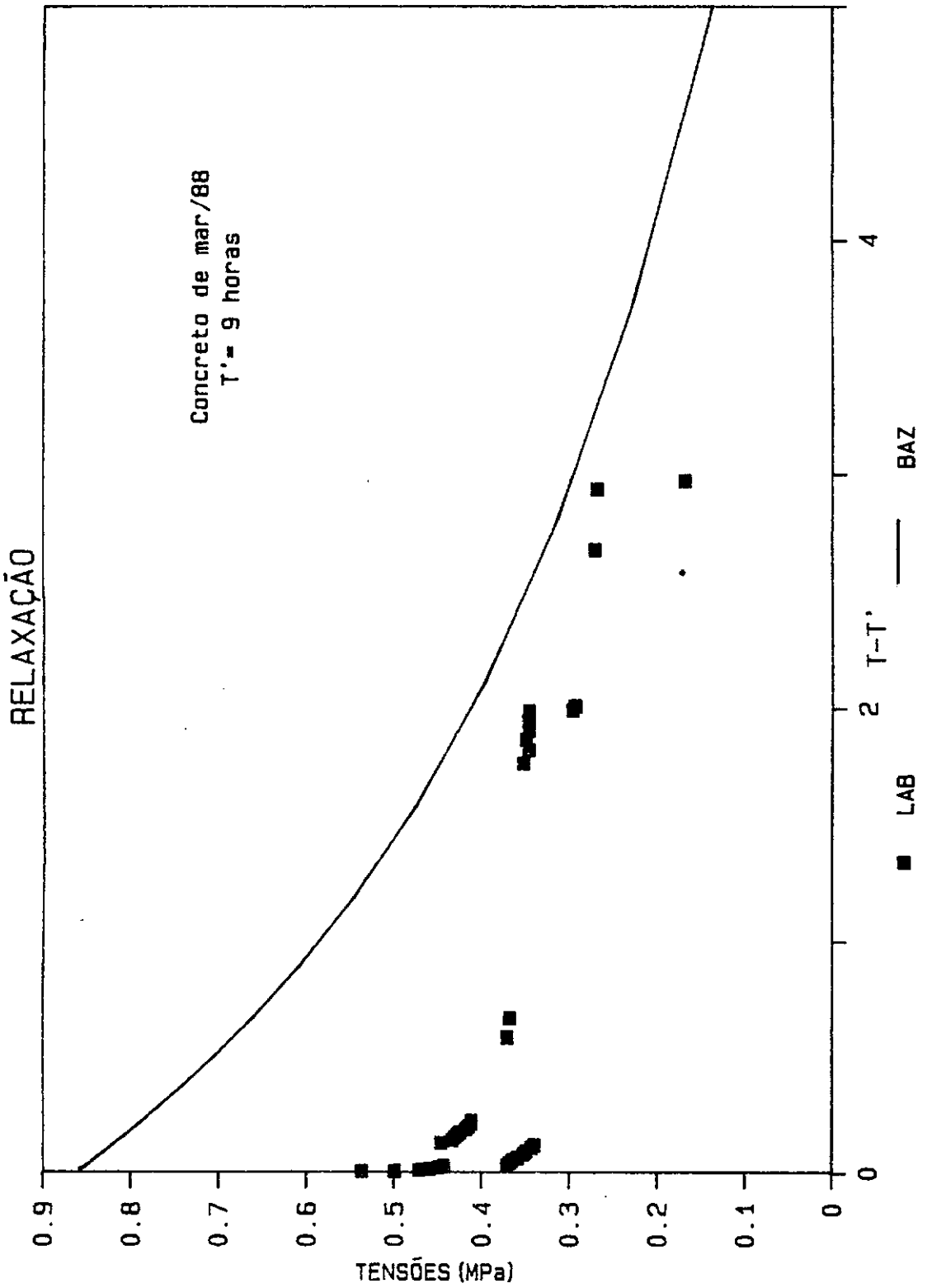


Fig.VI.6 - Curva de relaxação obtida pela inversão da função de fluência de Bazant

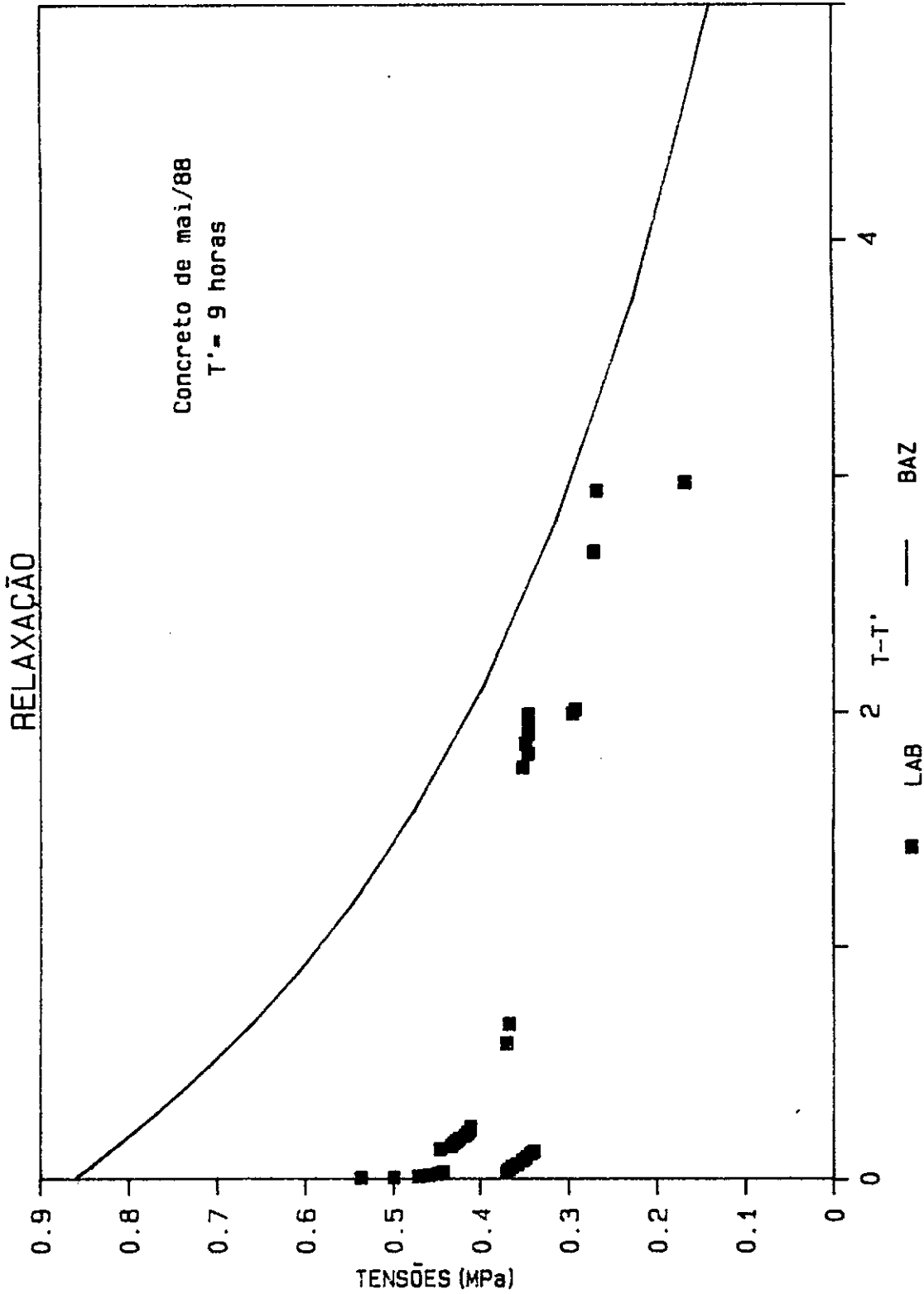


Fig.VI.7 - Curva de relaxação obtida pela inversão da função de Bazant

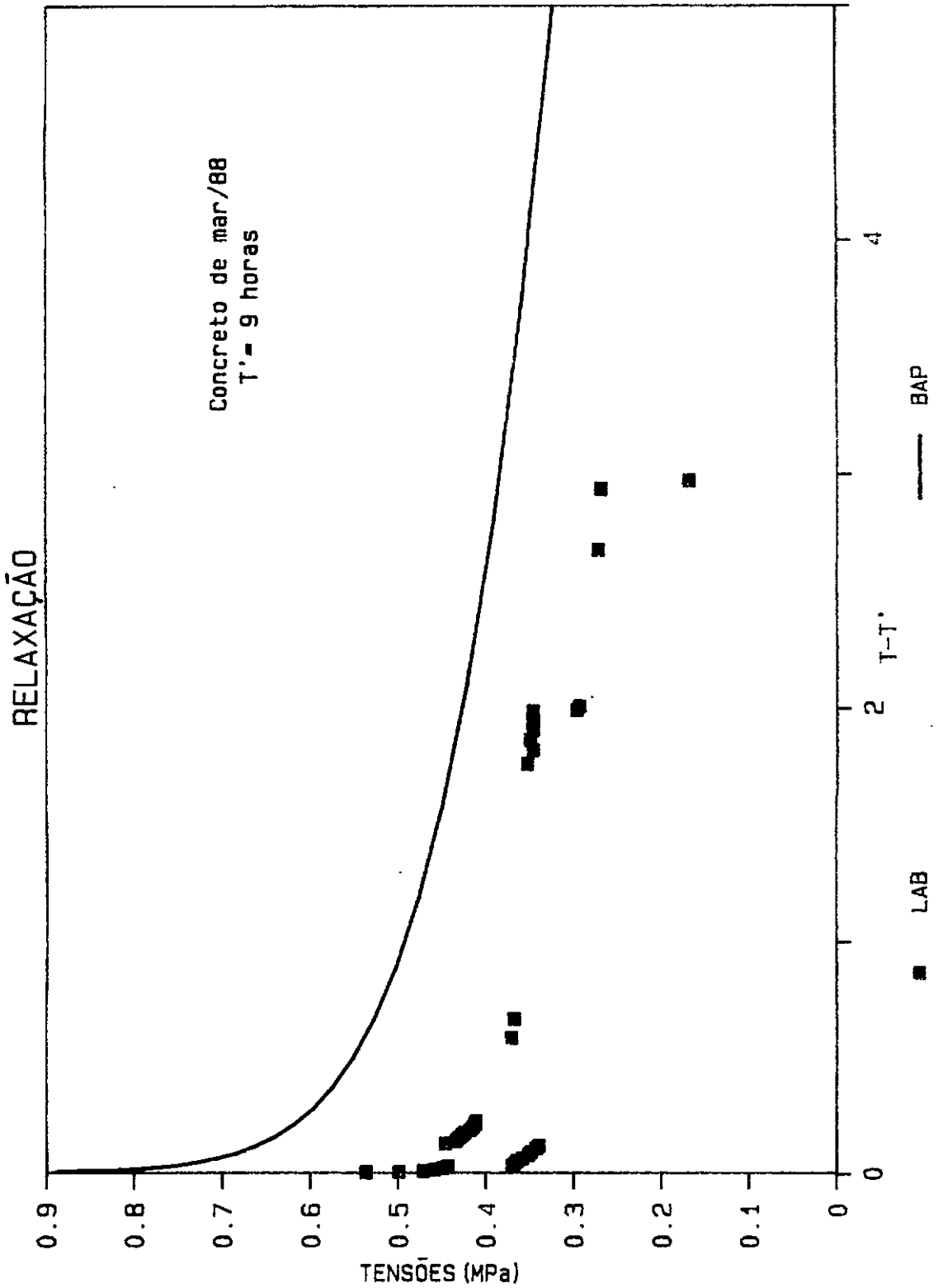


Fig.VI.8 - Curva de relaxação obtida da inversão da curva de fluência de Bazant-Panula

