

**Comitê Brasileiro de  
Grandes Barragens**



**XVIII  
SEMINÁRIO  
NACIONAL  
DE GRANDES  
BARRAGENS**

Concreto Rolado - Ensaios Especiais

**ANAIIS  
Volume I**

**Foz do Iguaçu, abril 1989**

XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS  
FOZ DO IGUAÇU  
ABRIL/1989

CONCRETO ROLADO - ENSAIOS ESPECIAIS

TEMA I

Engº Mario Raul Zanella (\*)  
Engº José Augusto Braga (\*)  
Engº Luiz Cesar Rosário (\*)  
Engº Adalberto G. Chenú Ayala (\*)  
Engº Francisco R. Andriolo (\*\*)  
Engº Miguel Golik (\*\*\*)  
(\*) ITAIPU BINACIONAL  
(\*\*) CONSULTOR  
(\*\*\*) EMSA-HIDROELÉTRICA DE URUGUA-I

## Í N D I C E

- 1 - APRESENTAÇÃO
- 2 - APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE URUGUA-I
- 3 - MATERIAIS DISPONÍVEIS
- 4 - ENSAIOS
  - 4.1 - Massa Específica
  - 4.2 - Resistência à Compressão Axial Simples
  - 4.3 - Resistência a Tração
  - 4.4 - Compressão Triaxial - Envoltória de Mohr e Cisalhamento.
  - 4.5 - Módulo de Deformação e Coeficiente de Poisson
  - 4.6 - Fluênciia - Deformação Lenta
    - 4.6.1 - Valores medidos Comparativamente com Valores Obtidos com outro Sistema de Medição
    - 4.6.2 - Valor Obtido e o Conjunto de Valores de Fluênciia de Demais Concretos
  - 4.7 - Deformações Autógenas
  - 4.8 - Capacidade de Alongamento
  - 4.9 - Elevação Adiabática de Temperatura
  - 4.10- Difusividade e Condutividade Térmica
  - 4.11- Calor Específico
  - 4.12- Coeficiente Linear de Expansão Térmica
  - 4.13- Permeabilidade
- 5 - COMENTÁRIOS
  - 5.1 - Massa Específica
  - 5.2 - Propriedades Mecânicas
  - 5.3 - Propriedades Elásticas
    - 5.3.1 - Módulo de Deformação
    - 5.3.2 - Fluênciia
    - 5.3.3 - Capacidade de Alongamento
  - 5.4 - Propriedades Térmicas
    - 5.4.1 - Elevação Adiabática de Temperatura

5.4.2 - Difusividade e Condutividade Térmica

5.4.3 - Calor Específico

5.4.4 - Coeficiente Linear de Expansão Térmica

5.5 - Variações Autógenas

5.6 - Permeabilidade

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 - RESUMO

## CONCRETO ROLADO - ENSAIOS ESPECIAIS

### 1 - APRESENTAÇÃO

A utilização da técnica do Concreto Rolado, na decada de 80, mostrou uma evolução rápida e de forma sólida.

Em Paises como Japão, África do Sul, Espanha, França, Estados Unidos, Australia, entre outros, essa técnica vem sendo empregada amplamente, e de forma irreversível.

Há, entretanto, nos diversos setores técnicos envolvidos alguns segmentos que apresentam dúvidas, nem sempre fundamentadas, sobre propriedades e comportamento do "Concreto Rolado".

Os responsáveis técnicos pelo Aproveitamento Hidroelétrico de Urugua-I, contando com a disponibilidade do Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional, elaboraram uma programação conjunta de ensaios visando conhecer amplamente as propriedades do "Concreto Rolado".

Este trabalho, então, apresenta um amplo conjunto de dados de ensaios, de laboratório, executados sobre o concreto rolado em uso na Obra de Urugua-I.

São, aqui, considerados ensaios especiais aqueles que se destinam a obter informações úteis ao projeto e não aqueles referentes ao controle de qualidade.

### 2 - APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE URUGUA-I

O Aproveitamento Hidroelétrico de Urugua-I se localiza no extremo norte da Provincia de Misiones - Argentina, com as seguintes características de interesse (1):

- Bacia do Rio Urugua-I	- 2.536 Km <sup>2</sup>
- Curso do Rio Urugua-I	- 246 Km
- Vazão media anual	- 53,6 m <sup>3</sup> /s
- Área do lago	- 9.000 ha
- Volume do lago	- 1.200 Hm <sup>3</sup>

- Volume de concreto (convencional) 150.000 m<sup>3</sup>

BARRAGEM PRINCIPAL EM CONCRETO ROLADO COM:

- |                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| - Comprimento da crista         | - 700 m                  |
| - Altura máxima no leito do rio | - 76 m                   |
| - Volume de concreto rolado     | - 590.000 m <sup>3</sup> |
| - Paramento montante            | - vertical               |
| - Paramento jusante             | - lv: 0,8h               |

A central da usina tem as seguintes características:

- |   |           |
|---|-----------|
| - Adução por tunel de $\emptyset = 7,0$ m e 820 m de extenção |           |
| - Altura útil   | = 90 m    |
| - Turbinas (Francis)  | 2 x 60 MW |

O aproveitamento situa-se em região de rocha basáltica, com clima temperado moderadamente chuvoso (Koeppen), com precipitação anual de aproximadamente 1.800 mm, e temperatura média anual de 20,5°C (média no verão = 25°C, média no inverno = 16°C).

### 3 - MATERIAIS DISPONÍVEIS

Os materiais disponíveis para a execução da obra são (1):

- \* Agregado graúdo - obtido pela britagem de rocha basáltica, sã, densa ( $2,95 \text{ t/m}^3$ ), com  $\emptyset$  máx = 76 mm
- \* Agregado miúdo - obtido pela composição de areia natural (fina) do Rio Paraná, e areia artificial produzida pela britagem do basalto.
- Ambos os agregados - graúdo e miúdos-são utilizados sem lavagem, com intuito de incorporar "finos" à mistura
- \* Cimento - tipo II (ASTM), proveniente de Bar-

quer - Loma Negra - Província de Buenos Aires, com as seguintes características básicas:

- Superfície específica(Blaine)	- 3.170 cm <sup>2</sup> /g
- Início de pega (Vicat)	- 4h: 30 min.
- Expansão em autoclave	- 0,039 %
- Resistências (cubos) 7 dias	- 270 Kgf/cm <sup>2</sup>
28 "	- 400      "
90 "	- 556      "
180 "	- 608      "
- Perda ao fogo	- 1,60 %
- Resíduo insolúvel	- 0,69 %
- Equivalente alcalino	- 0,42 %
- Óxido de magnésio (MgO)	- 0,95 %
- Cal livre (CaO)	- 0,05 %
- C <sub>3</sub> S	- 43,85 %
- C <sub>2</sub> S	- 33,52 %
- C <sub>3</sub> A	-
- C <sub>4</sub> AF	- 14,67 %
- Calor de hidratação 7 dias	- 64 Cal/g
28 dias	- 7,7      "

Para a composição dos agregados no concreto rolado, as gamas granulométricas foram proporcionadas para a tender uma curva do tipo  $P = \sqrt[3]{\frac{\emptyset}{\emptyset_{\max}}} \times 100\%$  com:

$\emptyset$  = Dimensão do agregado

$\emptyset_{\max}$  = Tamanho máximo do agregado

P = Percentual passante (peso)

As extremidades da curva foram ajustadas para o teor de finos (menor que a malha nº 200) adequados à mistura.

A mistura de concreto rolado de uso na Obra em sua maioria, resumiu-se a:

- Cimento	- 60 Kg/m <sup>3</sup>
- Água	- 100      "
- Areia natural	- 204      "

- Areia artificial	- 1.043 Kg/m <sup>3</sup>
- Agregado graúdo (1/4"-1 1/4")	- 891 Kg/m <sup>3</sup>
- Agregado graúdo (1 1/4"-3")	- 407 Kg/m <sup>3</sup>

#### 4 - ENSAIOS

Os ensaios executados no Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional, sobre o "Concreto Rolado" de Urugua-I, seguiram uma programação estabelecida com intuito de avaliar profundamente o material.

Os estudos tiveram início em junho/1986, desenvolvendo-se até o mês de outubro/1988. As misturas de concreto rolado ensaiadas foram, fundamentalmente, as com teores de 60 Kg/m<sup>3</sup> e 90 Kg/m<sup>3</sup> de cimento.

##### 4.1 - MASSA ESPECÍFICA

A massa específica foi determinada sobre corpos de prova extraídos do aterro experimental nº 1, executado em Urugua-I. Foram obtidos os valores mostrados na figura 1.

MASSA ESPECÍFICA				
SECA		SATURADA		
MÉDIA (kg/m <sup>3</sup> )	Nº DE ENSAIOS	MÉDIA (kg/m <sup>3</sup> )	Nº DE ENSAIOS	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
2 4 6 3	5	2 5 2 9	2 2	2, 2 %

Figura 1 - VALORES DE MASSA ESPECÍFICA OBTIDA SOBRE TESTEMUNHOS DE CONCRETO ROLADO — ATERRO EXPERIMENTAL Nº1-URUGUA - I [ 2 ]

A título de comparação, pode-se citar que os concretos massa convencionais, com Ø máx 76 mm, usados na obra de Itaipu (agregado basáltico com  $\gamma = 2,95 \text{ t/m}^3$ , e areia natural do Rio Paraná) mostraram (3)

Nº de ensaios	Massa específica saturada			
	Concreto integral		Concreto peneirado ( $\leq 38 \text{ mm}$ )	
	Média Kg/m <sup>3</sup>	CV (%)	média Kg/m <sup>3</sup>	CV %
156	2.605	2,1	2.448	2,3

E, ainda, o concreto rolado aplicado em algumas regiões, na Obra de Itaipu, mostrou (4) uma massa específica saturada de 2.625 Kg/m<sup>3</sup>.

Há então, uma satisfatória semelhança entre os valores.

#### 4.2 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES

A apresentação da resistência à compressão axial simples tem um valor apenas relativo, tendo em vista a dependência do consumo de aglomerante.

Dessa forma, uma maneira mais abrangente da apresentação desses dados é através do rendimento " $\eta$ ", que é conceituado como o quociente da resistência pelo consumo de aglomerante.

Assim é que os valores obtidos nos ensaios são mostrados (3) na figura 2.

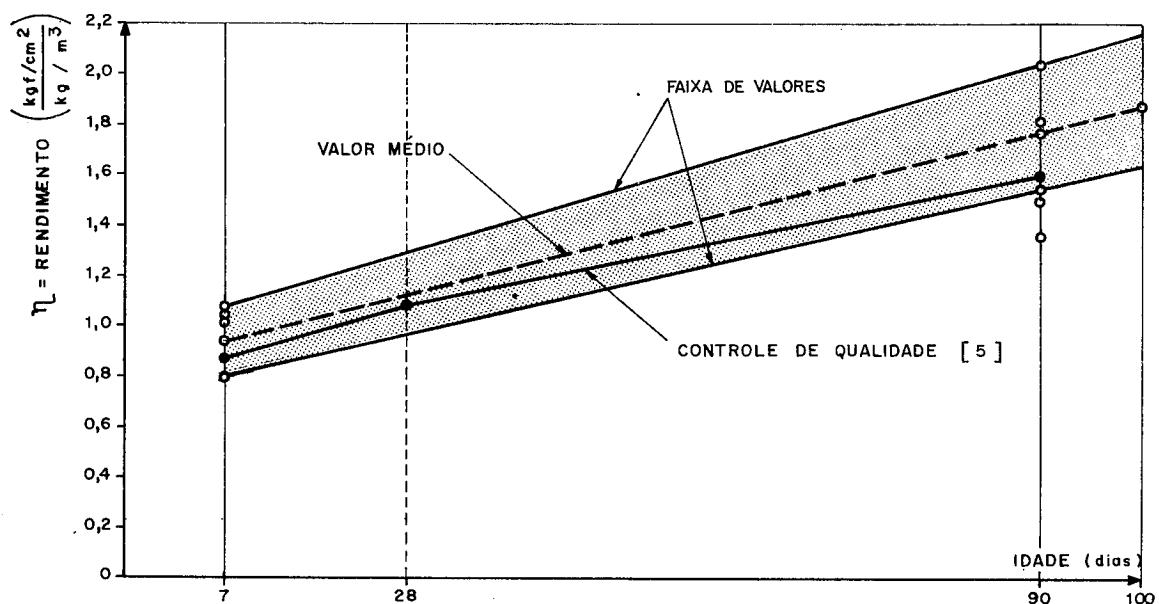


Figura 2 - VALORES DE RENDIMENTOS (RESISTÊNCIA/CONSUMO) OBTIDOS NOS ENSAIOS SOBRE TESTEMUNHOS DE CONCRETO ROLADO DO ATERRAMENTO —— URUGUA-I [2] E OS OBTIDOS NO CONTROLE DE QUALIDADE [5]

#### 4.3 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração foi determinada pelo "Método Brasileiro", através da ruptura por compressão diametral.

Da mesma forma que o citado para a resistência à compressão axial, há uma grande dependência do consumo de aglomerante.

Para uma avaliação mais fácil, a prática é apresentar os parâmetros relacionados com a resistência à compressão axial.

A figura 3 mostra, comparativamente, os valores obtidos para o "Concreto Rolado de Urugua-I" e o de outras obras, em "Concreto Rolado"

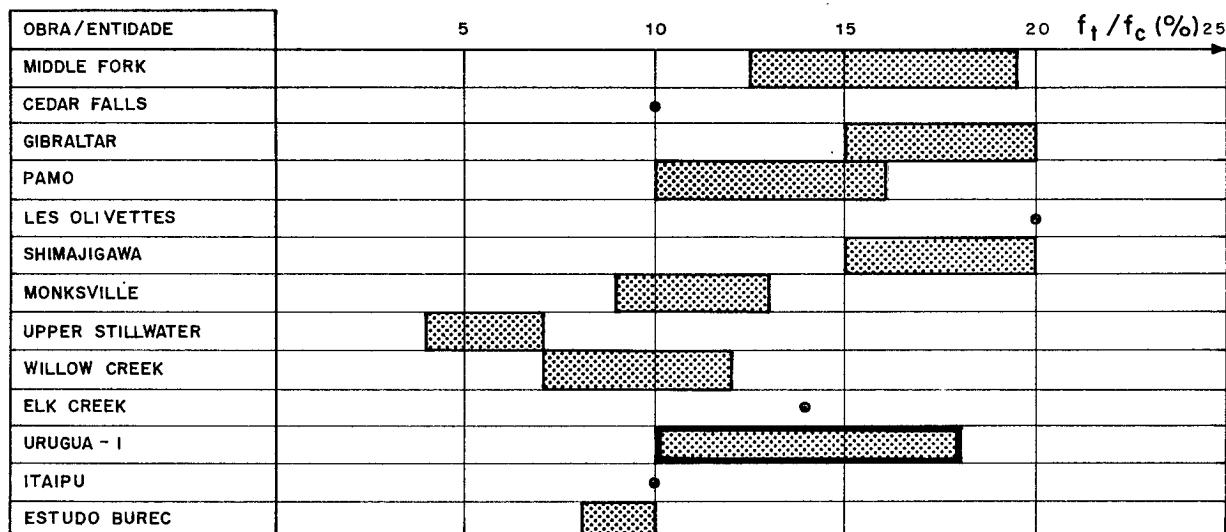


Figura 3 - RELAÇÃO PERCENTUAL ENTRE  $f_t / f_c$  (TRAÇÃO/COMPRESSÃO )

#### 4.4 – COMPRESSÃO TRIAXIAL – ENVOLTÓRIA DE MOHR E CISALHAMENTO.

Os ensaios de compressão triaxial tem o objetivo de determinar a envoltória de Mohr e, em decorrência, a coesão e o ângulo de atrito interno.

O procedimento desse ensaio – baseado nos métodos CRD-C-93/70 e CRD-C-147/68, do Corps of Engineers, e ASTM-D-2664 – consiste, basicamente, em submeter um corpo de prova, revestido por uma membrana impermeável e flexível, à uma pressão confinante, constante, e uma carga axial até à ruptura, como esquematiza a figura 4.

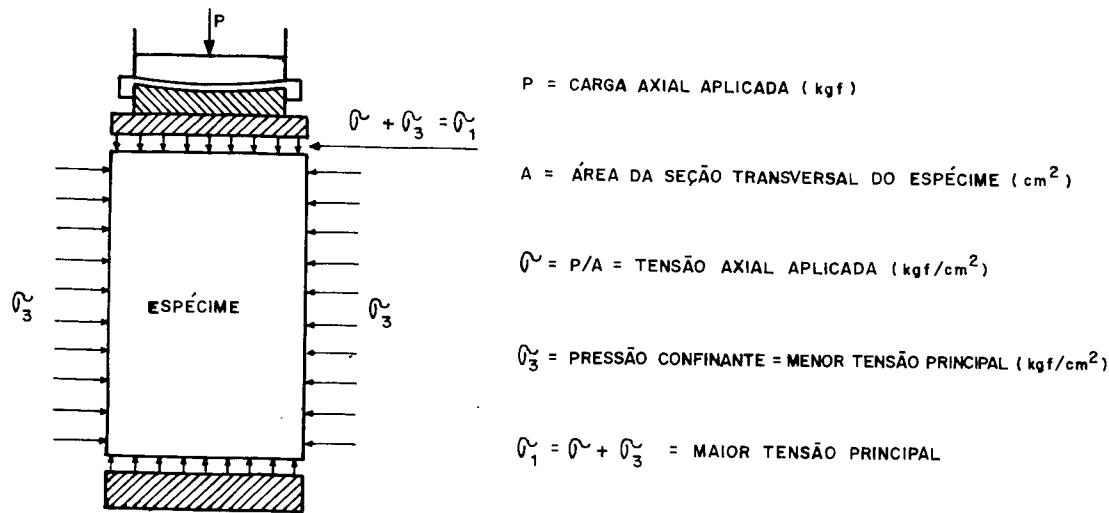


Figura 4 — ESQUEMA DE CARREGAMENTO DE UM CORPO DE PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.

Com as tensões principais ( $\sigma_1$ ) de ruptura para cada tensão confinante ( $\sigma_3$ ), determinou-se graficamente o conjunto de círculos de Mohr, e posteriormente a envoltória, obtendo-se a coesão ( $C$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) do concreto, como mostra a figura 5.

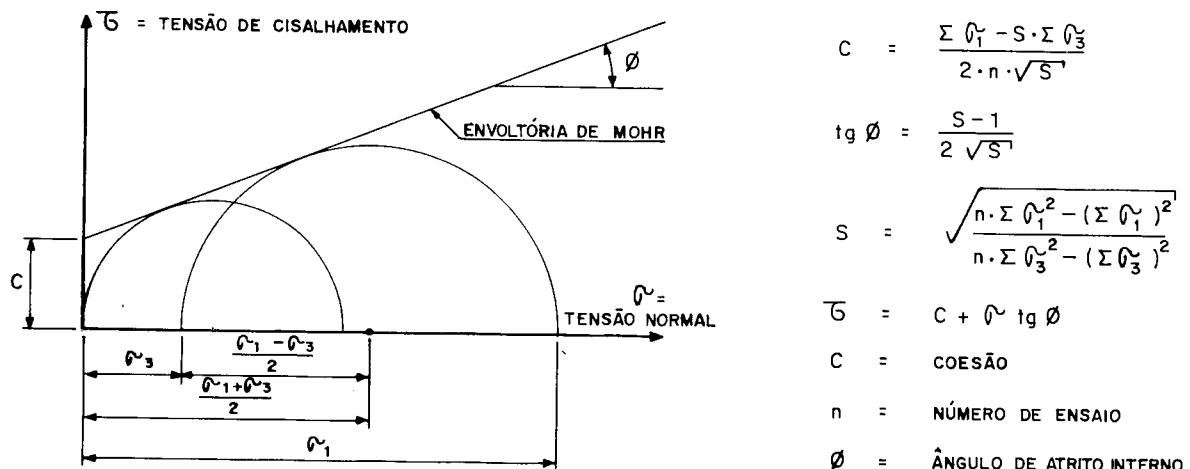


Figura 5 - ENVOLTÓRIA DE MOHR E PARÂMETROS DE CISALHAMENTO

Os ensaios foram executados com corpos de prova  $\phi 15 \times 30$  cm, extraídos a partir de corpos de prova maiores, de  $\phi 25 \times 50$  cm, como evidenciado na figura 6.

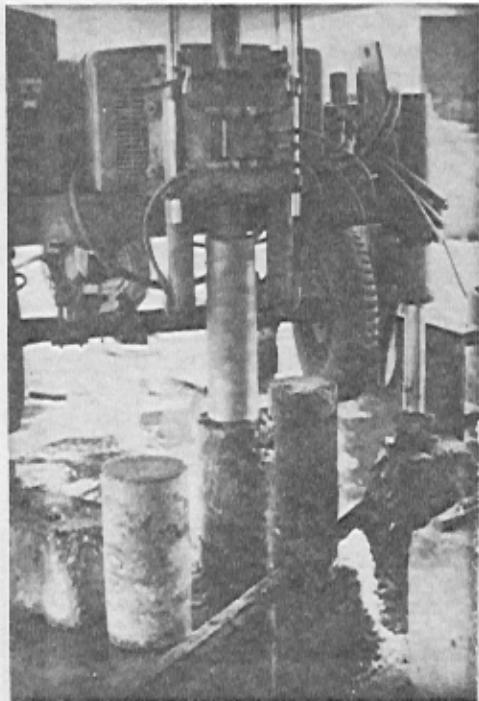


Figura 6.

Obtenção de corpos de prova  $\varnothing$  15 x 30 cm a partir de testemunhos de 25 x 50 cm.

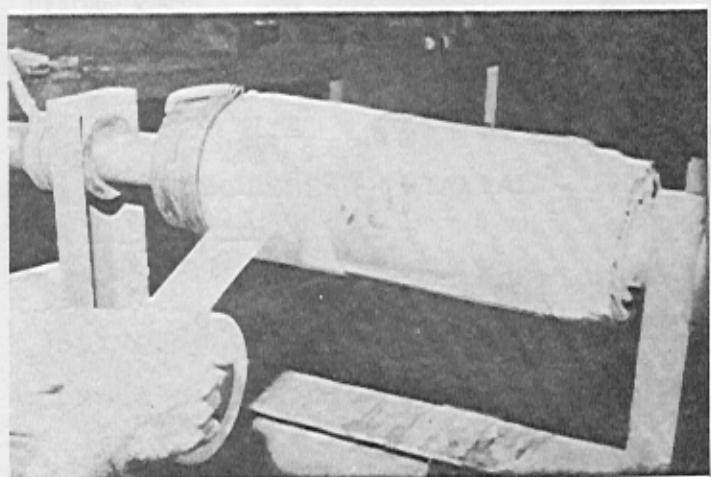


Figura 7.

Execução do revestimento de proteção.

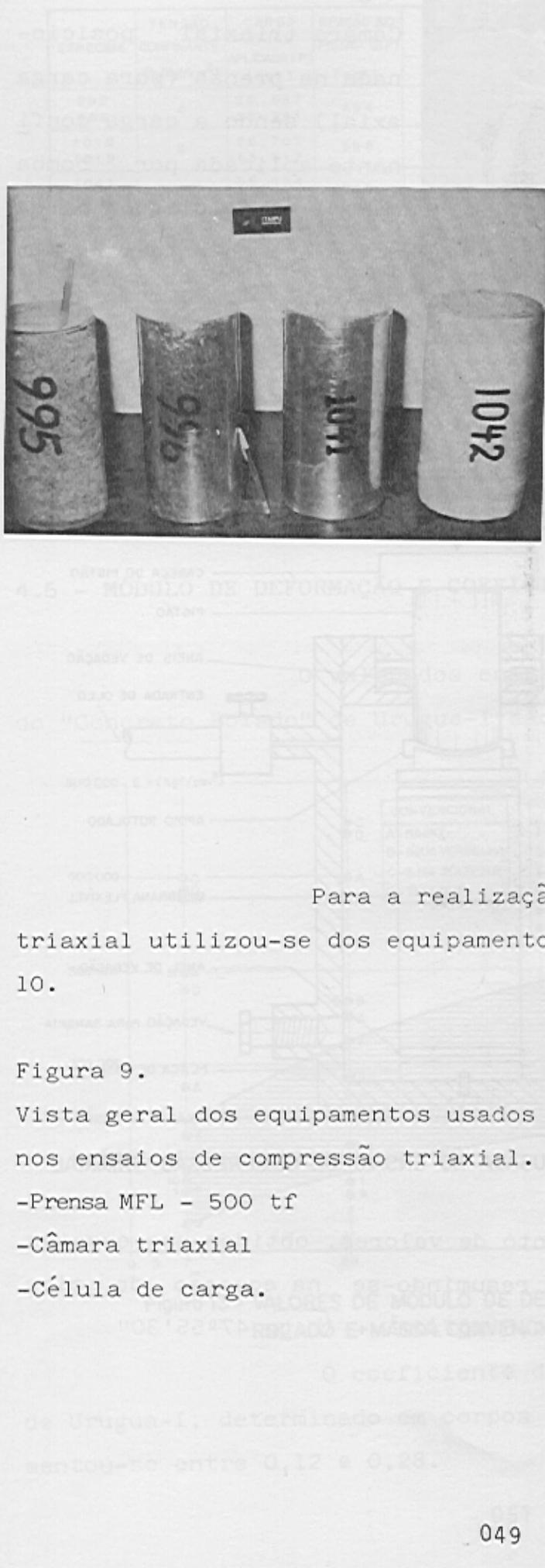


Figura 8.

Sequencia de corpos de prova, evidenciando as etapas do revestimento.

\*Esquerda - corpo de prova sem revestimento com placas de regularização.

\*Centro esquerda - corpo de prova revestido com 10 camadas de plástico (Vita Film), no sentido topo/base

\*Centro direita - corpo de prova revestido com 10 camadas de Vita Film no sentido topo/base e 20 camadas no sentido longitudinal.