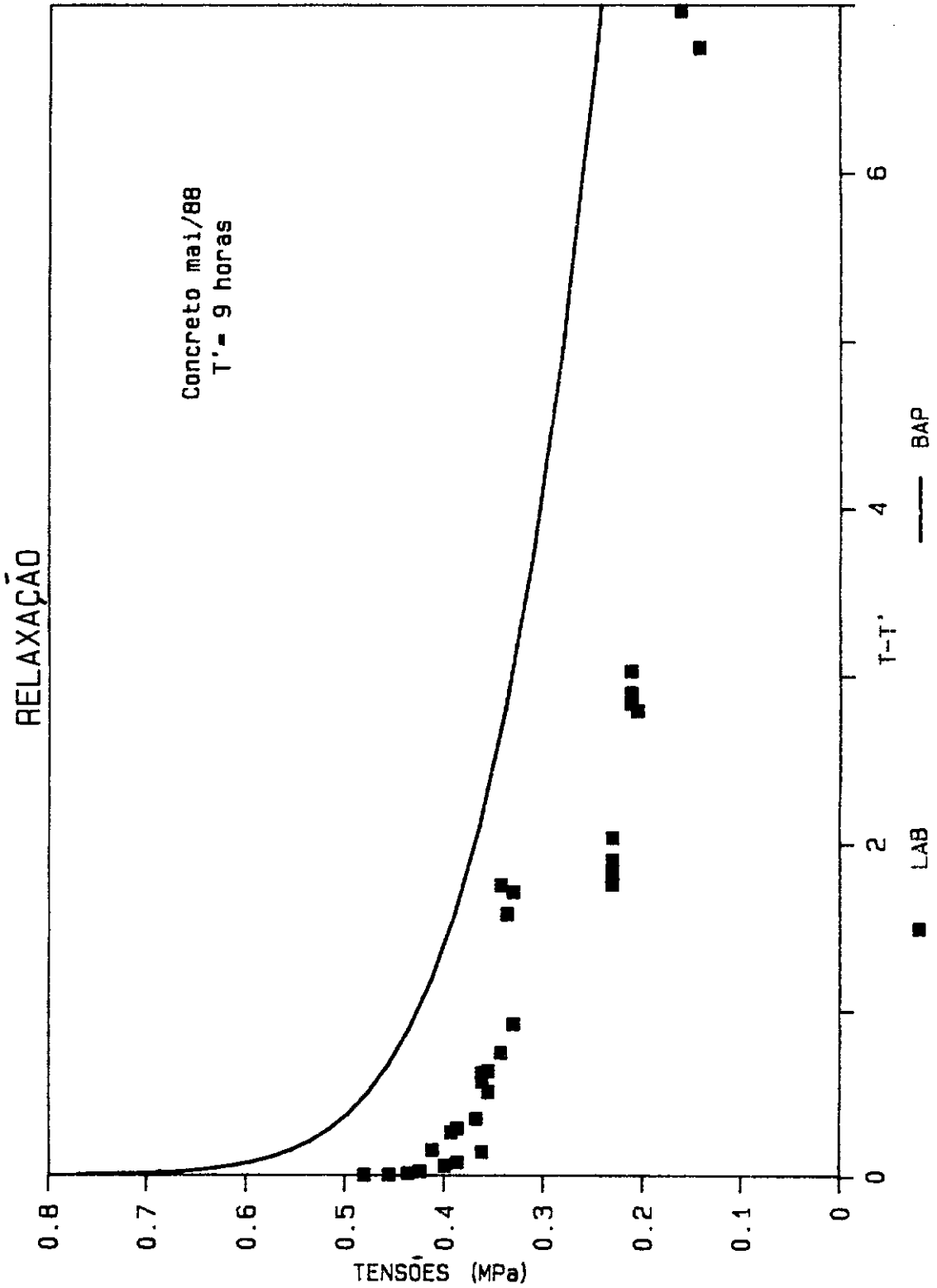


Fig.VI.9 - Curva de relaxação obtida da inversão da função de fluência de Bazant-Panula

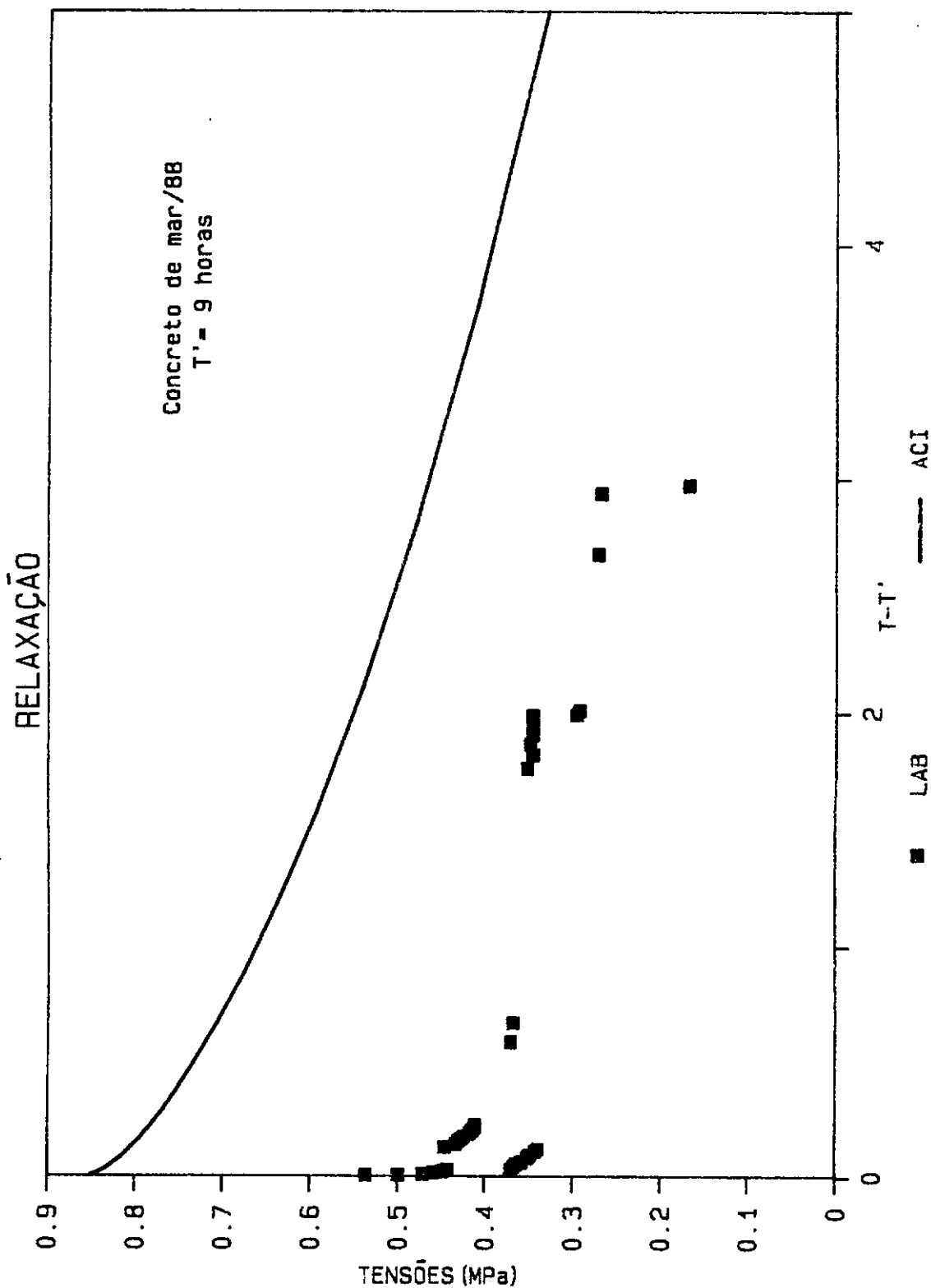


Fig.VI.10 - Função de relaxação obtida da inversão da função de fluência sugerida pelo ACI

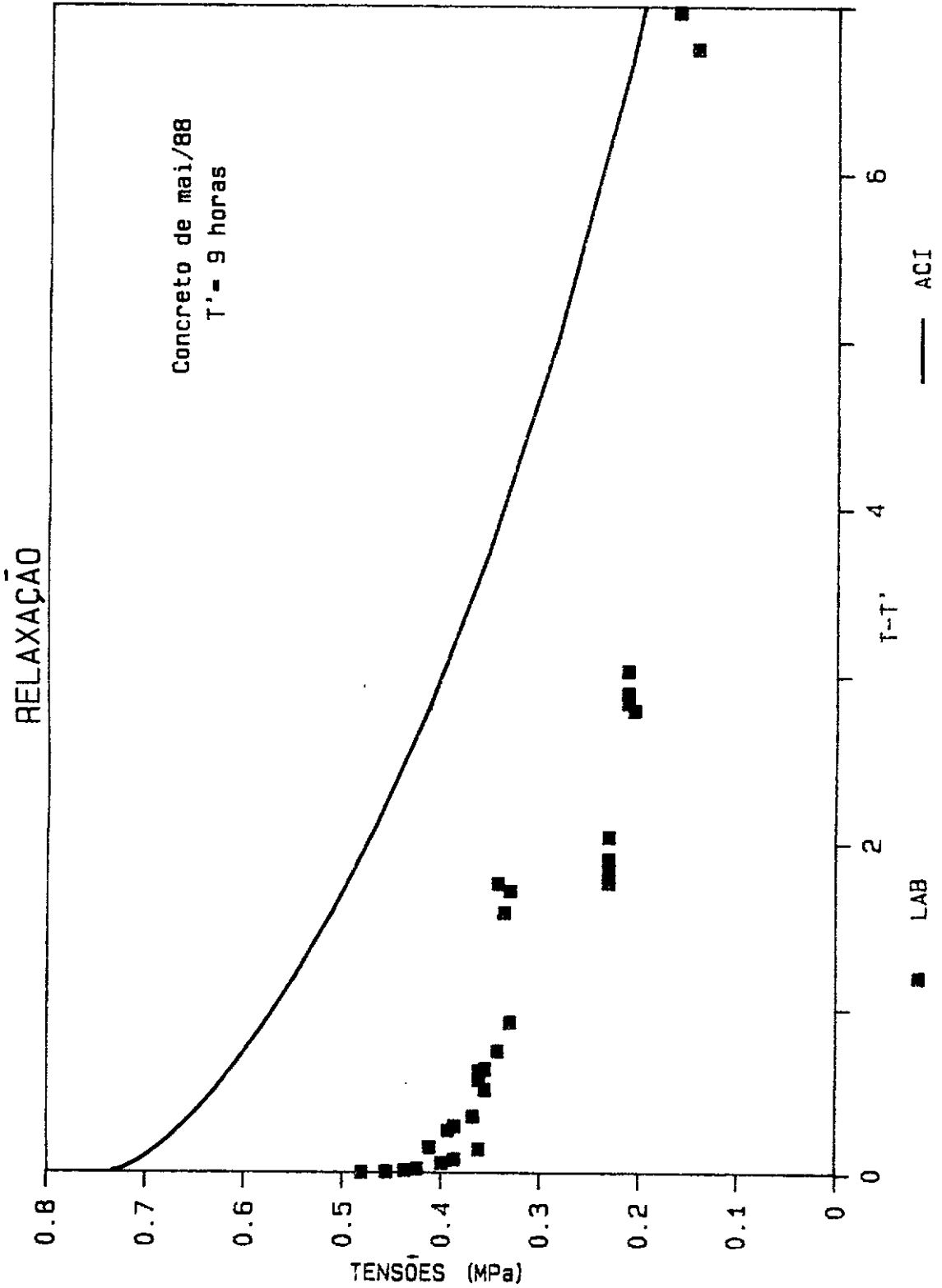


Fig.VI.11 - Curva de relaxação obtida da inversão da função de fluência sugerida pelo ACI

Anteriormente foram apresentadas 8 curvas de comparação entre 4 funções (figuras VI.4 a VI.11), Byfors-Pfefferle, Bazant, Bazant-Pnula e ACI, e os valores obtidos em laboratório para as funções de relaxação referentes aos ensaios de março de 1988 e de maio do mesmo ano.