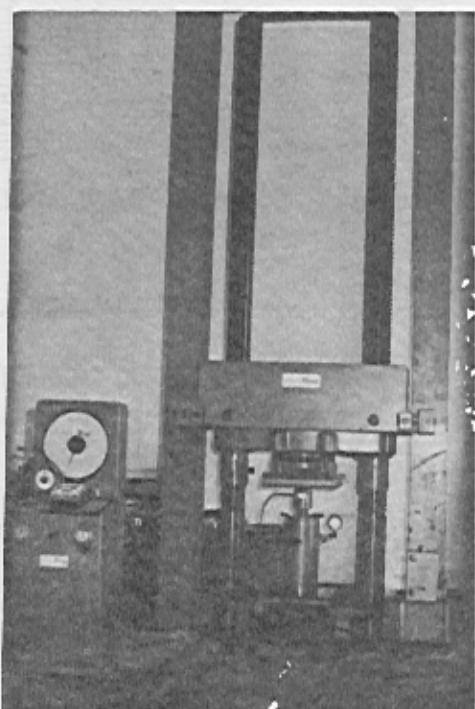
\*Direita - corpo de prova revestido com Vita Film e completado o revestimento externo.

Para a realização do ensaio de compressão triaxial utilizou-se dos equipamentos mostrados nas figuras 9 e 10.

Figura 9.

Vista geral dos equipamentos usados nos ensaios de compressão triaxial.

- Prensa MFL - 500 tf
- Câmera triaxial
- Célula de carga.



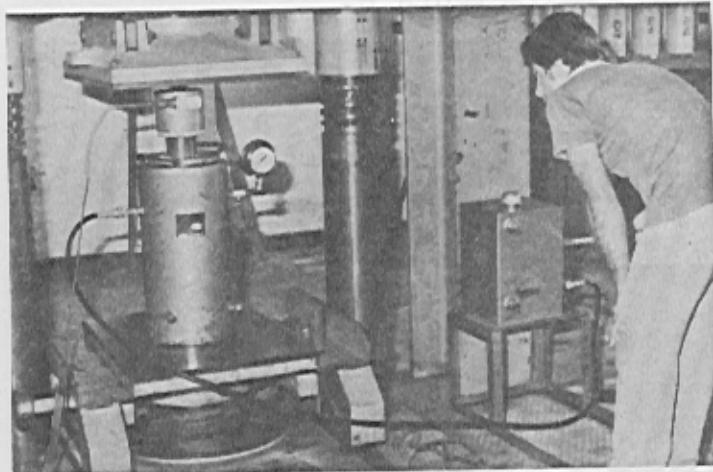


Figura 10.

Câmara triaxial posicionada na prensa (para carga axial) sendo a carga confiante aplicada por bomba manual. A célula de carga entre o topo da câmara e o prato da prensa mede a carga axial.

A câmara triaxial utilizada é mostrada esquematicamente na figura 11.

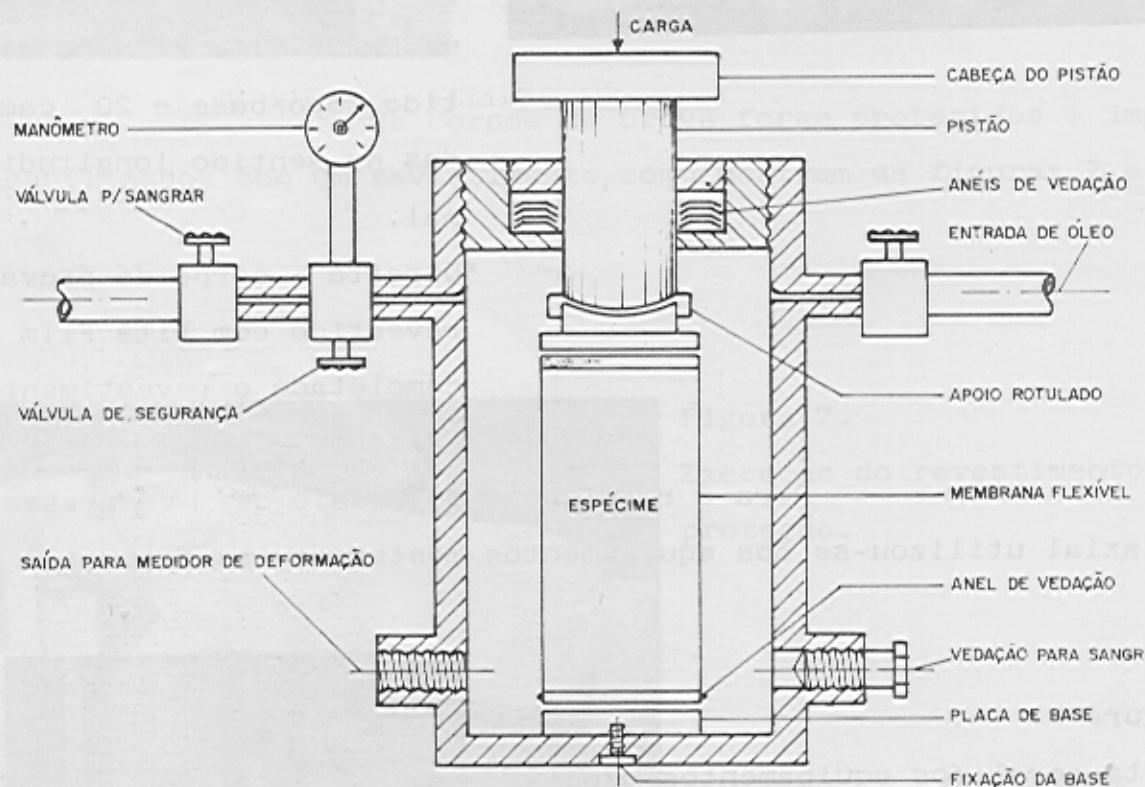


Figura 11 - ESQUEMA DA CÂMARA USADA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

O conjunto de valores, obtidos nos ensaios, é mostrado na figura 12, resumindo-se na equação do tipo  $\sigma = c + \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} \phi$ , sendo  $c = 24,6 \text{ Kgf/cm}^2 + \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} 47^\circ 55' 30''$

ESPÉCIME	TENSÃO CONFINANTE $\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	CARGA AXIAL APLICADA (P) (kgf)	REAÇÃO DO PISTÃO ( $\Delta P$ ) (kgf)	TENSÃO AXIAL ( $\sigma$ ) (kgf/cm <sup>2</sup> )			TENSÃO PRINCIPAL ( $\sigma_1$ ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	PARÂMETROS OBTIDOS
				indiv.	médio	C.V.		
995 996	4	29.937 25.341	284	167,8 141,8	154,8	8,4	158,8	24,6 47°55'30"
1018 1019	8	26.707 33.912	598	147,7 188,5	168,1	12,1	176,1	
1041 1042	12	35.154 37.266	912	193,8 205,7	199,8	3,0	211,8	

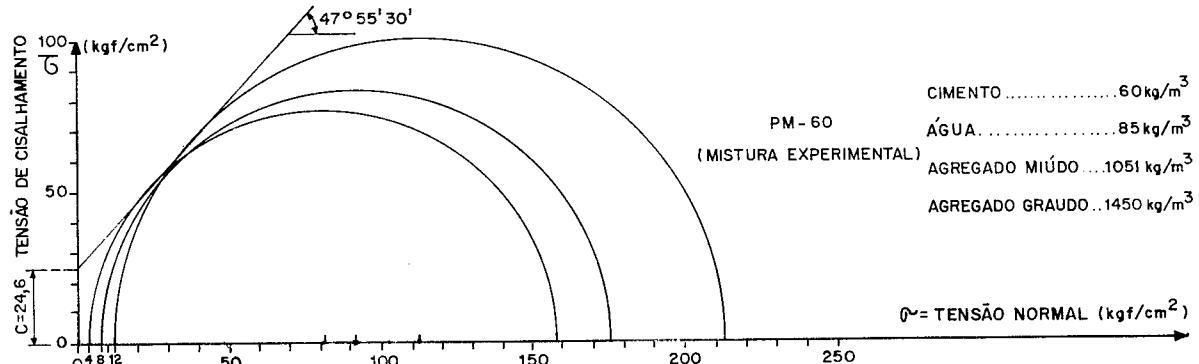


Figura 12 - ENVOLTÓRIA E DADOS DOS ENSAIOS

#### 4.5 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E COEFICIENTE DE POISSON.

O valor dos ensaios de módulo de deformação do "Concreto Rolado" de Urugua-I são mostrados na figura 13.

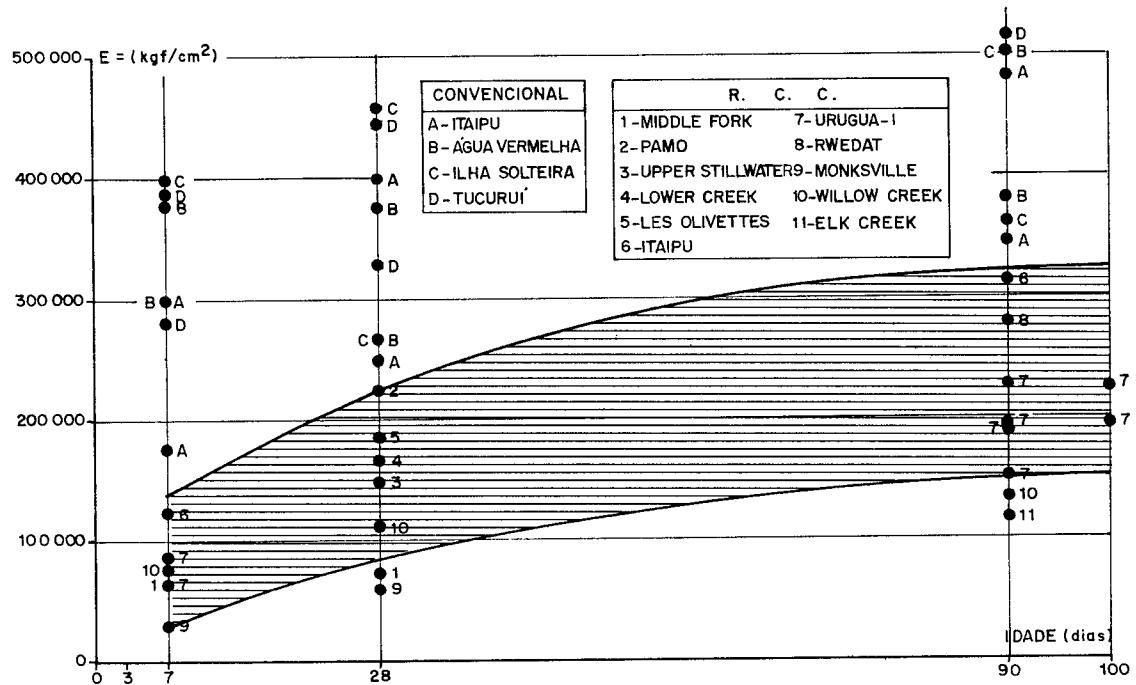


Figura 13 - VALORES DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DE CONCRETO ROLADO E MASSA CONVENCIONAL.

O coeficiente de Poisson do concreto rolado de Urugua-I, determinado em corpos de prova  $\varnothing 15 \times 30$  cm, apresentou-se entre 0,12 e 0,28.

#### 4.6 - FLUÊNCIA - DEFORMAÇÃO LENTA.

O ensaio de fluênciá à compressão consiste basicamente na determinação da deformação decorrente de uma solicitação constante aplicada axialmente, durante um certo período de tempo. A carga constante aplicada normalmente se situa ao redor de 40% da resistência do concreto à compressão axial simples.

O ensaio de fluênciá aplicado sobre corpos de prova de concreto convencional tem um procedimento padronizado e de amplo conhecimento. Nesse ensaio, as deformações ocorridas no concreto convencional são normalmente determinadas através de medidores elétricos embutidos nos corpos de prova, moldados com essa finalidade.

Os corpos de prova de concreto rolado foram obtidos a partir de testemunhos extraídos, não sendo possível contar com extensômetros elétricos embutidos. Restaram então as seguintes opções:

- Medidas obtidas por extensômetros elétricos (Wire Strain Gages) colados à superfície dos corpos de prova, ou,
- Medidas obtidas com extensômetros mecânicos através de bases fixadas ao corpo de prova.

Tendo em vista a longa duração dos ensaios e a precaução quanto a eventuais danos dos Wire Strain gages, optou-se pela utilização de bases de extensômetros mecânicos, como mostram as figuras 14 e 15.

Os corpos de prova foram protegidos contra a perda de umidade por uma membrana de borracha natural (ver figuras 14 e 15).



Figura 14.

Leitura da deformação, através de alongamento Marion, durante o ensaio de fluência.



Figura 15.

Leitura da deformação, através de alongametro tipo Tenso Tast, durante o ensaio de variação autógena.

Para os ensaios, utilizou-se o esquema mostrado nas figuras 16 e 17, em um ambiente climatizado à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ .

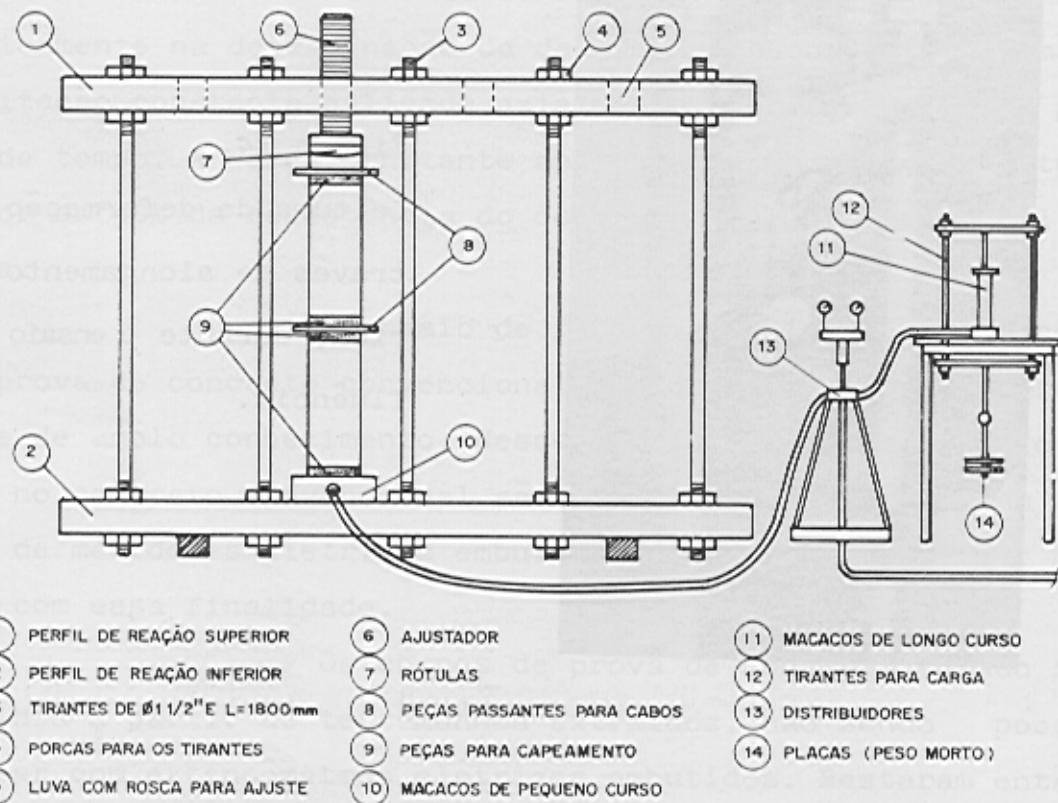


Figura 16 - ESQUEMA DO SISTEMA DE CARREGAMENTO DO ENSAIO DE FLUÊNCIA

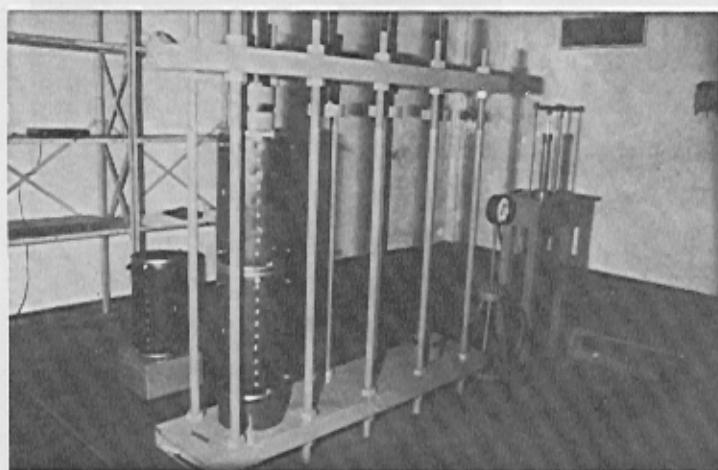


Figura 17

Vista geral do ensaio de fluênci<sup>a</sup>, com corpos de prova de concreto rolado de Urugua-I.

Os corpos de prova foram ensaiados à idade de 90 dias. Tendo em vista o sistema de medições adotado e a exiguidade de valores de fluênci<sup>a</sup> obtidos para concretos do tipo rolado, teve-se o cuidado de analisar o conjunto de valores a través desses dois aspectos.

#### 4.6.1 - VALORES MEDIDOS COMPARATIVAMENTE COM VALORES OBTIDOS COM OUTRO SISTEMA DE MEDIÇÃO.

Os valores de deformação específica, obtidos

no ensaio são mostrados na figura 18, dando por regressão linear uma equação do tipo  $\epsilon = 1/E + f(K) \ln(t+1)$ , com um coeficiente de correlação  $r^2 = 0,895$

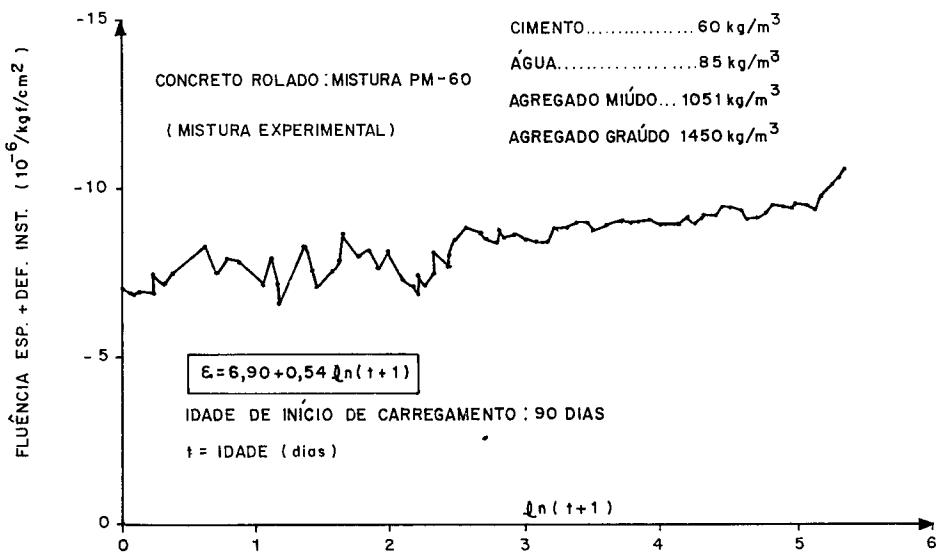


Figura 18 - EVOLUÇÃO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA — CONCRETO ROLADO

É apresentada comparativamente na figura 19 um conjunto de valores de ensaio de fluência de uma mistura de concreto de  $\varnothing$  máx = 76 mm, utilizada na Obra de Itaipu, com um consumo de aglomerante de 145 Kg/m<sup>3</sup> de cimento e 17 Kg/m<sup>3</sup> de cinza volante, cujas deformações foram medidas com extensômetro elétrico embutido (Tipo Carlson).

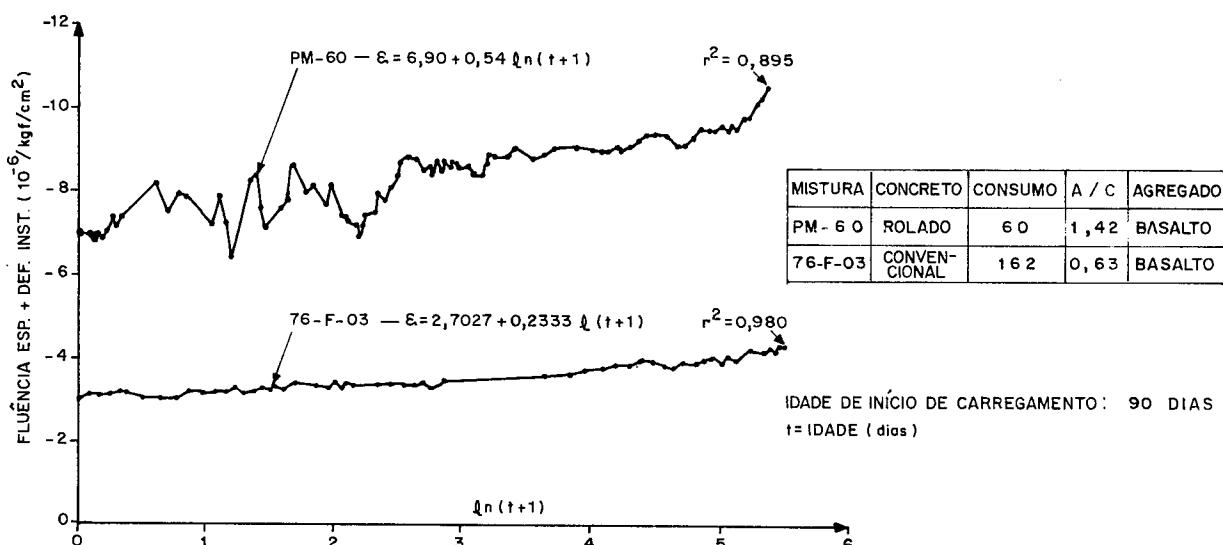


Figura 19 - COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES EFETUADAS, PARA DETERMINAÇÃO DA FLUÊNCIA EM CONCRETOS COM  $\varnothing_{\text{máx}}$  76 mm.

A equação obtida para a mistura de concreto convencional (76-F-03) apresentou-se com o  $E = 2,70 + 0,23 \ln(t+1)$ , com um coeficiente de correlação  $r^2 = 0,980$ .

Nota-se pelas informações da figura 19, e pelos coeficientes de correlação, uma maior dispersão para as medidas nos corpos de prova de concreto rolado, até à idade de aproximadamente 20 dias. Essa dispersão diminuiu, com o aumento da idade, obtendo-se leituras mais consistentes.

#### 4.6.2 - VALOR OBTIDO E O CONJUNTO DE VALORES DE FLUÊNCIA DE MAIS CONCRETOS.

A figura 20 mostra um conjunto de curvas de parâmetros  $1/E$  e  $f(K)$ , para concretos convencionais com vários teores de aglomerante (de  $107 \text{ Kg/m}^3$  a  $194 \text{ Kg/m}^3$ ), e de duas outras referências (Upper Stillwater e Willow Creek) com concreto rolado.

#### 4.7 - DEFORMAÇÕES AUTÓGENAS

As variações de volume consideradas como autógenas são aquelas resultantes de hidratação de elementos menores existentes no próprio cimento - basicamente o óxido de magnésio ( $MgO$ ) na forma de periclásio e a cal livre ( $CaO$ ).

Os ensaios para verificação das variações autógenas foram feitos com a tomada de medidas das variações de comprimento de corpos de prova, protegidos como citado para o ensaio de fluência, e mostrado na figura 15. Os corpos de prova foram mantidos em sala climatizada e sem carga.

Os valores obtidos são mostrados na figura 21, onde se observa uma pequena tendência de retração (ao redor de  $10^{-6}\%$ ) no concreto rolado de Urugua-I. Isso decorre dos baixos teores de cal livre e magnésio, existentes no cimento usado, além do baixo teor de cimento do concreto rolado ( $60 \text{ Kg/m}^3$ ).