A curva originada da função de fluência invertida de Byfors-Pfefferle, apresenta uma qualidade muito boa e consideravelmente acima das demais, ou seja, pode ser considerada como a que melhor ajustou-se ao comportamento real do concreto durante a sua fase de juventude, como pode ser analisado de uma forma mais precisa na fig.VI.5, tendo em vista que o concreto utilizado na comparação da fig. VI.4 apresentou uma curva de relaxação muito oscilante devido a problemas de temperatura já discutidos.

Esta curva, entretanto, deixa de apresentar boa qualidade quando as idades são elevadas, deixando o concreto de ser considerado jovem, a mesma torna-se inclusive negativa assintotando com valores bem abaixo de zero. Portanto, deverá ser obtida uma forma de intercâmbio entre esta função e uma outra, como por exemplo a de Bazant-Panula, que bem represente a relaxação durante as demais fases da vida do concreto.

As funções de Bazant e do ACI (figs.VI.6,7, 10 e 11) apresentam resultados consideravelmente acima daqueles de laboratório e valores no início da fase jovem, (até $T = 1,379$ dias, ou seja, $T-T' = 1$ dia) consideravelmente diferente daquela esperada, não apresentando, portanto uma capacidade de ajuste para o concreto jovem.

As figs.VI.8 e VI.9, relativas à função de fluência invertida de Bazant-Panula têm um comportamento,

que embora não seja de qualidade tão boa quanto a da função de Byfors-Pfefferle apresenta uma forma bastante próxima aos dados obtidos dos ensaios, estando entretanto, acima destes valores. Esta curva, na hipótese da não existência de outra com melhores características, muito provavelmente poderia apresentar um bom grau de adaptabilidade, à realidade através da variação de alguns de seus parâmetros, sendo que isto não chegou a ser tratado no presente trabalho pelo fato de a função de Byfors-Pfefferle ter-se ajustado tão bem e devido ao fator tempo, merecendo posteriormente mais atenção.

Esta função de Byfors-Pfefferle [04] de uma forma geral tem um comportamento de ótima qualidade para o concreto jovem, embora não mantenha esta performance após aproximadamente 5 dias de idade do concreto. Durante a fase delimitada entre 20 e 30 horas a curva apresenta um posicionamento não muito bom, entretanto, presume-se que o motivo seja o fato de este período ainda apresentar a necessidade de ajustes, correções, a intervalos de tempo consideravelmente reduzidos quando os mesmos nos ensaios passavam a ocorrer mais esparsamente (fase aproximadamente correspondente ao dia seguinte da concretagem). Pode-se observar na curva de comportamento do concreto que nesta fase mencionada a mesma apresenta uma tendência para a horizontalização e a seguir, com $T-T'$ próximo a 3 dias, ocorre uma correção considerável tornando a levar a curva para a posição da curva teórica. Assim sendo, pode-se imaginar que com uma sequência mais constante de correções esta curva de Byfors-Pfefferle apresenta o comportamento ideal para esta importante etapa na vida do concreto.

Finalmente, podemos apresentar nas figs.VI.12 e VI.13 um resumo do trabalho executado na busca das funções de boa adaptação ao concreto jovem. Nesta figura são superpostas 5 curvas aos dados do laboratório, o que enfatiza a boa qualidade da função de Byfors-Pfefferle, em detrimento de outras que foram até mesmo eliminadas de maiores análises neste trabalho, como é o caso das funções

do CEB e de Wilson, a qual, como pode ser visto apresenta um comportamento totalmente estranho aos pontos de laboratório, sendo que praticamente não apresenta o comportamento elástico característico da fase jovem. Embora não apresentada a função descrita no CEB apresenta um comportamento muito semelhante com a função de Wilson, porém estando acima dos dados do laboratório. Vale ressaltar, entretanto, ser a função de Wilson, conforme apresentada em [06] de muito boa qualidade quando não se trata de concreto jovem.

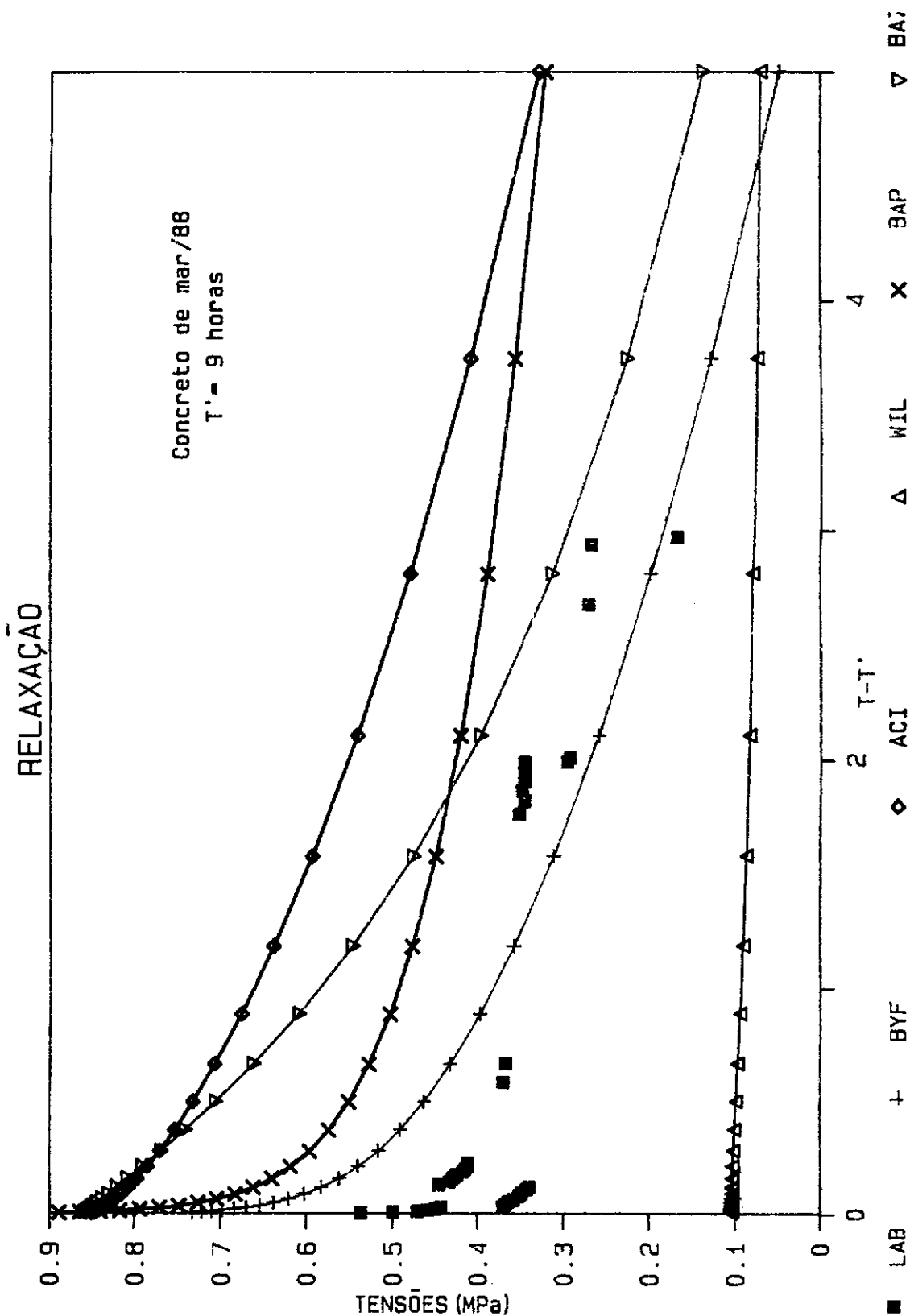


Fig.VI.12 - Análise das diversas curvas de relaxação comparadas com resultados obtidos em laboratório

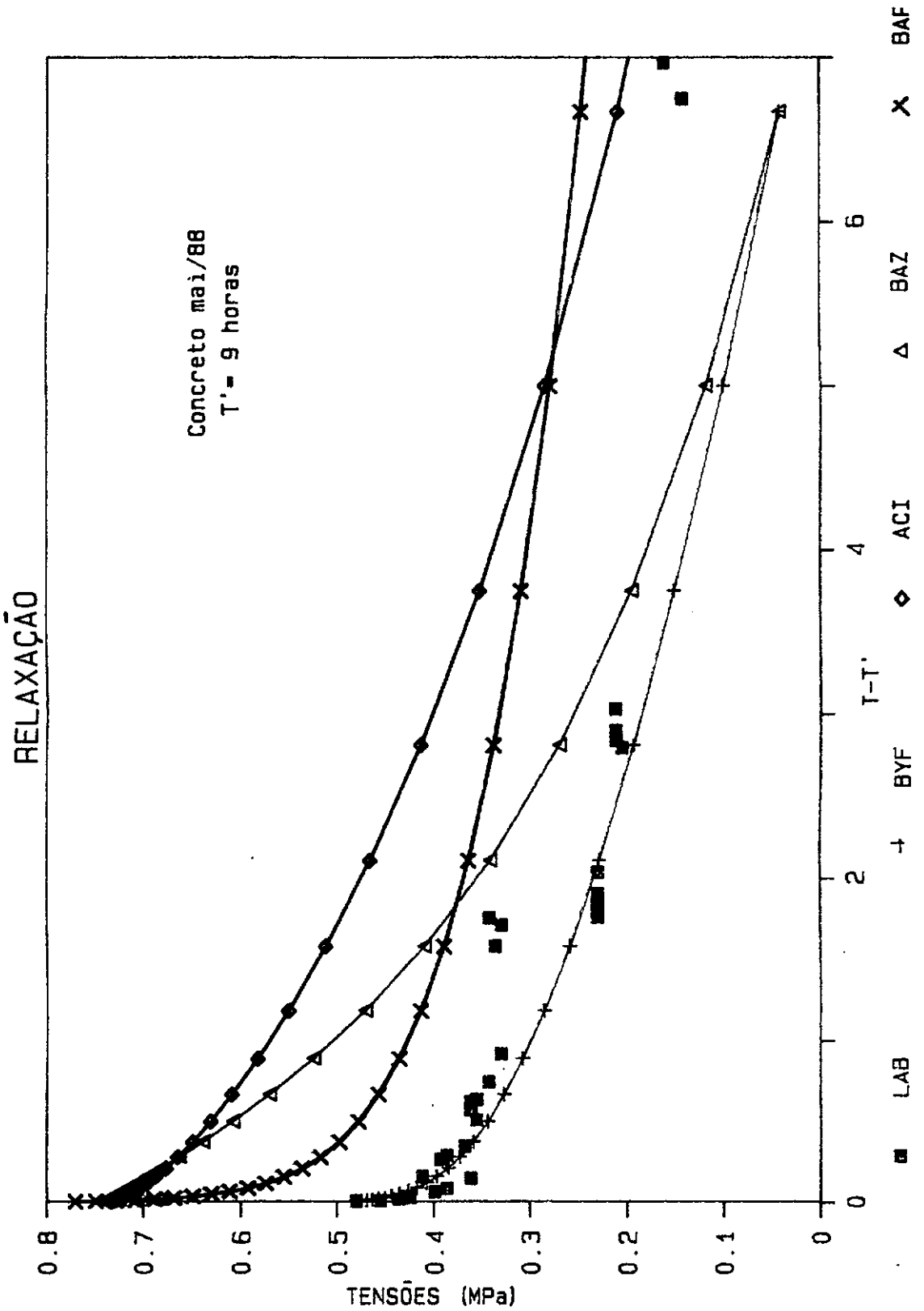


Fig.VI.13 - Análise de diversas curvas de relaxação comparadas com resultados de laboratório

CAPITULO VII

DISCUSSÕES

Algumas das funções apresentadas neste trabalho, para curvas de fluência, e para resistência à compressão, ou ainda para determinação do módulo de elasticidade do concreto, deixaram soluções que podem ser consideradas muito satisfatórias para o estudo do comportamento do concreto em sua idade jovem, conforme definido no capítulo II. Assim sendo a função apresentada por Byfors-Pfefferle para a fluência e por Byfors para a resistência à compressão, ou ainda a função de Bazant-Panula para a própria fluência e a de Bazant para o desenvolvimento do módulo de deformações podem ser consideradas como definitivamente boas para os objetivos da presente pesquisa.

De uma forma geral, a função de Byfors-Pfefferle ao ser invertida pelo método apresentado por Bazant no CEB [07] apresentou-se de tal forma afinada com o comportamento dos concretos analisados em laboratório que levou a uma especulação mais profunda quanto ao comportamento da curva gerada pelo modelo de Maxwell (já visto comportar-se de forma muito aproximada com a função de Byfors, no capítulo III), gerada a partir dos pontos discretos oriundos da função de Byfors-Pfefferle ajustada com os dados dos concretos ensaiados. Esta análise tornou a gerar curvas de qualidade excepcional, quando a geração partiu de cadeia composta por 10 elementos de Maxwell e buscou-se uma ajustagem entre o intervalo de T-T' obtido do laboratório, considerando-se que quando este intervalo não se aproxima do real, pode-se constatar, que, em geral, a qualidade da curva deixa a desejar.

Uma outra tentativa de análise que se desenvolveu, foi a respeito de se tentar gerar uma curva pelo modelo matemático da cadeia de Maxwell a partir dos dados diretos de experiências, porém os resultados não foram os esperados, pois estes dados por apresentarem oscilações de ordem bastante grande levaram a formulação matemática, ao tentar reproduzir a curva (o que ocorreu de forma muito boa), gerar valores equivalentes aos módulos de deformações dos elementos da cadeia, negativos, o que foi desconsiderado, tendo em vista a necessidade de uma melhor análise matemática devida à incoerência do significado físico dos resultados. Assim esta análise não foi levada em consideração nas conclusões, pois além de já se ter alcançado resultados muito bons com os dados empíricos, e estes bem ajustados com os dados reais, era necessário efetuar acomodações nos dados que com certeza faria com que os mesmos perdessem a sua qualidade.

Finalmente é de se levar em consideração que as curvas oriundas do modelo de Maxwell apresentaram desvios-padrão na ordem de 1% dos valores fornecidos, o que pode ser considerado muito bom.

Ainda neste capítulo deve-se fazer uma última análise (relativa a este trabalho) do comportamento dos métodos de ensaios utilizados, tendo em vista que, embora tenham apresentado um nível de resultados que pode ser considerado acima de suspeitas poderia ter sido escolhido com outras opções. Chama-se a atenção neste ponto, por exemplo, para as medições de deformações, que após diversos estudos foram lidas basicamente por extensômetros do tipo Carlson. Observe-se que as leituras desenvolvidas com os extensômetros elétricos de resistência, tipo Kyowa, que a princípio tiveram seu uso rejeitado apresentaram também uma qualidade de resultados muito boa, tendo em vista que as variações de temperatura que ocorreram nos corpos de prova ensaiados, além de não serem consideravelmente grandes, tiveram seus valores minorados pelo efeito do ar

condicionado. Em outra oportunidade seria interessante desenvolver uma análise em que a cura do concreto tivesse prosseguimento sem os efeitos de resfriamento do ambiente para que de uma forma mais precisa se pudesse verificar este lado da análise.

Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade nas primeiras idades, até 2 dias aproximadamente, também merecem uma maior atenção, pois embora o método utilizado tenha sido muito bom, constatou-se uma forte dificuldade de estabilização na leitura das deformações ao se proceder as oscilações de cargas previstas no método da RILEM. Estas variações certamente geradas pelos elevadíssimos coeficientes de fluência introduzem erros na determinação destes valores de tão grande importância nas análises, que seria ideal serem, se não eliminados, ao menos minimizados.

Merece ainda uma discussão considerável, a própria determinação da resistência à compressão, quanto à velocidade de aplicação da carga. Nos presentes ensaios, esta foi adotada, conforme citado anteriormente, nos padrões normais de carregamento para os concretos com idades avançadas. Entretanto, para concretos com apenas algumas horas de existência, quando ao receber o carregamento, o mesmo apresenta imediatamente uma fluência de valores excessivamente elevados, aparecendo com boas perspectivas uma aplicação de carregamento mais acelerada, reduzindo assim a ocorrência destas deformações de fluência que com certeza influenciam nos resultados alcançados.

Desta forma, embora se tenha chegado a resultados até mesmo melhores que os esperados, os tópicos acima levantados, ao serem observados após a realização dos ensaios finais, devem ser considerados numa posterior análise, a fim de que se possa obter resultados cada vez de melhor qualidade.

CAPITULO VIII

CONCLUSÕES

A análise teórico-experimental do concreto jovem é um trabalho que buscou durante todo o seu desenvolvimento, proceder a comparação de resultados já obtidos, ou de resultados novos, obtidos durante o desenrolar das pesquisas, com elementos mencionados na teoria tradicional do concreto ou na literatura referente ao concreto enquanto jovem. Os resultados obtidos, de uma forma geral, permitiram um caminhar considerável no conhecimento deste material, que embora seja exaustivamente pesquisado em idades avançadas, pode ser considerado como recém -descoberto se nos referirmos ao período em que começa a adquirir suas características tão visadas posteriormente.

Na parte teórica buscou-se reescrever velhos conceitos e métodos ajustando-se parâmetros e condições para a nova situação observada. O resultado disto, em linhas gerais foi a constatação de que, salvo raras exceções, como é o caso da forte influência do traço do concreto na fluência, ou de sua retração a poucas horas de idade, o concreto jovem, como era de se esperar apresenta as mesmas leis e propriedades do concreto nas idades adultas, além é claro, de uma das diferenças mais importantes, que é a velocidade de desenvolvimento destas propriedades, que normalmente tendem a assintotar nas idades mais velhas e que crescem com velocidade exponencial em muitos casos para o concreto jovem.

A análise numérica, com a apresentação da função de Byfors-Pfefferle, para a fluência e consequentemente para a relaxação, de tão elevada qualidade

pode considerar como tendo seus objetivos alcançados, uma vez que se consegue reproduzir matematicamente com precisão bastante boa as curvas obtidas dos ensaios em laboratório para os concretos ensaiados.

A mesma conclusão atingida no presente trabalho sobre a função de Byfors-Pfefferle, foi aquela a qual chegou MATS EMBORG para a pesquisa referenciada em [06], reforçando as conclusões sobre a boa qualidade desta função.

Quanto às funções de resistência à compressão e as de evolução do módulo de elasticidade em relação ao tempo, os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que as melhores funções seriam aquelas propostas por Byfors e por Bazant respectivamente (veja capítulo VI). As análises efetuadas mostraram também que as funções de fluência que foram consideradas como sendo as que melhor se ajustaram aos dados de laboratório foram perfeitamente aproximadas por uma série de Dirichlet.

O presente trabalho, embora deixando em aberto alguns pontos consideráveis de discussão, (veja capítulo VII), apresenta uma quantidade de conclusões, de boa qualidade, as quais permitem um desenvolvimento considerável dos conceitos e objetivos a respeito do tema concreto jovem, como foi o caso das acima mencionadas e também das demais, não mencionadas porém automaticamente decorrentes desta pesquisa.

A influência de fortes variações de temperaturas, como ocorre no interior de uma parede de barragem ao ser concretada; o acompanhamento dos efeitos gerados pelo carregamento precoce do concreto, que já se sabe provocar alterações no comportamento da resistência à compressão final do concreto, não existindo portanto um método que permita uma avaliação quantitativa deste fenômeno; a própria interligação entre a função de Byfors para o concreto jovem e outra para o concreto nas idades

posteriores; a análise do modelo matemático de Maxwell ao reproduzir o concreto jovem; ou ainda, o desenvolvimento de métodos de ensaio que permitam a obtenção de resultados mais exatos, são uma pequena lista de sugestões e indicações de trabalhos que merecem ter um desenvolvimento, tendo em vista a importância do conhecimento do concreto nestas suas primeiras idades, até mesmo para que se possa tomar cuidados necessários para não se prejudicar o desenvolvimento do concreto, ou ainda, para que se possa tomar cuidados necessários para melhorar o seu desenvolvimento para uma melhor utilização nas idades futuras, além de se poder melhor dimensionar peças onde o concreto enquanto jovem estará sujeito a esforços.

CAPITULO IXREFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [001] NEVILLE, A.M., DILGER, W.H., BROOKS, J.J., Creep of Plain and Structural Concrete, Essex, Longman Group Limited, 1^a edição, 1983.
- [002] CREUS, G.J., Viscoelasticity - Basic Theory and Applications to Concrete Structures, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 1^a edição, 1986 .
- [003] BAZANT, Z.P., Creep and Shrinkage of Concrete: Mathematical Modeling, Illinois, Northwestern University, preprints of the fourth RILEM International Symposium, 1986.
- [004] BYFORS, J., Plain Concrete at early ages, Reserch, Stockholm, Swedish Cement and Concrete Reserch Institute, 1^a edição, 1980.
- [005] CASTRO, N., Função de fluência do concreto obtida por ensaio direto de relaxação, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, PEC-COPPE/UFRJ, 1982.
- [006] EMBORG, M., Temperature Stresses in Massive Concrete Structures - Viscoelastic Model and Laboratory Tests, Licenciante thesis, Lulea, Lulea University of Technology, 2 1985.
- [007] CEB, Manual on Structural effects of time-dependent behavior of concrete, Comité Européen du Béton (CEB), 1^a edição, 1984.
- [008] FAIRBAIRN, E.M.R., ROITMAN, N., COC-773-Análise experimental de estruturas, disciplina oferecida na COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1986.
- [009] CARNEIRO, F.L.L.B., FAIRBAIRN, E.M.R., COC-770 - Concreto, disciplina oferecida pela COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1986.
- [10] ILLSTON, J.M., JORDAAN, I.J., "Three Dimensional creep

measurements in young concrete", Materiaux et Constructions, vol.4, n°24, pp 371-377, Paris, Dunod Editeur, 1971.

- [11] BAZANT, Z.P., "Input of creep and shrinkage characteristics for a structural analysis program", Materiaux et Constructions, vol.15, n°88, pp 283-290, Paris, 1982.
- [12] BLANKS, R.F., MEISSNER, H.S., RAWHOUSER, C., "Cracking in Mass Concrete", American Concrete Institute, Proceedings, vol.34, USA., 1938.
- [13] DAVIS, R.E., "Plastic flow and volume changes of concrete", ASTM, vol.37, 1937.
- [14] CARNEIRO, F.L.L.B., FERRANTE, A.J., SPHAIER, S.H., BREBBIA, C.A., Offshore Structures, vol.1, Londres, Pentech press, 1979.
- [15] ZAITSEV, Y.V., SCERBAKOV, E.N., "Prediction of the fracture process in concrete under long-term load at an early ages", RILEM - International Conference on concrete of early ages, vol.1, pp. 17-20, Paris, Anciens ENPC Editions, 1982.
- [16] CHATTERJI, S., "Probable mechanisms of crack formation at early ages of concrete", RILEM, pp.35-38, 1982.
- [17] KASAI, Y., MATSUI, I., YOKOYAMA, K., "Shrinkage and cracking of concrete at early ages", RILEM, pp. 45-50, 1982.
- [18] TSILOSANI, Z.N., DALAKISHVILI, G.L., KAKICHASVILI, S.D., "Shrinkage of concrete at early ages of hardening", RILEM, pp.71-76, 1982.
- [19] WATANABE, N., YAMADA, K., "Relation between the thermal crack and the dimension of mass concrete made of regulated set cement", RILEM, pp.77-82, 1982.
- [20] ZIEGELDORF, S., MULLER, H.S., PLOHN, J., HILDORF, H.K., "Autogenous shrinkage and crack formation in young concrete", RILEM, pp.83-90, 1982.
- [21] KASAI, Y., "Compressive strength of concrete stripped at very early ages", RILEM, pp.91-96, 1982.