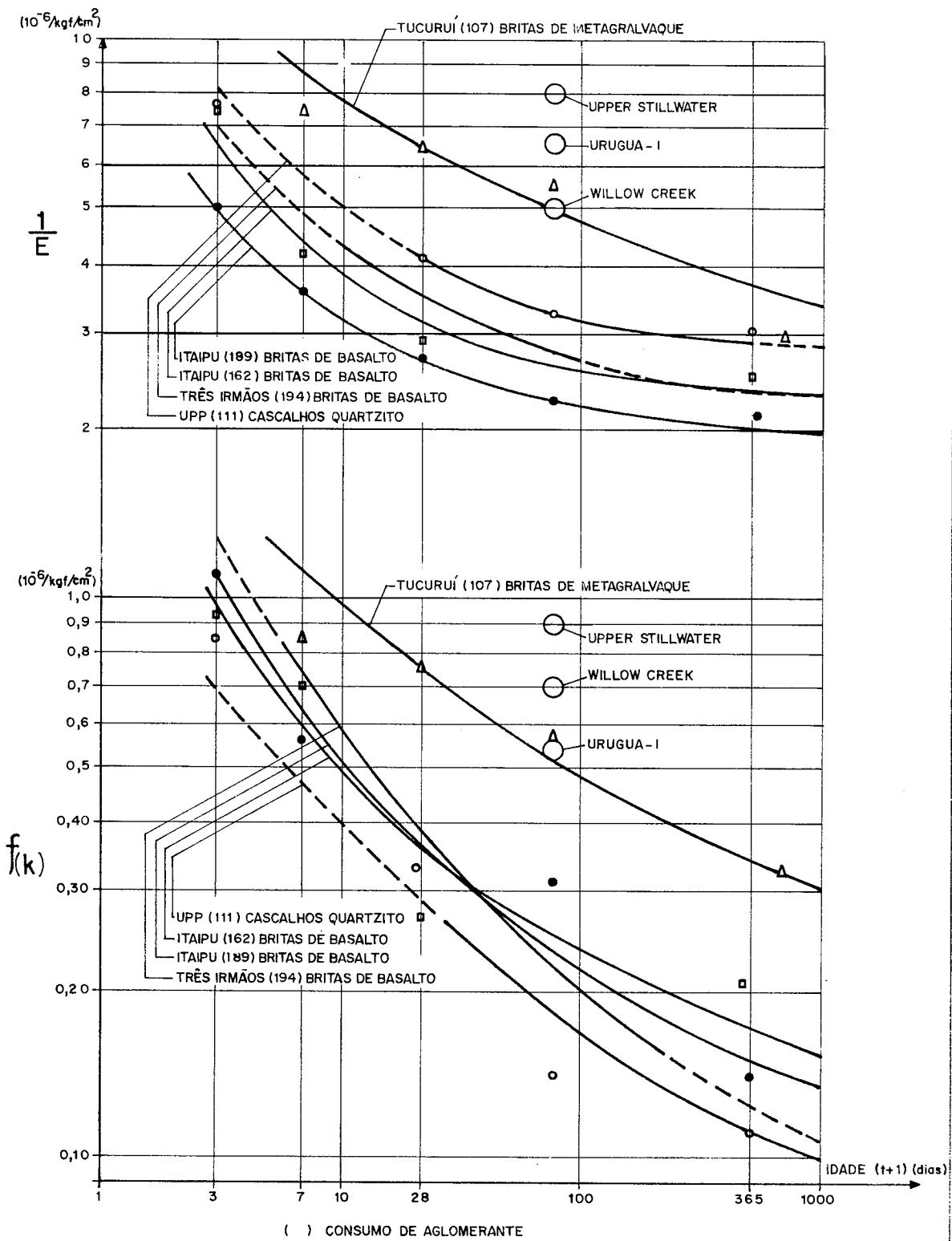
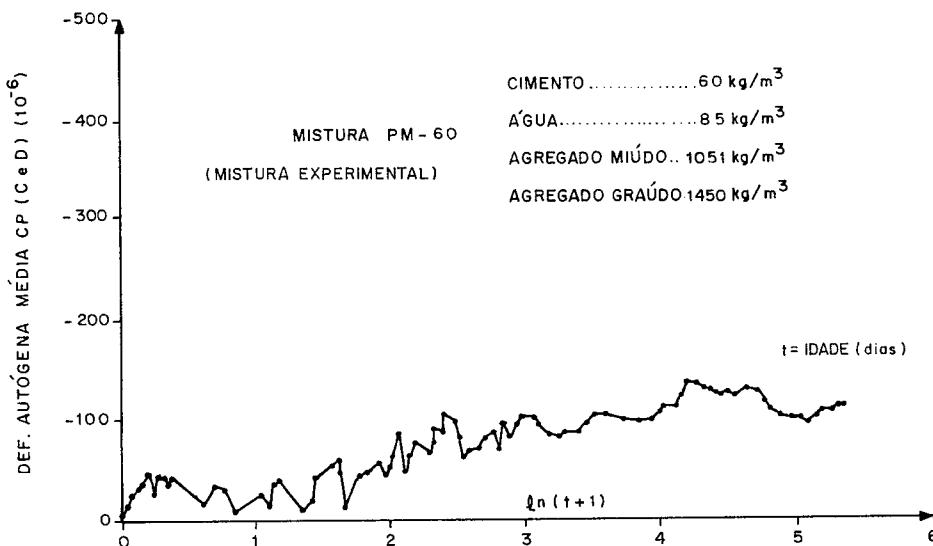


Figura 20 - DADOS DE PARÂMETROS DE FLUÊNCIA DE DIVERSOS CONCRETOS (CONVENCIONAIS E ROLADOS) COM AGREGADOS DE  $\varnothing_{\text{máx.}} 76 \text{ mm.}$



**Figura 21-DEFORMAÇÃO AUTÓGENA DO CONCRETO ROLADO – URUGUA -I**

#### 4.8 – CAPACIDADE DE ALONGAMENTO.

A capacidade de alongamento do concreto é conceituada como sendo a máxima deformação que o mesmo apresenta antes de romper, quando submetido a um esforço de tração aplicado por incrementos de cargas crescentes até a ruptura, a uma velocidade estabelecida.

A capacidade de deformação do concreto convencional tem sido determinada (6) através de ensaios de tração por flexão de vigas. As deformações de tração são medidas por extensômetros elétricos embutidos e/ou por medidores elétricos tipo "Wire Strain Gage", colados à superfície de tração.

Da mesma forma que o citado para os ensaios de fluência no Concreto Rolado, as dificuldades de embutir o medidor de deformação, no corpo de prova, reduz a opção para a medição através de extensômetros elétricos de resistência (Tipo Wire Strain Gage).

A determinação da capacidade de alongamento do Concreto Rolado de Urugua-I foi feita sobre corpos de prova extraídos do aterro experimental, de mistura com consumo de 60 Kg/m<sup>3</sup> de cimento.

Os corpos de prova tinham a forma prismática, com dimensões 20x20x40 cm, e foram ensaiados à idade de 28 dias.

Nos topes dos corpos de prova foram coladas chapas metálicas para aplicação do carregamento.

tidas nos

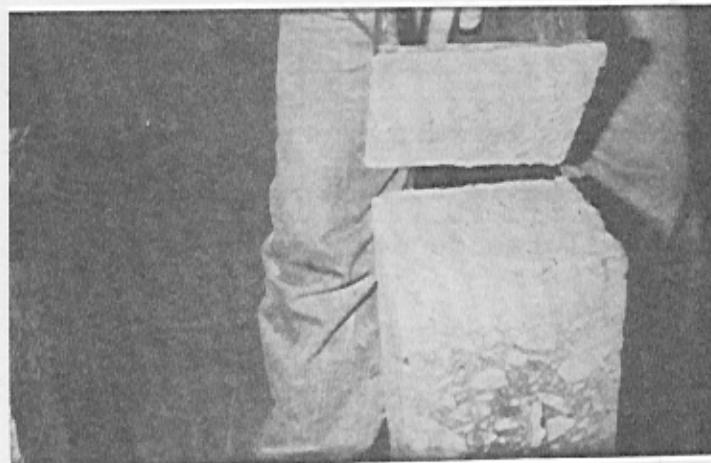


Figura 22.

Colagem de chapas metálicas no topo do corpo de prova.

Para determinação das deformações de tração foram colados "Wire Strain Gages" em duas faces diametralmente opostas, sendo que a leitura foi efetuada por uma ponte Peekel, modelo B-105, com sensibilidade de  $1\mu$  strain.

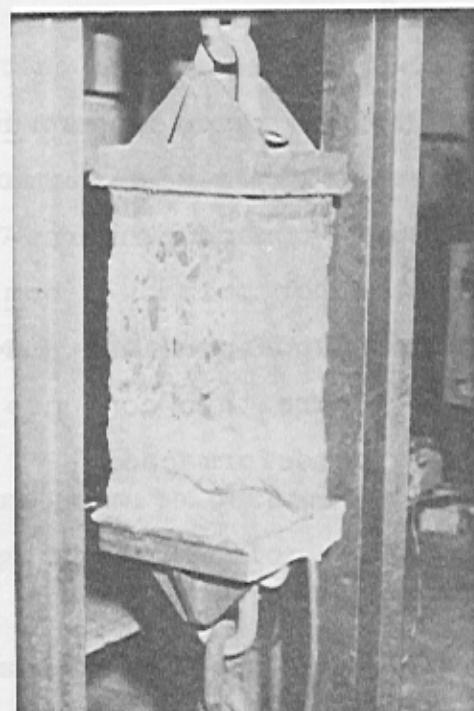


Figura 23.

Corpo de prova de Concreto Rolado preparado para o ensaio de tração. Nota-se a proteção com um filme plástico e o extensômetro elétrico colado.

Para tanto o corpo de prova moldado e colocado em calorímetro adiabático composto por duas câmaras (exterior

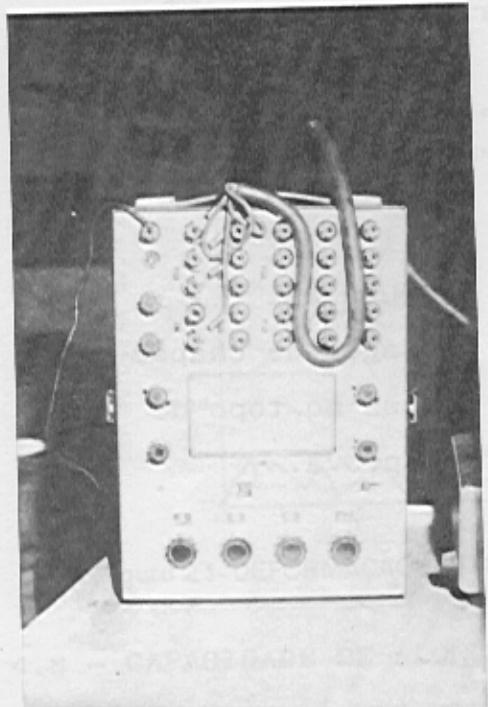


Figura 24.

Ponte de leitura Peekel, com sensibilidade de  $1\mu$  strain, utilizada para as leituras de deformação.

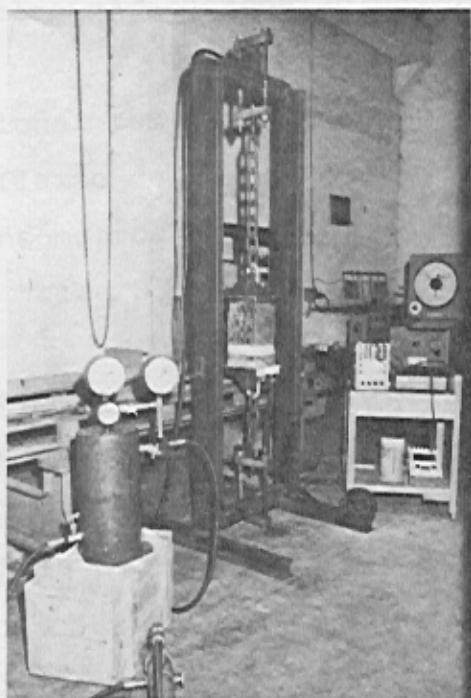


Figura 25.

Corpo de prova montado na estrutura de reação vendo-se, acima (da estrutura), o macaco hidráulico acionado por pulmão - bomba e manômetros de precisão (à esquerda). À direita, o conjunto de leituras de deformação.

Adotou-se velocidade de carregamento de 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>/s (que é considerada rápida).

As curvas - tensão de tração x alongamento obtidas nos ensaios, é vista na figura 26.

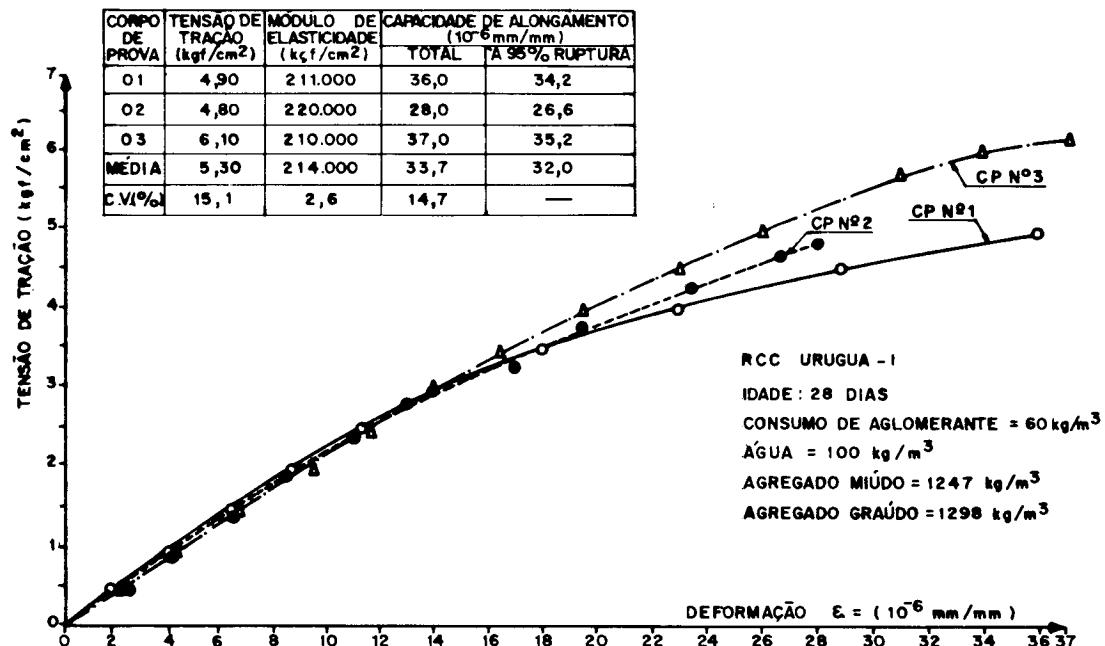


Figura 26-CURVAS TENSÃO DE TRAÇÃO x ALONGAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ROLADO — URUGUA - I

Observa-se, pelo conjunto de curvas da figura 26, uma satisfatória reprodutibilidade dos valores.