- [22] LYDON, F.D., AL-MO'MEN, M.H., UWIST, C., "The effects of hydration on some early and later age properties of concrete", RILEM, pp.97-102, 1982.
- [23] BYFORS, J., "Pulse velocity measurements for indication of the compressive strength at early ages", RILEM, pp.117-122, 1982.
- [24] CARINO, N.J., "Maturity functions for concrete", RILEM, pp.123-128, 1982.
- [25] KASAI, Y., "Method of estimation for compressive strength of concrete at early ages", RILEM, pp.157-162, 1982.
- [26] KNUDSEN, T., GEIKER, M., "Chemical shrinkage as an indicator of the stage of hardening", RILEM, pp.163-166, 1982.
- [27] MULLICK, A.K., MAITI, S.C., WASON, R.C., "Measurement of hardening of concrete at early ages and influence of cement characteristics", RILEM, pp.167-172, 1982.
- [28] BYFORS, J., "The age-dependence of concrete creep at early ages", RILEM, pp.187-192, 1982.
- [29] HARRISON, T.A., "A simple approach to the prediction of early age thermal cracking", RILEM, pp.239-242, 1982.
- [30] SAMUELSSON, P., "Necessary early strength of in situ cast concrete", RILEM, pp.255-260, 1982.
- [31] SORIANO, H.L., "Análise de estruturas reticuladas em computadores de pequeno porte", Apostila da Escola de Engenharia da UFRJ, Rio de Janeiro, 1983 .
- [32] BAZANT, Z.P., "Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus Method", ACI journal, pp.212-217, 1972.
- [33] BAZANT, Z.P., "Numerical determination of long-range stress history from strain history in concrete", Materiaux et Construction, vol.5, n027, Paris, 1972.
- [34] FAIRBAIRN, E.M.R., LONGO, H.I., ZHENG, R., "Formulação diferencial do problema de relaxação do concreto-

Estudo teórico-experimental", PEC-COPPE/UFRJ,
pesquisa, Rio de Janeiro, 1987.

- [35] LONGO, H.I., "Estudo experimental da relaxação do concreto ", Seminário de Doutorado, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.
- [36] FAIRBAIRN, E.M.R., GUEDES, O.M., LONGO, H.I. "Sobre as formulações Integral e Diferencial da Viscoelasticidade Linear com envelhecimento: Aplicações ao concreto massa", a ser publicado. PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.

ANEXO 1GERAÇÃO DA FUNÇÃO DE RELAXAÇÃO A PARTIR DA DE FLUÊNCIA

A seguir será feita a apresentação da listagem do programa apresentado no CEB [07] por Bazant, que procede à inversão de uma função de fluência qualquer dada, utilizando uma análise pelo método dos trapézios (ver FIG.II.6).

Este processo apresentado por Bazant é baseado em somatórios que se utilizam de valores oriundos de uma família de funções de fluência, ou seja, quando o programa determina o valor da função de relaxação em um ponto t_1 ele se utiliza de valores desde a curva de fluência do tempo t de aplicação da primeira carga considerada até o momento t_1 requerido, portanto, para se inverter uma função de fluência por este método, na realidade é necessário o conhecimento de toda a família de fluência do concreto desde o momento de aplicação da primeira carga até onde se deseja conhecer o valor da curva de relaxação.

A seguir são apresentadas as variáveis do programa:

T - idade considerada em dias.

DDEF - deformacao em micro-strains.

DSTR - tensao no corpo de prova em mega-pascal.

AGE1 - equivalente a t_0 , idade de aplicação da carga, em dias.

NINT - numero de iterações da integral de Simpson.

```

PROGRAM CEB78
DIMENSION DSTR(83),DDEF(83),T(83)
REAL M,T1
DATA T/0.,0.,1,80*0./,
$   DDEF/0.,1,81*0./,
$   DSTR/83*0./,
$   AGE1/0.375/,
$   NINT/50/,
$   M/8./

```

```

C -----
C ESTA VERSAO UTILIZA EXECUTA A INVERSAO
C DA FUNCAO DE FLUENCIA APRESENTADA
C PARA OS DADOS ACIMA FORNECIDOS
C -----

```

```

OPEN(6,FILE='CEB.PRN',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED',
$   ACCESS='SEQUENTIAL')
Q=10.**(1./M)
DO 1 K=4,NINT
    T(K)=T(K-1)*Q
1 CONTINUE
K=2
DSTR(2)=DDEF(2)/FI(AGE1+T(2),AGE1+T(1))
STRAIN=(FI(AGE1+T(2),AGE1+T(1)))*1.E+06
STRESS=DSTR(2)
STR=STRESS*1.E-06
WRITE(6,4)T(K),STR
DO 2 K=3,NINT
    TIME=AGE1+T(K)
    K1=K-1
    Z=0.
    TK1=AGE1+T(K1)
    DO 3 I=2,K1
        TI=AGE1+T(I)
        TII=AGE1+T(I-1)
        Z=Z+.5*DSTR(I)*(FI(TIME,TI)+FI(TIME,TII)-
$   FI(TK1,TI)-FI(TK1,TII))
3 CONTINUE
DSTR(K)=2.*(DDEF(K)-Z)/(FI(TIME,TIME)+FI(TIME,TK1))
STRESS=STRESS+DSTR(K)
STRAIN=FI(AGE1+T(K),AGE1)*1.E+06
STR=STRESS*1.E-06
WRITE(6,4)T(K),STR
2 CONTINUE
4 FORMAT(5X,F12.8,E20.13)
END

```

ANEXO 2FORMULAÇÃO INTEGRAL - FORMULAÇÃO DIFERENCIAL

A seguir será apresentada uma demonstração da equivalência entre as duas formulações baseada em [36] e conforme mencionado IV deste trabalho.

Esta demonstração é baseada nas duas seguintes hipóteses:

1 - a tensão $\sigma(t)$ não ultrapassa o valor de 0.3 ou 0.4 da resistência à ruptura do concreto no momento da análise.

2 - é válido o princípio da superposição.

Considera-se dada uma história de deformações variável com o tempo, sempre crescente, e considera-se nas formulações a seguir ε como sendo $\varepsilon - \varepsilon_0$ por simplificação.

A resposta $\sigma(t)$ será dada pela superposição das respostas devidas a $\varepsilon_0(t')$ e aos diversos $\Delta\varepsilon(t')$, que quando tendem para $\Delta\varepsilon(t') \rightarrow d\varepsilon(t')$ pode ser apresentado sob a forma:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0(t') R(t, t') + \int_{t_0}^t R(t, t') d\varepsilon(t') \quad (\text{Eq.A2.1})$$

Utilizaremos agora a decomposição da função $R(t, t')$ em série de Dirichlet, ou seja, em uma série do tipo: $\sum A(t)B(t')$ onde A e B são exponenciais de termos reais:

$$R(t, t') = \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') e^{-\left[\frac{t-t'}{\mu} \right]} \quad (\text{Eq.A2.2})$$

Fazendo a eq.A2.2 em A2.1 e chamando:

$$\sigma_{\mu}(t) = \varepsilon(t'_0) \left(E_{\mu}(t'_0) e^{-\left(\frac{t-t'_0}{\tau_{\mu}}\right)} + \int_{t'_0}^t E_{\mu}(t') e^{-\left(\frac{t-t'}{\tau_{\mu}}\right)} d\varepsilon(t') \right) \quad (\text{Eq. A2.3})$$

teremos:

$$\sigma(t) = \sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu}(t) \quad (\text{Eq.A2.4})$$

donde temos então a tensão $\sigma(t)$ dividida em uma série de parcelas $\sigma_{\mu}(t)$, sendo cada $\sigma_{\mu}(t)$ satisfazendo a equação anterior.

Podemos ainda colocar a equação anterior na forma:

$$\sigma_{\mu}(t) = \sigma_{\mu}(t'_0) e^{-\left(\frac{t-t'_0}{\tau_{\mu}}\right)} + \int_{t'_0}^t E_{\mu}(t') e^{-\left(\frac{t-t'}{\tau_{\mu}}\right)} \frac{d\varepsilon(t')}{dt'} dt' \quad (\text{Eq. A2.5})$$

$$\text{onde } \tau(t'_0) = \varepsilon(t'_0) E(t'_0) \quad \text{e} \quad d\varepsilon(t') = \frac{d\varepsilon(t')}{dt'} dt'$$

onde foi aplicada a regra da cadeia, partindo-se da premissa que $d\varepsilon(t')$ é continua em t' no intervalo $[t'_0, t]$.

Se fazemos a derivada da equação A2.5 em relação a t aplicando a regra de Leibnitz vem:

$$\frac{d\sigma_{\mu}(t)}{dt} = \frac{-1}{\tau_{\mu}} \left[\sigma(t'_0) e^{-\left(\frac{t-t'_0}{\tau_{\mu}}\right)} + \int_{t'_0}^t E_{\mu}(t') e^{-\left(\frac{t-t'}{\tau_{\mu}}\right)} \frac{d\varepsilon(t')}{dt'} dt' \right] + E_{\mu}(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{Eq.A2.6})$$

Relembrando que o termo entre colchetes é igual a $\sigma_{\mu}(t)$ e levando A2.5 em A2.6, teremos:

$$\frac{d\sigma_{\mu}(t)}{dt} = \frac{-1}{\tau_{\mu}} \sigma_{\mu}(t) + E_{\mu}(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{Eq.A2.7})$$

Esta equação diferencial, obtida da derivação da equação A2.5, é a equação diferencial de um elemento μ de uma cadeia de Maxwell com $E_{\mu}(t)$ e $\eta_{\mu}(t)$ variáveis no tempo, desde que seja imposto:

$$\tau_{\mu} = \frac{\eta_{\mu}(t)}{E_{\mu}(t)} = \text{constante, ou seja:}$$

$$\dot{\sigma}_{\mu}(t) + \frac{E_{\mu}(t)}{\eta_{\mu}(t)} \sigma_{\mu}(t) = E_{\mu}(t) \dot{\varepsilon}(t) \quad (\text{Eq.A2.8})$$

onde $\dot{\sigma}$ e $\dot{\varepsilon}$ são as derivadas em relação ao tempo.

Finalmente, equivale dizer que a solução da equação diferencial (A2.8) para uma condição de contorno $\sigma = \sigma_0(t'_0)$ em t'_0 é a equação integral A2.5, vista acima.

Considerando-se ainda, uma cadeia de Maxwell, com n elementos e que em cada elemento tem-se:

- Equação de equilíbrio:

$$\sigma_E(t) \text{ (mola)} = \sigma_{\eta}(t) \text{ (amortecedor)} = \sigma_{\mu}(t) \text{ (aplicada)}$$

- Equação de compatibilidade:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_E(t) + \varepsilon_{\eta}(t)$$

- Equação constitutiva da mola:

$$\dot{\sigma}_E(t) = E_{\mu}(t) \cdot \dot{\varepsilon}_E(t)$$

- Equação constitutiva do amortecedor:

$$\sigma_{\eta}(t) = \eta_{\mu}(t) \cdot \dot{\varepsilon}_{\eta}(t)$$

Derivando-se a equação de compatibilidade e substituindo-se nela as equações constitutivas e de equilíbrio, chega-se a equação A2.8 novamente.

Estas considerações matemáticas induzem a crer que as tensões σ_{μ} definem "estados" da microestrutura do concreto, "estados" estes que terão sua definição melhor aproximada quando conseguirmos estimar os termos σ_{μ} e E_{μ} da série de Dirichlet a partir dos pontos discretos $R(t,t')$ dados por ensaios de relaxação em tempos t' , ou a partir da resolução (numérica) da equação integral de Volterra quando conhecida a família de funções $J(t,t')$ obtido por ensaios de fluência.

Diversos artigos de Bazant e outros autores (ver por exemplo [031]) provam ser possível fazer o ajuste da função de relaxação para diversos tempos t' com muito boa aproximação através de séries de Dirichlet, podendo assim ser obtido um espectro de relaxação para o funcional $R(t,t')$, espectro este que caracteriza as variáveis de estado σ_{μ} (dependentes de E_{μ}) para diversos tempos t' e τ_{μ} .

ANEXO 3TABELAS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A seguir serão apresentados os resultados das leituras e cálculos de correções gerados no laboratório durante a execução dos ensaios, com as conseqüentes observações oriundas das ocorrências nas suas idades, afim de que seja possível uma complementação das análises geradas a partir dos gráficos apresentados diretamente no texto.

ano	mes	dia	hora	min	P(muSt)	Car-Res	Car-%	EER1	EER2	EER4	EER5
88	3	8	8	30		75.81					
88	3	8	10	50		76.38					
88	3	8	11	15		76.37					
88	3	8	12	20		76.41					
88	3	8	12	50		76.46					
88	3	8	14	40		76.97					
88	3	8	15	5		76.99					
88	3	8	15	15		77.02					
88	3	8	16	5		76.92					
88	3	8	16	20		76.89					
88	3	8	16	45		76.79					
88	3	8	16	50		76.82	99.63	336	1971		
88	3	8	17	15		76.77	99.73	352	1936	-989	-1659
88	3	8	19	0		76.55	99.73	334	2337	-687	
88	3	8	19	30		76.41	99.76	334	2366	-717	-1690
88	3	8	19	50	2570	76.25	99.77	326	2370	-997	-1685
88	3	8	20	0	4010	76.17		159	2226	-994	-1684
88	3	8	20	2	3960	76.15		160	2218	-995	-1686
88	3	8	20	5	3940	76.13		154	2222	-995	-1688
88	3	8	20	7	3930	76.1		156	2215	-995	-1690
88	3	8	20	15	3900	76.04		149	2218	-996	-1691
88	3	8	20	30	3880	75.9	99.61	150	2215	-1001	-1694
88	3	8	20	55	3850	75.73	99.57	142	2209	-1001	-1700
88	3	8	21	15	3830	75.59	99.58	139	2207	-1000	-1707
88	3	8	21	30	3820	75.49	99.59	136	2204	-1007	-1710
88	3	8	21	45	3810	75.42	99.59	133	2204	-1008	-1713
88	3	8	22	0	3800	75.34	99.6	132	2207	-1008	-1711
88	3	8	22	15	3790	75.28	99.58	131	2205	-1009	-1712
88	3	8	22	30	3790	75.24	99.58	129	2203	-1011	-1717
88	3	8	22	45	3780	75.18	99.59	128	2201	-1012	-1721
88	3	8	23	0	3770	75.13	99.59	127	2200	-1012	-1721
88	3	8	23	15	3770	75.09	99.59	125	2201	-1012	-1721
88	3	8	23	30	3760	75.06	99.59	123	2200	-1014	-1727
88	3	8	23	45	3760	75.01	99.61	122	2200	-1014	-1731
88	3	9	0	0	3750	74.98	99.61	122	2199	-1008	-1727
88	3	9	0	15	3750	74.95	99.61	121	2199	-1009	-1727
88	3	9	0	30	3750	74.94	99.59	120	2199	-1009	-1728
88	3	9	0	45	3740	74.92	99.6	119	2198	-1010	-1729
88	3	9	1	0	3740	74.89	99.61	118	2197	-1011	-1729
88	3	9	1	15	3730	74.88	99.6	116	2197	-1012	-1731
88	3	9	1	30	3730	74.82	99.63	120	2196	-1012	-1732
88	3	9	1	45	3730	74.84	99.62	118	2196	-1014	-1733
88	3	9	2	0	3725	74.82	99.62	116	2196	-1014	-1733
88	3	9	2	15	3720	74.82	99.6	118	2196	-1014	-1733
88	3	9	2	30	3720	74.8	99.62	116	2195	-1014	-1734
88	3	9	2	45	3720	74.77	99.67	114	2194	-1013	-1734
88	3	9	3	0	3710	74.77	99.64	114	2194	-1013	-1735
88	3	9	3	15	3710	74.76	99.66	113	2193	-1014	-1735
88	3	9	3	30	3710	74.78	99.59	112	2193	-1014	-1736

ano	mes	dia	hora	min	P(muSt)	Car-Res	Car-%	EER1	EER2	EER4	EER5
88	3	9	3	45	3710	74.77	99.59	110	2193	-1014	-1736
88	3	9	4	0	3700	74.76	99.59	110	2192	-1014	-1737
88	3	9	4	15	3700	74.75	99.62	107	2192	-1014	-1737
88	3	9	4	30	3700	74.73	99.64	109	2191	-1014	-1738
88	3	9	4	45	3700	74.71	99.68	108	2191	-1014	-1738
88	3	9	5	0	3690	74.71	99.67	109	2191	-1015	-1738
88	3	9	5	30	3690	74.69	99.69	110	2190	-1015	-1739
88	3	9	6	0	3690	74.66	99.77	107	2189	-1016	-1740
88	3	9	6	30	3690	74.69	99.69	107	2188	-1016	-1740
88	3	9	7	0	3680	74.72	99.61	107	2187	-1018	-1741
88	3	9	7	30	3680	74.7	99.65	105	2187	-1018	-1741
88	3	9	8	0	3680	74.71	99.63	104	2186	-1019	-1744
88	3	9	9	0	3660	74.67	99.64	102	2187	-1021	-1743
88	3	9	10	35	3660	74.69	99.63	101	2183	-1021	-1743
88	3	9	13	15	3640	74.68	99.64	102	2184	-1021	-1742
88	3	9	16	45	3630	74.72	99.7	95	2176	-1025	-1742
88	3	10	10	0	3570	75.02	99.69	75	2145	-1050	-1763
88	3	10	11	0	3560	74.99	99.74	72	2143	-1052	-1764

TENS1	TENS2	Observacoes	t-t'(dias)	sig(MPa)
		moldagem as 9:15 hs dia 08/03/88		
		sem carga		
		sem carga		
		fc=2.55;2.21;2.35;2.72 MPa		
		sem carga		
2.552	2.608		0.000	0.00
2.552	2.607	carregamento	0.007	0.90
2.552	2.606	Car-% - leitura nao foi feita	0.008	0.87
2.553	2.605	Car-% - leitura nao foi feita	0.010	0.86
2.553	2.604	Car-% - leitura nao foi feita	0.012	0.85
2.553	2.6	Car-% - leitura nao foi feita	0.017	0.83
2.552	2.598	Assume como zero de Car-%	0.028	0.82
2.551	2.596		0.045	0.80
2.55	2.595		0.059	0.79
2.552	2.594		0.069	0.78
2.555	2.598		0.080	0.78
2.553	2.592		0.090	0.77
2.549	2.592		0.101	0.76
2.552	2.59		0.111	0.76
2.549	2.588		0.122	0.76
2.551	2.589		0.132	0.75
2.551	2.589		0.142	0.75
2.551	2.591		0.153	0.74
2.551	2.589		0.163	0.74
2.551	2.59		0.174	0.74
2.551	2.59		0.184	0.74
2.551	2.591		0.194	0.74
2.548	2.589		0.205	0.73
2.551	2.588		0.215	0.73
2.551	2.589		0.226	0.73
2.549	2.591		0.236	0.73
2.547	2.59		0.247	0.73
2.548	2.589		0.257	0.72
2.548	2.591		0.267	0.72
2.55	2.589		0.278	0.72
2.549	2.59		0.288	0.72
2.548	2.59		0.299	0.71
2.548	2.588		0.309	0.71
2.547	2.589		0.319	0.71

TENS1	TENS2	Observacoes	t-t' (dias)	sig (MPa)
2.548	2.589		0.330	0.71
2.588	2.588	quebra de TENS1 - nao mais media	0.340	0.71
2.588	2.589		0.351	0.71
2.589	2.589		0.361	0.71
2.589	2.589		0.372	0.71
2.589	2.589		0.382	0.70
2.588	2.588		0.403	0.70
2.588	2.588		0.424	0.70
2.588	2.588		0.444	0.70
2.589	2.589		0.465	0.69
2.587	2.587		0.486	0.69
2.587	2.587		0.507	0.69
2.588	2.588	fc=6.85;7.30 MPa	0.549	0.68
2.59	2.59		0.615	0.68
2.589	2.589		0.726	0.67
2.589	2.589		0.872	0.66
2.589	2.589		1.590	0.63
2.589	2.589	fc=9.12;11.4 MPa		
		fim do espaco de relaxacao		

T(Celsius)	epsCarl	epsEER12	epsCaER	deltarel	epsEER45	epsTENS12
26.1						
28.9						
28.8						
29.0						
29.3						
31.8						
31.8						
32.0						
31.5						
31.4						
30.9						
31.0						
30.8						
29.7						
29.0						
28.3	0	0	0		0	0
27.9	-130	-156	-143	0	2	-5
27.8	-130	-159	-145	-2	1	-10
27.7	-130	-160	-145	-2	-1	-10
27.5	-130	-163	-146	-4	-2	-15
27.2	-130	-165	-147	-5	-3	-35
26.6	-130	-166	-148	-5	-7	-50
25.7	-168	-173	-170	-27	-10	-65
25.1	-171	-175	-173	-30	-13	-75
24.6	-171	-178	-175	-32	-18	-70
24.2	-176	-180	-178	-35	-20	-35
23.9	-175	-179	-177	-34	-19	-75
23.6	-192	-180	-186	-43	-20	-95
23.4	-195	-182	-189	-46	-23	-90
23.1	-193	-184	-188	-45	-26	-115
22.8	-196	-185	-190	-47	-26	-100
22.7	-199	-185	-192	-49	-26	-100
22.5	-201	-187	-194	-51	-30	-90
22.3	-191	-187	-189	-46	-32	-100
22.1	-193	-188	-190	-48	-27	-95
22.0	-195	-188	-192	-49	-27	-95
21.9	-209	-189	-199	-56	-28	-90
21.8	-204	-190	-197	-54	-29	-115
21.7	-199	-191	-195	-52	-29	-105
21.6	-207	-192	-199	-56	-31	-100
21.5	-191	-190	-190	-48	-31	-100
21.4	-196	-191	-194	-51	-33	-115
21.3	-197	-192	-195	-52	-33	-115
21.3	-211	-191	-201	-58	-33	-105
21.2	-199	-193	-196	-53	-33	-105
21.1	-168	-194	-181	-38	-33	-105
21.1	-188	-194	-191	-48	-33	-110
21.1	-175	-195	-185	-42	-34	-120
21.2	-220	-196	-208	-65	-34	-120

T(Celsius)	epsCarl	epsEER12	epsCaER	deltarel	epsEER45	epsTENS12
21.1	-221	-197	-209	-66	-34	-115
21.1	-221	-197	-209	-66	-35	-200
21.0	-202	-199	-200	-58	-35	-200
20.9	-190	-198	-194	-51	-35	-190
20.8	-165	-199	-182	-39	-35	-190
20.8	-172	-198	-185	-42	-36	-190
20.7	-160	-198	-179	-36	-36	-200
20.6	-109	-200	-155	-12	-37	-200
20.7	-160	-201	-180	-38	-37	-200
20.9	-211	-201	-206	-63	-39	-190
20.8	-186	-202	-194	-51	-39	-210
20.8	-198	-203	-201	-58	-41	-210
20.6	-195	-204	-199	-56	-41	-200
20.7	-200	-206	-203	-60	-41	-180
20.7	-194	-205	-199	-57	-41	-190
20.9	-151	-213	-182	-39	-43	-190
22.3	-137	-238	-188	-45	-66	-190

epsERTENS deltaret dei(ret-rel)