Para efeito de comparação, o valor médio obtido para a capacidade de alongamento ( $\epsilon = 32 \mu$  strain a 95 % de tração) é posicionado na figura 27 juntamente com valores de capacidade de alongamento de concretos convencionais, com Ø máx 76 mm, representativos de varias obras brasileiras.

#### 4.9 - ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA

O ensaio de elevação adiabática de temperatura permite determinar a evolução de temperatura decorrente da geração de calor devido à hidratação do cimento.

O ensaio é feito em um sistema adiabático, sem que ocorra, em termos práticos, troca de calor com o exterior.

Para tanto o corpo de prova moldado é colocado em calorímetro adiabático, composto por duas câmaras (externa

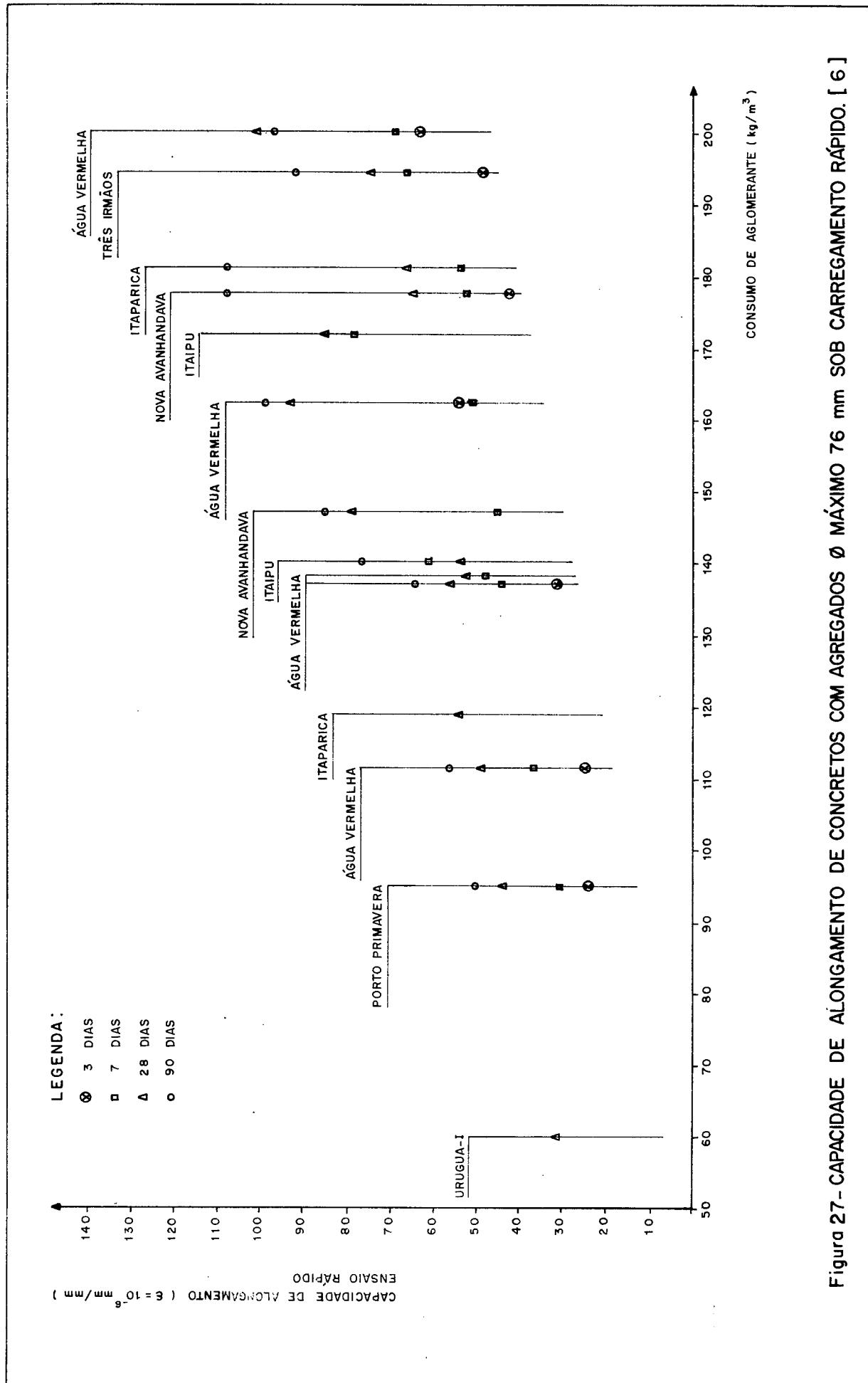


Figura 27 - CAPACIDADE DE ALONGAMENTO DE CONCRETOS COM AGREGADOS Ø MÁXIMO 76 mm SOB CARREGAMENTO RÁPIDO. [ 6 ]

$3,7 \times 2,9 \times 2,95$  m e interna -  $1,7 \times 1,7 \times 1,9$  m) dentro de uma sala climatizada. A câmara interna é mantida à mesma temperatura (em evolução) do corpo de prova.

A sequência, desde a moldagem do Concreto Rolado até a execução do ensaio, é vista nas figuras 28 a 34.



Figura 28.

Compactação de corpo de prova de Concreto Rolado, no molde para ensaio de elevação adiabática. Ve-se, no topo do corpo de prova, o gabarito dos termômetros. Dimensão do corpo de prova  $\varnothing 70 \times 70$ .



Figura 29

Retirada do gabarito de instalação dos termômetros.



Figura 30.

Içamento do molde para colocação no isolamento do calorímetro.



Figura 31  
Isolamento completado

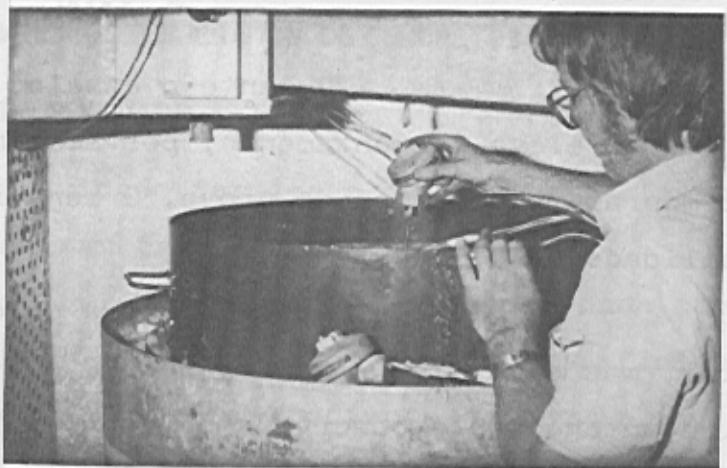


Figura 32  
Instalação dos termômetros no corpo de prova.



Figura 33  
Vista geral do calorímetro adiabático do Laboratório de Itaipu.

que o material apresenta as variações de temperatura.

Os ensaios de difusividade foram efetuados so-



Figura 34

Painel de controle e registro de temperatura, notando-se:

- Caixa de varredura
- Multímetro digital para leitura individual
- Registrador contínuo
- Controlador de temperaturas
- Ponte de equilíbrio diferencial.

Durante o ensaio, a temperatura da câmara interna eleva-se juntamente, por sistema de aquecimento, com a temperatura do corpo de prova. O sensoramento é feito com sensibilidade de  $0,01^{\circ}\text{C}$ .

A temperatura da câmara externa também evolui, mas é mantida ao redor de  $2^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$  abaixo da temperatura instantâneamente observada no corpo de prova e na câmara interna. Isso tem a finalidade de absorver o calor gerado pelos motores e atritos de eixos, colocados externamente.

As leituras de temperatura foram feitas a intervalos de 15 minutos (nas 24 horas iniciais) e de 30 minutos no restante do ensaio.

As curvas obtidas são mostradas na figura

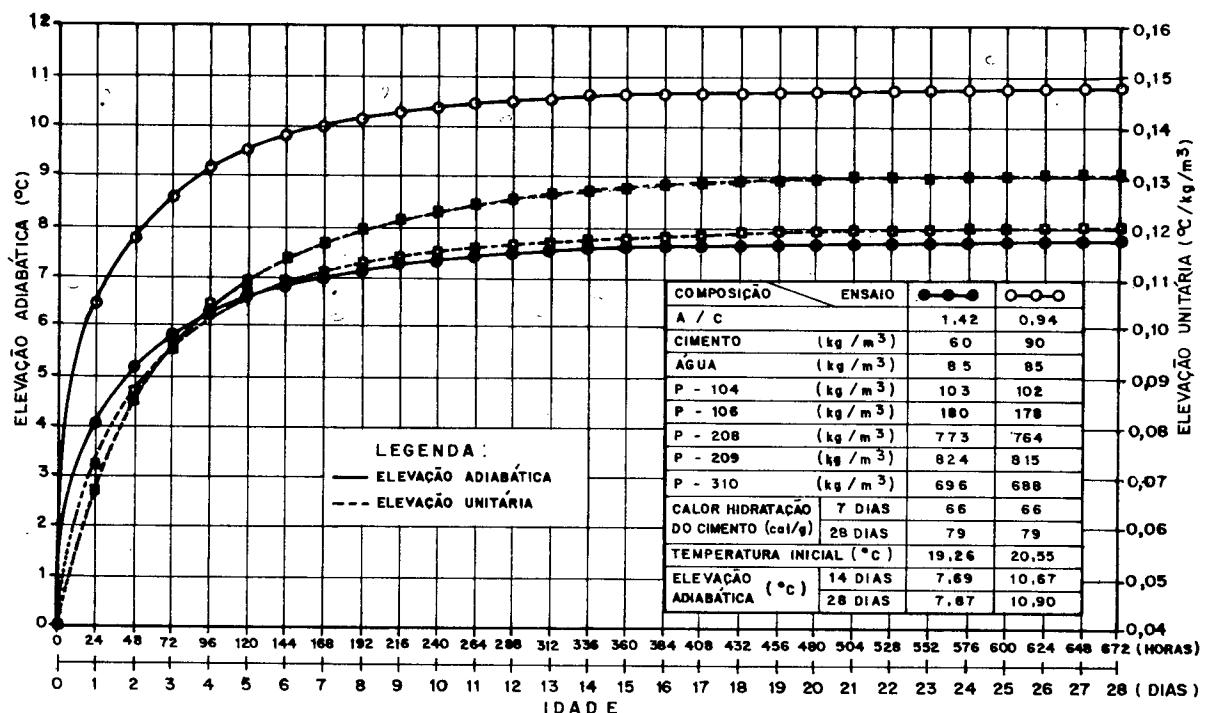


Figura 35-CURVAS DE ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA DE CONCRETOS ROLADOS

#### 4.10 – DIFUSIVIDADE E CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica é a relativa capacidade de um material em deixar trocar calor.

A condutividade térmica é a propriedade que mede a habilidade do material conduzir calor, sendo definida como a razão de fluxo de calor para um gradiente de temperatura. A condutividade foi obtida através da equação  $K=h^2 \cdot \gamma \cdot C$ , sendo:

$$h^2 = \text{Difusividade térmica (cm}^2/\text{s})$$

$$\gamma = \text{Peso específico (g/cm}^3)$$

$$C = \text{Calor específico (cal/g.}^{\circ}\text{C)}$$

A medida da difusividade térmica do concreto consiste basicamente em determinar a queda da temperatura de um corpo de prova, em função do intervalo de tempo decorrido.

A difusividade representa a velocidade em que ocorrem variações de temperatura no interior de uma massa. É, portanto, um índice que mostra a maior ou menor facilidade com que o material apresenta as variações de temperatura.

Os ensaios de difusividade foram efetuados so

bre corpos de prova extraídos a partir dos espécimes moldados para o ensaio de elevação adiabática (item 4.9). As figuras de 36 a 39 mostram a sequência desde a preparação dos corpos de prova até o ensaio.



Figura 36

Extração de corpos de prova para ensaios de difusividade e calor específico, a partir do corpo de prova de concreto rolado moldado para o ensaio de elevação adiabática.



Figura 37

Execução de furo para permitir medir o diferencial de temperatura.

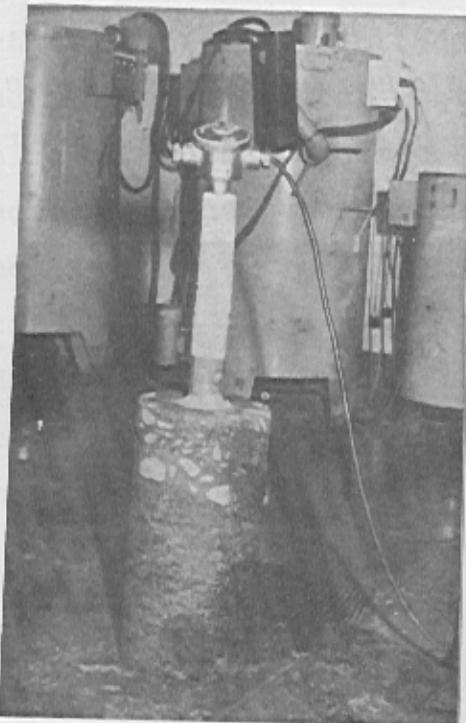


Figura 38

Corpo de prova de concreto rolado, ( $\varnothing 20 \times 40$  cm) com o tubo de cobre no furo central para receber o termômetro.