0		
-1	0	0
-5	-3	-2
-5	-4	-2
-8	-7	-3
-19	-17	-13
-28	-27	-22
-37	-36	-8
-44	-42	-12
-44	-42	-10
-27	-26	9
-47	-45	-11
-57	-56	-12
-57	-55	-9
-70	-69	-23
-63	-61	-14
-63	-61	-12
-60	-58	-7
-66	-64	-18
-61	-59	-12
-61	-60	-11
-59	-57	-1
-72	-70	-16
-67	-66	-13
-65	-64	-7
-66	-64	-16
-74	-72	-21
-74	-72	-20
-69	-67	-9
-69	-68	-15
-69	-67	-29
-72	-70	-22
-77	-75	-33
-77	-76	-10

epsERTENS	deltaret	dol(ret-rel)
-75	-73	-7
-117	-116	-49
-117	-116	-58
-113	-111	-60
-113	-111	-72
-113	-111	-69
-118	-117	-80
-119	-117	-105
-119	-117	-79
-114	-113	-50
-124	-123	-72
-125	-124	-66
-121	-119	-63
-111	-109	-49
-115	-114	-57
-116	-115	-76
-128	-126	-81

ano	mes	dia	hora	min	P(muSt)	Car-Res1	Car-%1	Car-Res2	Car-%2	EER1
88	3	22	8	50						
88	3	22	10	50		76.28	99.26	75.95	100.81	673
88	3	22	11	50		76.24	99.26	75.87	100.81	672
88	3	22	13	50		76.29	99.23	75.92	100.77	633
88	3	22	15	30		76.49	99.19	76.1	100.78	649
88	3	22	16	0		76.56	99.11	76.27	100.78	587
88	3	22	17	45	5670	75.98	99.13	75.59	100.78	577
88	3	22	17	54	7390	75.98	98.57	75.59	100.78	126
88	3	22	17	57	7270	75.99	98.55	75.55	100.78	116
88	3	22	18	2	7180	75.99	98.54	75.52	100.79	105
88	3	22	18	9	7140	75.89	98.54	75.48	100.78	103
88	3	22	18	19	7110	75.87	98.54	75.46	100.78	99
88	3	22	18	28	7090	75.83	98.55	75.42	100.78	97
88	3	22	18	33	6860	75.82	98.57	75.41	100.78	113
88	3	22	18	46	6850	75.82	98.56	75.34	100.79	108
88	3	22	19	3	6840	75.78	98.56	75.3	100.79	107
88	3	22	19	17	6820	75.69	98.57	75.28	100.78	105
88	3	22	19	41	6800	75.67	98.57	75.24	100.78	105
88	3	22	19	57	6790	75.65	98.56	75.18	100.79	104
88	3	22	20	23	6770	75.58	98.57	75.09	100.79	103
88	3	22	20	36	6760	75.5	98.58	75.07	100.78	103
88	3	22	20	50	7100	75.48	98.54	74.99	100.79	85
88	3	22	21	9	7060	75.41	98.55	74.97	100.78	84
88	3	22	21	28	7050	75.39	98.54	74.89	100.79	83
88	3	22	21	42	7040	75.33	98.55	74.88	100.79	83
88	3	22	21	56	7030	75.32	98.55	74.81	100.79	82
88	3	22	22	16	7010	75.24	98.56	74.8	100.79	83
88	3	22	22	32	7000	75.25	98.55	74.74	100.79	82
88	3	22	22	51	6990	75.18	98.56	74.72	100.79	82
88	3	22	23	10	6990	75.19	98.55	74.67	100.79	81
88	3	23	7	46	6860	74.83	98.56	74.33	100.79	77
88	3	23	9	45	6850	74.84	98.56	74.27	100.79	77
88	3	24	12	5	6800	75.68	98.5	75.36	100.74	60
88	3	24	13	27	6780	75.5	98.51	75.16	100.76	61
88	3	24	14	32	6790	75.39	98.52	75.04	100.76	54
88	3	24	15	29	6780	75.33	98.52	75.01	100.76	54
88	3	24	16	28	6780	75.29	98.52	74.99	100.77	53
88	3	24	17	27	6780	75.33	98.52	74.96	100.76	51
88	3	24	17	35	6620	75.3	98.52	74.96	100.76	55
88	3	24	18	0	6610	75.35	98.51	74.97	100.76	55
88	3	25	10	0	6540	75.41	98.5	75.09	100.73	50
88	3	25	16	13	6530	75.63	98.49	75.35	100.72	44
88	3	25	17	4	6210	75.66	98.5	75.37	100.73	46
88	3	28	8	0	6100	76.04	98.43	75.79	100.66	27
88	3	28	15	45	6110	75.68	98.45	75.32	100.68	15
88	3	28	16	45	6120	75.63	98.45	75.31	100.68	15
88	3	28	17	45	6120	75.61	98.45	75.28	100.67	14
88	3	29	8	30	6060	75.37	98.44	75.08	100.67	14
88	4	5	13	50	5940	75.14	98.39	74.8	100.6	-35
88	4	7	15	30	5890	74.64	98.4	74.49	100.6	-49
88	4	7	16	20	5890	74.84	98.36	74.49	100.6	-49
88	4	12	16	0	5870	75.2	98.31	74.52	100.57	-63
88	4	19	13	40	5790	75.87	98.27	75.57	100.5	-76
88	6	2	12	0	5630					-175
88	6	14	11	15	5610					-182

EER2	EER3	EER4	Observacoes	t(dias)	t-t'(dias)
			moldagem	0.000	
-558	-728	-2977	em 22 de marco de 1988	0.083	
-569	-729	-2965		0.125	
-583	-729	-2960		0.208	
-615	-662	-2986	retracao interpolada!!!	0.278	
-641	-595	-3013	fc=.98	0.299	
-652	-729	-3040	sem carga	0.372	0.000
-970	-779	-3038	inicio do carregamento	0.378	0.006
-974	-784	-3037	t'=9h/fct'=0.98MPa/Et'=3544.44MPa	0.380	0.008
-985	-763	-3039		0.383	0.012
-989	-745	-3044		0.388	0.017
-989	-750	-3044		0.395	0.024
-990	-752	-3045	logo antes da correcao	0.401	0.030
-976	-758	-3044	logo depois da correcao	0.405	0.033
-977	-756	-3045		0.414	0.042
-977	-757	-3047		0.426	0.054
-978	-754	-3048		0.435	0.064
-978	-764	-3052		0.452	0.081
-978	-766	-3054		0.463	0.092
-978	-775	-3057		0.481	0.110
-978	-778	-3058	logo antes da correcao	0.490	0.119
-992	-779	-3059	logo depois da correcao	0.500	0.128
-992	-766	-3061		0.513	0.142
-993	-770	-3062		0.526	0.155
-992	-770	-3064		0.536	0.165
-993	-785	-3065		0.546	0.174
-993	-786	-3066		0.560	0.188
-992	-790	-3067		0.571	0.199
-993	-800	-3068		0.584	0.213
-993	-795	-3069		0.597	0.226
-992	-796	-3082		0.956	0.584
-992	-796	-3082		1.038	0.667
-1014	-800	-3065	falta luz: de 23 as 10 a 24 as 12	2.135	1.764
-1016	-810	-3074		2.192	1.821
-1019	-794	-3079		2.238	1.866
-1018	-808	-3081		2.277	1.906
-1020	-816	-3083		2.318	1.947
-1020	-813	-3083	logo antes da correcao	2.359	1.988
-1017	-815	-3083	logo depois da correcao	2.365	1.993
-1017	-816	-3084		2.382	2.010
-1021	-816	-3084		3.049	2.677
-1032	-825	-3083	fc=7.8 e 8.8MPa	3.308	2.936
-1030	-830	-3089	logo apos correcao	3.343	2.972
-1056	-856	-3112	ar condicionado com defeito	5.965	5.594
-1062	-859	-3128	ar condicionado recuperado	6.288	5.917
-1064	-862	-3129		6.330	5.958
-1064	-850	-3130		6.372	6.000
-1061	-858	-3138		6.986	6.615
-1112	-918	-3193	fc=15.74MPa	14.208	13.837
-1127	-949	-3221		16.278	15.906
-1126	-941	-3218		16.313	15.941
-1141	-953	-3223	valores interpolados, exceto carga	21.299	20.927
-1168	-969	-3229	final de ensaio aos 28 dias	28.201	27.830
-1282	-996	-3363	fc28=17.28MPa / E28=19184.44MPa	72.132	71.760
-1296	-980	-3389		84.101	83.729

sig(MPa)	T(C)	lida	T1(Celsius)	epsCar11	epsEER12	epsCaER1	deltarel
			26.2				
			26.0				
			26.3				
			27.2				
			27.6				
0.00	23.2		24.8	0	0	0	
0.54	23.2		24.8	-357	-385	-371	0
0.50	23.2		24.8	-369	-392	-380	-10
0.47	23.2		24.8	-376	-403	-389	-18
0.46	23.2		24.3	-383	-406	-394	-23
0.45	23.2		24.2	-384	-408	-396	-25
0.44	23.2		24.1	-380	-409	-395	-24
0.37	23.2		24.0	-368	-394	-381	-10
0.37	23.2		24.0	-375	-397	-386	-15
0.37	23.2		23.8	-377	-398	-387	-17
0.36	23.2		23.4	-377	-399	-388	-17
0.35	23		23.3	-378	-399	-389	-18
0.35	22.8		23.2	-386	-400	-393	-22
0.34	22.5		22.8	-385	-400	-392	-21
0.34	22.5		22.5	-384	-400	-392	-21
0.45	22.3		22.4	-411	-416	-413	-42
0.43	22.3		22.0	-409	-417	-413	-42
0.43	22.3		21.9	-417	-418	-417	-46
0.43	22.3		21.6	-415	-417	-416	-45
0.43	22.2		21.6	-415	-418	-417	-46
0.42	22.2		21.2	-414	-418	-416	-45
0.42	22.2		21.3	-420	-418	-419	-48
0.41	22.1		20.9	-418	-418	-418	-47
0.41	22		21.0	-424	-419	-421	-50
0.37	22		19.2	-442	-420	-431	-60
0.37	22		19.3	-442	-420	-431	-60
0.35	23.5		23.3	-422	-440	-431	-60
0.35	23.2		22.5	-428	-440	-434	-63
0.35	23		21.9	-430	-445	-437	-66
0.35	23		21.6	-434	-445	-439	-68
0.35	22.8		21.4	-436	-446	-441	-70
0.35	22.8		21.6	-434	-447	-440	-69
0.30	22.8		21.5	-436	-444	-440	-69
0.29	22.8		21.7	-439	-444	-441	-70
0.27	22.8		22.0	-441	-448	-444	-74
0.27	23		23.1	-432	-457	-444	-73
0.17	23		23.2	-424	-455	-439	-68
0.13	26		25.1	-442	-477	-460	-89
0.14	22.8		23.3	-454	-486	-470	-99
0.14	22.6		23.1	-458	-487	-472	-102
0.14	22.6		23.0	-459	-488	-473	-102
0.12	22.5		21.8	-482	-486	-484	-113
0.08	20.3		20.7	-530	-536	-533	-162
0.07	19.2		18.3	-557	-551	-554	-183
0.07	20		19.3	-569	-550	-560	-189
0.06	20		21.0	-577	-565	-571	-200
0.04	23.5		24.2	-556	-585	-570	-199
-0.01	23.5				-691	-691	-320
-0.02					-702	-702	-331