Figura 39

Corpo de prova já preparado, com o termômetro. Ao fundo são visíveis os tanques (à direita) para aquecimento (tanque maior) e resfriamento (menor), utilizados nos ensaios.



Para a leitura de temperatura é utilizado um multímetro digital com precisão de 0,1%, acoplado à uma caixa seletora, que interconecta os termômetros com sensores de platina e sensibilidade de 0,01 °C. Os valores obtidos para as duas misturas de concreto rolado são mostrados na figura 40, onde se incluem valores de condutividade e difusividade de concretos massa convencionais, utilizados na obra de Itaipu, a título de

comparação.

MISTURA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO CIMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	AGREGADO	CONDUTIVIDADE TÉRMICA		DIFUSIVIDADE TÉRMICA	
				$10^3$ [cal/cm.s.ºC]	CV (%)	$10^3$ (cm <sup>2</sup> /s)	CV (%)
PM-60	ROLADO	60	BASALTO	4,76	-	7,69	9,3
PM-90	ROLADO	90	BASALTO	4,22	-	6,96	8,8
76-H-04	MASSA	140	BASALTO	4,41	1,2	7,13	1,8
76-F-03	MASSA	162	BASALTO	4,60	0,4	7,27	1,4

Figura 40 - VALORES DE CONDUTIVIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE CONCRETOS ROLADO E CONVENCIONAL [ 2 e 10 ]

#### 4.11 - CALOR ESPECÍFICO

Calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar de um grau a temperatura da massa unitária do material.

A determinação do calor específico do concreto é feita medindo-se a elevação de temperatura de um corpo de prova de massa conhecida, e termicamente isolado do ambiente, ao qual se fornece uma determinada quantidade de calor.

A preparação do corpo de prova é vista nas figuras 36 e 41.

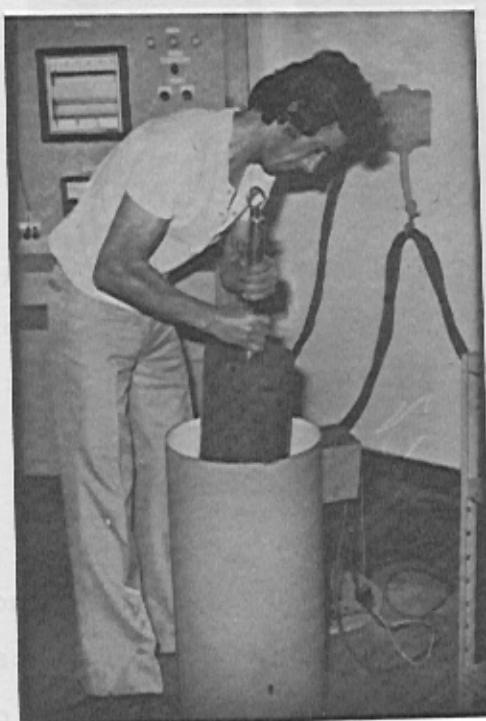


Figura 41.

Colocação de corpo de prova de concreto rolado no calorímetro, com auxílio de haste metálica própria.

Para o ensaio se utiliza do equipamento mostrado na figura 42.

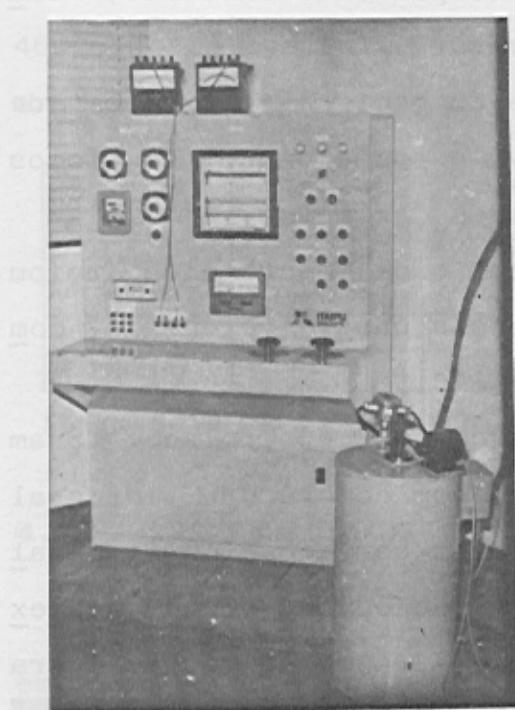


Figura 42

Calorímetro e painel de controle e medição para ensaio de calor específico. O equipamento possui:

- Relógios temporizadores
- Wattímetro
- Termômetros

O corpo de prova de concreto é introduzido no calorímetro (ver figura 41), sendo que um aquecedor centralizado no furo do espécime fornece calor ao centro do corpo de prova. O sistema é mantido em situação homogênea e uniforme. Mede-se a temperatura, a energia fornecida e o tempo, obtendo-se o calor específico, para a massa conhecida.

Os valores obtidos para os concretos rolados são mostrados na figura 43, onde se observa, também, valores de calor específico de concretos massa convencionais de Itaipu, para efeitos comparativos.

MISTURA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO (kg/m <sup>3</sup> )	TIPO DE AGREGADO	CALOR ESPECÍFICO	
				(cal/g°C)	C.V. (%)
PM-60	ROLADO	60	BASALTO	0,238	1,4
PM-90	ROLADO	90	BASALTO	0,233	1,6
76-H-04	MASSA	140	BASALTO	0,243	1,7
76-F-03	MASSA	162	BASALTO	0,252	2,0

Figura 43 - VALORES DE CALOR ESPECÍFICO DE CONCRETOS ROLADO E CONVENCIONAL [ 2 e 10 ]

#### 4.12 - COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA

O coeficiente linear de expansão térmica é

definido como sendo a variação de um comprimento unitário, causada pela variação unitária de temperatura.

O ensaio consiste em medir a variação de comprimento, sendo que o corpo de prova é posicionado, em ciclos alternados, em ambientes de temperaturas distintas.

No caso, o Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional possui duas câmaras especiais para esse ensaio, com temperaturas de  $4^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $38^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Os corpos de prova de concreto rolado foram moldados nas dimensões de  $\varnothing 25 \times 50$  cm, com concreto integral (sem peneiramento). Após a moldagem foram cortados longitudinalmente, para uniformizar a superfície a receber a colagem dos extensômetros elétricos (Wire Strain Gages), como se vê na figura 44.

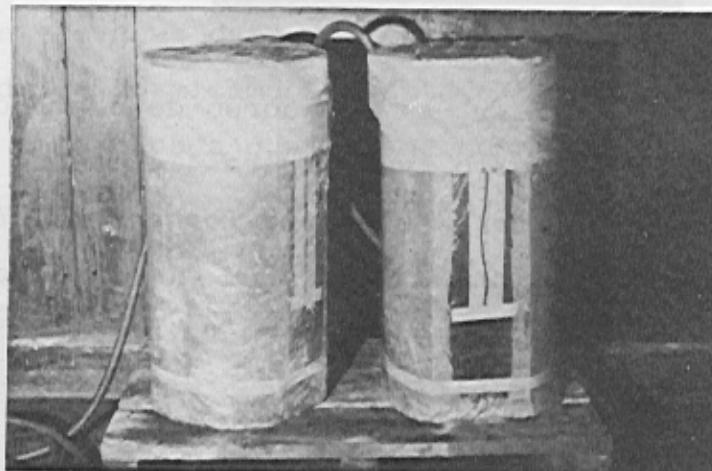


Figura 44.

Corpos de prova de concreto rolado preparados para ensaio de expansão térmica.

Para o ensaio foram utilizadas as duas câmaras térmicas ( $38^{\circ}\text{C}$  e  $4^{\circ}\text{C}$ ) e o instrumental visto na figura 45



Figura 45.

Instrumental usado nos ensaios:

- Caixa seletora (esquerda)
- Indicador de deformação estática para leituras das deformações (direita)
- Ponte termométrica (abaixo) para leitura das temperaturas

Os valores obtidos são mostrados na figura 46, comparativamente, também, com valores de ensaios sobre concretos massa convencionais usados em Itaipu.

MISTURA	TIPO DE CONCRETO	CONSUMO (kg/m <sup>3</sup> )	TIPO DE AGREGADO	COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA (10 <sup>-6</sup> /°C)	OBSERVAÇÕES
PM-60	ROLADO	60	BASALTO	7,41	CONCRETO SATURADO
PM-90	ROLADO	90	BASALTO	8,33	"
76-D-04	MASSA	189	BASALTO	8,00	"
76-F-03	MASSA	162	BASALTO	7,71	"

**Figura 46 - VALORES DE COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR DE CONCRETOS ROLADO E CONVENCIONAL [2e11]**

#### 4.13 – PERMEABILIDADE

A determinação da permeabilidade consiste em se avaliar a passagem de um fluxo de água pelo material, com dimensões e condições conhecidas.

Pelo conceituado na lei de Darcy, determina-se o coeficiente de permeabilidade  $K_c$  do concreto, através de

$$K_c = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H} ,$$

Sendo:

$K_c$  = Coeficiente de permeabilidade do concreto (cm/s)

Q= Vazão (cm<sup>3</sup>/s)

L= Comprimento do corpo de prova (cm)

H= Altura da coluna d'água (cm)

A= Área da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

Os ensaios foram executados sobre corpos de prova extraídos, com dimensões Ø 25x25 cm, preparados como evidenciam as figuras 47 e 48.



Figura 47

Corpos de prova de  $\varnothing$  25 x 25 cm, de concreto rolado, preparados na superfície lateral, com argamassa epoxídica.

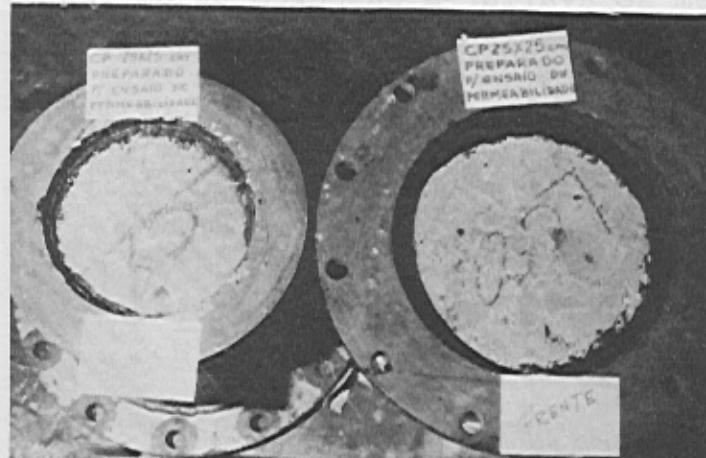


Figura 48.

Instalação do corpo de prova na campânula de ensaio.

Para a execução do ensaio é utilizado um equipamento próprio, mostrado na figura 49 e esquematizado na figura 50.

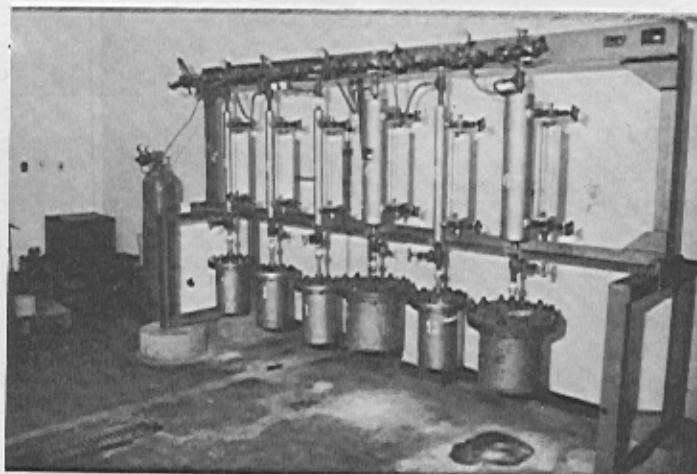


Figura 49

Equipamento usado no ensaio de permeabilidade.

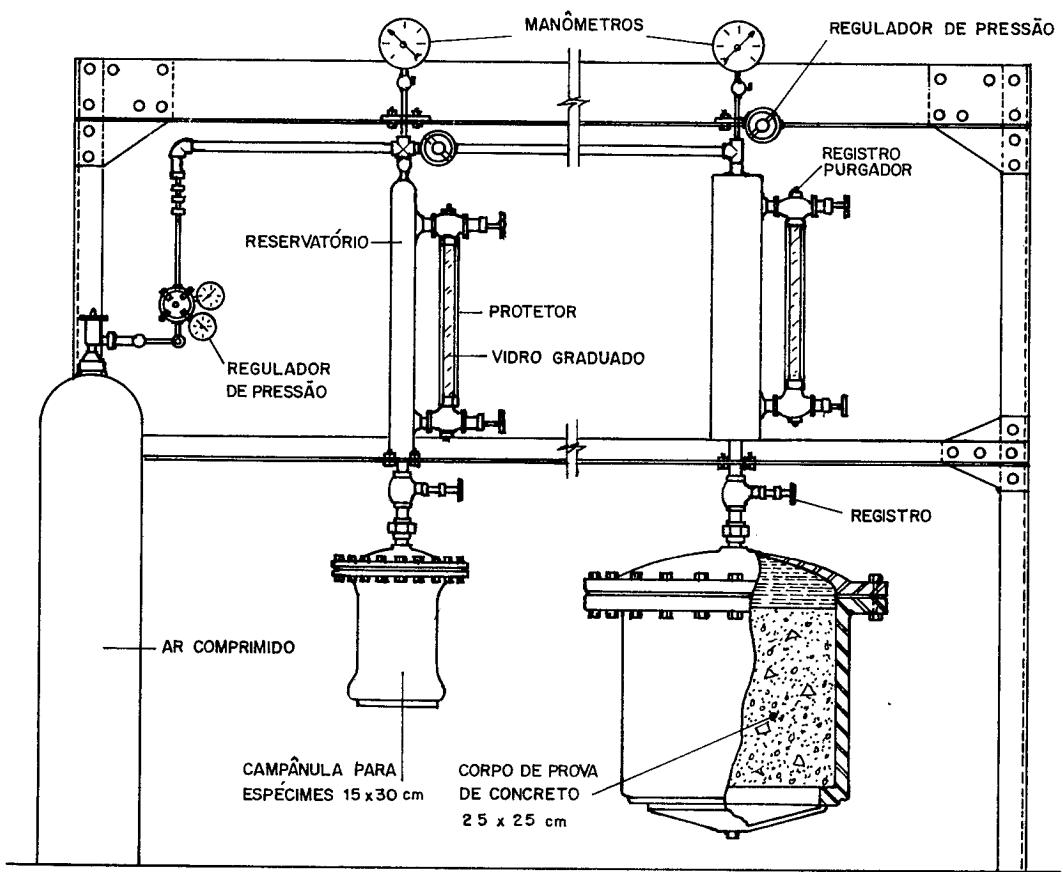
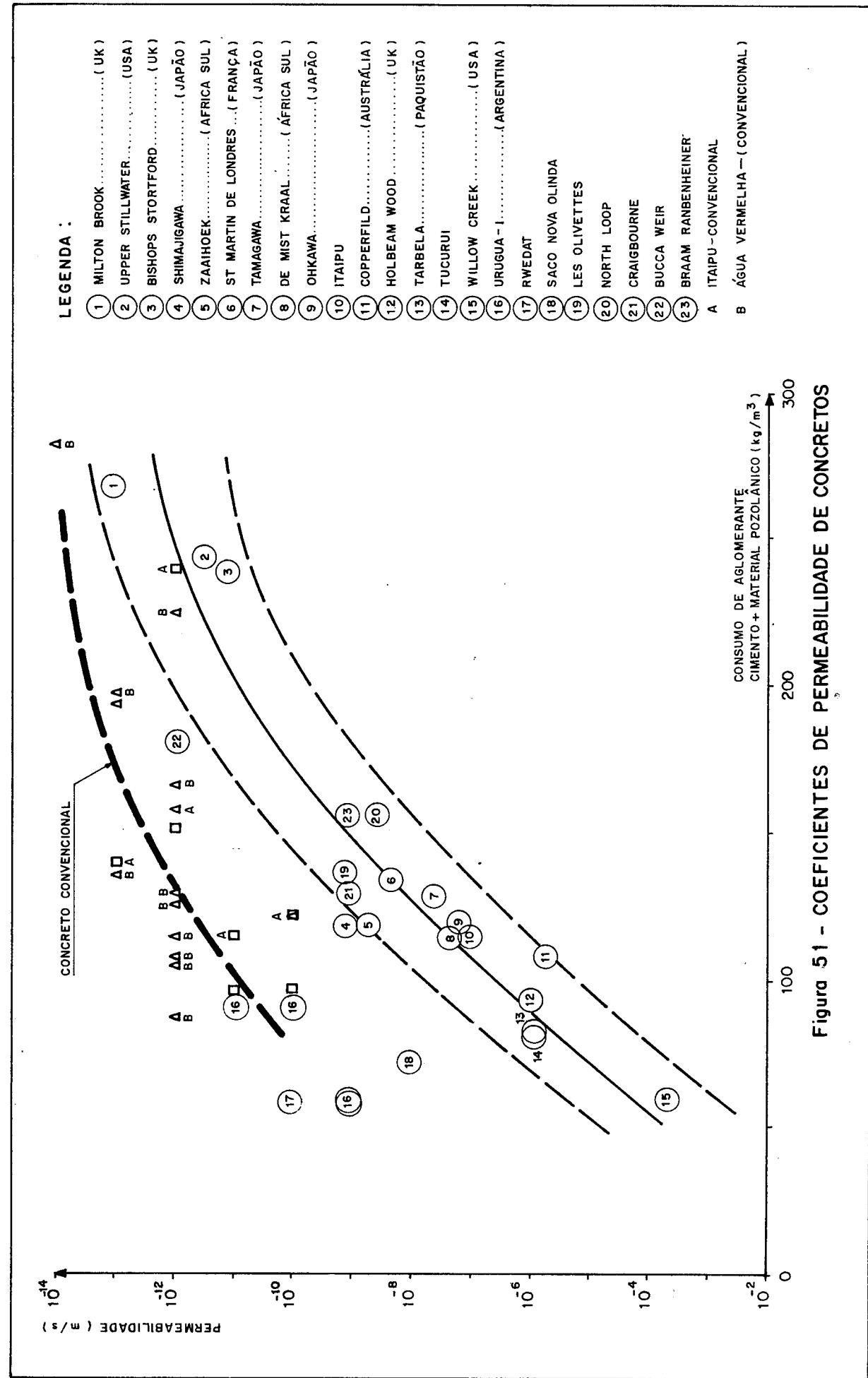


Figura 50 - ESQUEMA DO SISTEMA PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Durante o ensaio a temperatura do ambiente é mantida à  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Os valores obtidos nos ensaios são mostrados na figura 51, em conjunto com outros valores de permeabilidade de concretos rolados e de concretos convencionais.



**Figura 51 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DE CONCRETOS**

## 5. COMENTÁRIOS

Esse trabalho tem o propósito de fornecer à comunidade técnica uma série de informações sobre ensaios de Concreto Rolado, de baixo consumo de cimento, destinado à Obra de Urugua-I na Argentina.

É importante, entretanto, registrar alguns comentários, como se seguem:

### 5.1 - MASSA ESPECÍFICA

A massa específica obtida ( $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$ ) nos ensaios do aterro experimental nº 1, difere da observada durante a execução da obra ( $\gamma = 2,64 \text{ t/m}^3$ ), isto é devido ao fato de que o material empregado na execução do referido aterro foi extraído de uma pedreira comercial nas proximidades da Obra, com um sistema de britagem totalmente diferente ao utilizado na fase de execução da obra, influindo negativamente na qualidade dos agregados (forma e baixo percentual de fino passante na peneira 200). A central de concreto utilizada era para produção de concreto convencional, a qual produziu elevada segregação do agregado graúdo, e mais o equipamento de compactação não respondia às especificações técnicas. Todos esses fatores contribuíram para obter um produto final de qualidade média em se comparando com o produto final obtido durante a fase de execução da obra.

### 5.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas-resistência à compressão axial, compressão diametral, coesão e cisalhamento - mostram parâmetros de magnitude semelhante àqueles já publicados, para outras obras e estudos de concreto rolado.

### 5.3 - PROPRIEDADES ELÁSTICAS

#### 5.3.1 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

O módulo de (elasticidade) deformação do concreto rolado tem se apresentado pouco inferior ao dos concretos convencionais.

### 5.3.2 - FLUÊNCIA

Como evidenciado nas figuras 19 e 20, o concreto rolado apresenta parâmetros de fluência ( $l/E$  e  $f(k)$ ) mais elevados que os dos concretos convencionais. Isso se comprehende pelo baixo valor do módulo de deformação e pelo baixo teor de argamassa.

### 5.3.3 - CAPACIDADE DE ALONGAMENTO

A capacidade de alongamento sob carregamento rápido para concreto rolado de baixo consumo mostrou valores consistentes e similares aos dos concretos convencionais, como evidenciado na figura 27.

Tendo em vista os parâmetros de fluência, os dos ensaios rápidos, e considerando o exposto por Houghton, Carlson e Polivka (7) (8) (9), é de se prever que a capacidade de alongamento sob ensaio lento seja superior aos equivalentes (mesmo consumo de aglomerante) de concreto massa convencionais.

Isso constitui reserva adicional quanto a resistência e absorção das solicitações térmicas.

## 5.4 - PROPRIEDADES TÉRMICAS

### 5.4.1 - ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA

Os valores de elevação adiabática de temperatura estão coerentes com o consumo de aglomerante (e tipo) a dotado.

Chama-se atenção pelo fato de que é importante considerar, para concretos tipo massa, rolado ou convencional, o binomio = propriedades mecânicas e elevação adiabática = atingido por concretos de determinado consumo de aglomerante.

te.

#### **5.4.2 – DIFUSIVIDADE E CONDUTIVIDADE TÉRMICA**

A dispersão maior observada pelos conjuntos de valores obtidos nos ensaios sobre concreto rolado, em comparação aquela observada para os concretos convencionais, deve ser decorrente da maior permeabilidade encontrada para o concreto rolado.

Os valores médios mostram semelhança com a queles de concretos convencionais.

#### **5.4.3 – CALOR ESPECÍFICO**

Os valores observados, semelhantes ao dos concretos convencionais, não mostram pontos que façam jus a um comentário suplementar.

#### **5.4.4 – COEFICIENTE LINEAR DE EXPANSÃO TÉRMICA**

Notou-se semelhança entre os valores obtidos para o concreto rolado e para concretos convencionais confecção nados com materiais de mesmas características.

#### **5.5 – VARIAÇÕES AUTÓGENAS**

As variações autógenas, de pequena monta, são decorrentes do emprego de cimento estável, como se evidenciou nos ítems 3 e 4.7.

#### **5.6 – PERMEABILIDADE**

A permeabilidade do concreto rolado de bai xo consumo é superior a dos concretos rolados de consumo mais elevados, e àqueles dos concretos convencionais.

Deve ser salientado, entretanto, que o uso

de "finos" de pó de pedra, subproduto da britagem, empregado no concreto rolado de Urugua-I, mostrou valores melhores (menor coeficiente de permeabilidade) que os obtidos para concretos ro lados de outras obras de consumos equivalentes.

## 6. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - Golik Miguel A. - "Urugua-I em H.C.R. - Aplicación de una Tecnología en Expansion"-  
- Jornadas de Extension Universitária - Córdoba - Argentina - setembro/1988.
- (2) - RC-09/87 - "Estudos Especiais para Urugua-I"  
Laboratório de Concreto - Itaipu Binacional
- (3) - RE-01/83 - VIIº "Resumo do Controle Tecnológico do Concreto"- Laboratório de Concreto - Itaipu Binacional.
- (4) - Concreto Adensado com Rolo Vibratório - Dados Sobre Uso na Itaipu Binacional - com Aproximadamente 10 Anos de Idade - XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens
- (5) - Evaluación de Densidades, Resistências y Altura de Las Capas - Presa de R.C.C - Urugua-I - Junho/88.
- (6) - Andriolo F. R. - Scandiuzzi L. - "Concreto e seus Materiais - Propriedades e Ensaios - Editora Pini.
- (7) - Houghton, Donald L. - "Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete" - A.C.I - Journal - 75/58 December - 1976.
- (8) - Houghton, Donald L. - Concrete Strain Capacity Tests: Their Economic Implications" - Proceeding Engineering Foundation - Research Conference on Economic Construction of Concrete Dams - Asilomar Conference Grounds - Califórnia - May/1974.
- (9) - Carlson, Roy; Houghton, Donald; Polivka, Milos " Causes

And Control of Cracking in Reinforced Mass Concrete"

ACI - Journal - July/1979.

- (10) - RC-37/81 - "Estudo das Propriedades Térmicas do Concreto de Itaipu" - Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional.
- (11) - RC-08/83 - "Determinação do Coeficiente de Expansão Térmica - Concreto de Itaipu" - Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional.

## RESUMO

O trabalho apresenta um conjunto de informações de ensaios especiais executados sobre o Concreto Rolado da Obra de Urugua-I (Argentina).

O conjunto de Ensaios Especiais - Permeabilidade, Elevação Adiabática, Fluênci<sup>a</sup>, Capacidade de Alongamento, entre outros-foi executado no Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional em atendimento à Obra de Urugua-I.

Os dados assim obtidos, através de metodologias de ensaios adequadas ao "Concreto Rolado" permitem um conhecimento mais amplo das propriedades desse material,bem como, esperamos que seja um importante auxílio no desenvolvimento de métodos de ensaio apropriados ao Concreto Rolado.