epsCar12	epsEER34	epsCaER2	deltaret	deltaret inverso	del(ret-rel)	T2(Celsius)
0	0	0				28.2
-6	6	0				28.0
-28	8	-10				28.3
-9	29	10				29.3
3	49	26				29.6
-44	-32	-38				26.8
-44	-56	-50	-12	12.000	-12	26.8
-47	-58	-53	-14	14.380	-5	26.8
-43	-49	-46	-7	7.430	11	26.8
-52	-42	-47	-9	8.796	14	26.3
-53	-45	-49	-11	10.736	14	26.2
-56	-46	-51	-13	12.866	11	26.0
-57	-49	-53	-14	14.461	-4	26.0
-55	-48	-52	-13	13.391	2	26.0
-58	-50	-54	-16	15.522	1	25.8
-66	-49	-57	-19	18.947	-2	25.4
-68	-56	-62	-24	23.827	-6	25.3
-66	-58	-62	-24	23.662	-2	25.2
-72	-64	-68	-30	29.768	-8	24.8
-80	-66	-73	-35	34.693	-14	24.4
-79	-67	-73	-35	34.719	8	24.3
-87	-61	-74	-36	35.894	6	24.0
-86	-64	-75	-37	36.669	10	23.9
-87	-65	-76	-38	37.514	7	23.6
-92	-73	-82	-44	43.930	2	23.6
-92	-74	-83	-45	44.775	0	23.2
-96	-76	-86	-48	48.095	0	23.2
-98	-82	-90	-52	51.535	-4	22.9
-101	-80	-90	-52	52.261	-2	22.9
-125	-87	-106	-67	67.493	-7	21.2
-129	-87	-108	-70	69.563	-10	21.2
-86	-80	-83	-45	44.876	15	25.3
-87	-90	-88	-50	50.058	13	24.4
-95	-84	-90	-51	51.448	15	23.9
-97	-92	-95	-56	56.483	12	23.6
-92	-97	-95	-56	56.439	14	23.4
-101	-96	-98	-60	59.959	9	23.6
-101	-97	-99	-60	60.459	8	23.5
-100	-98	-99	-61	60.614	10	23.7
-111	-98	-104	-66	66.178	7	24.0
-100	-102	-101	-62	62.441	11	25.1
-92	-107	-99	-61	61.266	7	25.2
-108	-132	-120	-82	81.669	7	27.1
-128	-141	-134	-96	96.167	3	25.3
-128	-143	-136	-98	97.512	4	25.1
-137	-138	-137	-99	99.032	3	25.0
-151	-146	-148	-110	109.933	3	23.8
-215	-203	-209	-171		-9	22.7
-237	-233	-235	-196		-13	20.3
-237	-227	-232	-194		-5	21.2
-254	-236	-245	-207		-7	23.0
-227	-247	-237	-199		1	26.2

ano	mes	dia	hora	min	P(muSt)	Car-Res1	Car-%1	Car-Res2	Car-%2	EER1
88	5	17	9	30						
88	5	17	11	25				75.65	100.92	
88	5	17	13	20				75.72	100.89	
88	5	17	15	0				75.89	100.89	-2582
88	5	17	16	35				76.09	100.88	-2600
88	5	17								
88	5	17	18	30	2560			75.81	100.88	-2633
88	5	17	18	37	3330			75.82	100.87	-2762
88	5	17	18	43	3290			75.79	100.87	-2769
88	5	17	18	55	3260			75.69	100.88	-2773
88	5	17	19	8	3240			75.65	100.88	-2778
88	5	17	20	0	3200			75.37	100.88	-2787
88	5	17	20	30	3180			75.19	100.89	-2792
88	5	17	22	0	3140			74.84	100.9	-2806
88	5	17	22	15	3220			74.77	100.9	-2824
88	5	18	0	47	3190			74.43	100.91	-2835
88	5	18	1	20	3180			74.39	100.91	-2836
88	5	18	2	47	3150			74.31	100.91	-2839
88	5	18	6	40	3130			74.22	100.91	-2849
88	5	18	8	7	3140			74.19	100.91	-2852
88	5	18	9	22	3140			74.18	100.91	-2853
88	5	18	9	40	3130			74.19	100.9	-2846
88	5	18	12	15	3110			74.24	100.89	-2850
88	5	18	16	30	3090			74.37	100.89	-2849
88	5	19	8	20	3100			75.34	100.83	-2850
88	5	19	11	30	3090			75.03	100.84	-2853
88	5	19	12	34	3110			74.99	100.84	-2856
88	5	19	12	43	2930			75.03	100.84	-2850
88	5	19	13	31	2930			74.98	100.84	-2852
88	5	19	14	37	2930			74.98	100.83	-2854
88	5	19	16	8	2930			74.91	100.84	-2858
88	5	19	19	17	2930			74.87	100.83	-2859
88	5	20	13	30	2890			74.79	100.82	-2879
88	5	20	14	35	2900			74.79	100.81	-2876
88	5	20	16	3	2900			74.79	100.81	-2880
88	5	20	19	13	2900			74.78	100.81	-2882
88	5	24	12	23	2790			74.66	100.75	-2922
88	5	24	17	36	2820			74.65	100.74	-2939
88	5	24	20	11	2820			74.73	100.75	-2935
88	5	26	10	40	2750			74.58	100.72	-2934
88	6	2	12	0	2690			75.18	100.63	-2929
88	6	14	11	10	2620			74.63	100.57	-2975
88	6	14	14	15	2890			74.58	100.57	-3006
88	6	14	14	29	3000			74.56	100.57	-2979
88	6	14	14	44	3000			74.56	100.57	-3054
88	6	22	11	22	2890			74.35	100.52	-3112

EER2	EER3	EER4	Observacoes	t(dias)	t-t'(dias)
			moldagem	0.000	
	-177	-1989		0.080	
				0.160	
-1924	-230	-2026		0.229	
-1950	-241	-2027		0.295	
			fc(8.5h)=1.17MPa	0.340	
-1974	-241	-2046	zeros-antes de carregar	0.375	0.000
-2115	-243	-2045	carregamento t'=9horas	0.380	0.005
-2121	-242	-2047	E(t')=3498.81MPa	0.384	0.009
-2129	-241	-2050		0.392	0.017
-2128	-242	-2052		0.401	0.026
-2132	-240	-2060		0.438	0.063
-2129	-243	-2067		0.458	0.083
-2131	-250	-2130		0.521	0.146
-2143	-249	-2080	primeira correcao:	0.531	0.156
-2144	-258	-2096	"aperto das porcas"	0.637	0.262
-2148	-258	-2092		0.660	0.285
-2143	-253	-2090		0.720	0.345
-2146	-257	-2098		0.882	0.507
-2149	-257	-2100		0.942	0.567
-2153	-257	-2101	fc=6.36MPa	0.994	0.619
-2146	-253	-2095		1.007	0.632
-2155	-260	-2101		1.115	0.740
-2153	-258	-2099	.Problemas no ar condicionado	1.292	0.917
-2184	-292	-2103		1.951	1.576
-2181	-288	-2105		2.083	1.708
-2184	-292	-2111		2.128	1.753
-2179	-291	-2111	segunda correcao:	2.134	1.759
-2175	-298	-2112	"relaxacao das porcas"	2.167	1.792
-2178	-293	-2114		2.213	1.838
-2181	-295	-2116		2.276	1.901
-2190	-297	-2119		2.408	2.033
-2192	-300	-2127		3.167	2.792
-2195	-327	-2124		3.212	2.837
-2195	-330	-2129	fc3=11.72MPa // E3=14657.38MPa	3.273	2.898
-2202	-331	-2131		3.405	3.030
-2231	-366	-2168	fc7= 13.78MPa // E7=16020.30MPa	7.120	6.745
-2235	-371	-2170		7.338	6.963
-2235	-382	-2168		7.445	7.070
-2258	-398	-2175	valores de eer interpolados	9.049	8.674
-2303	-432	-2210		16.104	15.729
-2328	-434	-2256	fc28= 16.78MPa // E28= 18374.82MPa	28.069	27.694
-2343	-449	-2250	aplicada correcao - aperto	28.198	27.823
-2320	-453	-2254		28.208	27.833
-2338	-462	-2281	aplicada nova correcao	28.218	27.843
-2376	-498	-2295		36.078	35.703

sig(MPa)	Temp.Lida	epsCar11	epsEER12	epsCaER1	deltarel	epsCar12
	24.0					
	22.8					0
	21.5					-15
	21.5					-3
	21.8					4
	22.8					
0.00	22.8		0	0		-15
0.48	22.8	-135	-135		0	-21
0.46	22.5	-142	-142		-7	-23
0.44	22.5	-148	-148		-13	-23
0.43	22.5	-150	-150		-15	-26
0.40	22.0	-156	-156		-21	-45
0.39	22.0	-157	-157		-22	-51
0.36	22.0	-165	-165		-30	-69
0.41	21.7	-180	-180		-45	-73
0.39	21.3	-186	-186		-51	-90
0.39	21.0	-189	-189		-54	-93
0.37	21.0	-188	-188		-53	-99
0.36	20.7	-194	-194		-59	-105
0.36	20.4	-197	-197		-62	-107
0.36	20.8	-200	-200		-65	-107
0.36	21.0	-193	-193		-58	-113
0.34	21.0	-199	-199		-64	-116
0.33	23.0	-198	-198		-63	-107
0.34	24.5	-214	-214		-79	-79
0.33	21.9	-214	-214		-79	-94
0.34	21.9	-218	-218		-83	-97
0.23	21.9	-211	-211		-76	-94
0.23	21.9	-210	-210		-75	-98
0.23	21.8	-213	-213		-78	-104
0.23	21.7	-216	-216		-81	-102
0.23	21.3	-221	-221		-86	-112
0.21	21.0	-232	-232		-97	-124
0.21	21.5	-232	-232		-97	-130
0.21	20.9	-234	-234		-99	-130
0.21	20.9	-239	-239		-104	-131
0.14	20.2	-273	-273		-138	-178
0.16	20.2	-284	-284		-149	-185
0.16	21.2	-282	-282		-147	-173
0.12	19.8	-293	-293		-158	-202
0.08	23.5	-313	-313		-178	-219
0.04	19.3	-348	-348		-213	-296
0.21	19.3	-371	-371		-236	-299
0.28	19.3	-346	-346		-211	-300
0.28	19.3	-393	-393		-258	-300
0.21	18.8	-441	-441		-306	-347

epsEER34	epsCaER2	deltaret	deltaret inverso	del(ret-rel)	T2(Celsius)
0	0				24.9
1083	534				25.2
-45	-24				26.0
-51	-23				27.0
					26.5
-61	-38				25.7
-61	-41	-3	3.126	-3	25.7
-62	-42	-4	4.407	2	25.6
-63	-43	-5	5.124	7	25.1
-64	-45	-7	7.248	7	24.9
-67	-56	-18	18.370	3	23.5
-72	-61	-24	23.836	-2	22.7
-107	-88	-50	50.143	-20	21.0
-82	-77	-40	39.799	5	20.6
-94	-92	-55	54.512	-4	19.0
-92	-93	-55	54.887	-1	18.8
-89	-94	-56	55.886	-3	18.4
-95	-100	-62	61.979	-3	18.0
-96	-101	-64	63.510	-2	17.8
-96	-102	-64	64.103	0	17.8
-91	-102	-64	64.480	-7	17.8
-98	-107	-69	69.231	-5	18.1
-96	-101	-64	63.764	-1	18.7
-115	-97	-59	59.251	19	23.4
-114	-104	-66	66.184	12	21.9
-119	-108	-70	70.058	12	21.7
-118	-106	-66	68.434	8	21.9
-122	-110	-72	72.152	3	21.6
-121	-112	-75	74.622	3	21.6
-123	-112	-75	74.808	6	21.3
-125	-118	-81	80.652	5	21.1
-131	-127	-89	89.371	8	20.7
-143	-136	-99	98.591	-2	20.7
-147	-138	-101	100.591	-2	20.7
-148	-139	-102	101.685	2	20.7
-184	-181	-143	143.129	-5	20.1
-188	-186	-148	148.442	0	20.0
-192	-182	-145	144.723	2	20.4
-204	-203	-165		-8	19.7
-238	-229	-191		-13	22.6
-262	-279	-241		-28	19.9
-267	-283	-245		-9	19.7
-271	-285	-248		-37	19.6
-289	-294	-257		1	19.6
-314	-330	-293		13	18.6