

SEMINÁRIO "CESP CONTA SUA HISTÓRIA"

DEZEMBRO 1.985

A CESP E A TECNOLOGIA DO CONCRETO
REFRIGERADO NO BRASIL

Bento Carlos SGARBOZA *

Francisco Rodrigues ANDRIOLO **



* Residência de Porto Primavera/Rosana

** Themag Engenharia

A CESP E A TECNOLOGIA DO CONCRETO REFRIGERADO NO BRASIL

Bento Carlos SCARBOZA *
Francisco Rodrigues ANDRIOLO **

* Residência de Porto Primavera/Rosana.

**Themag Engenharia.

RESUMO

O presente trabalho pretende trazer à memória, principalmente dos técnicos mais novos da CESP, a posição de destaque que a Companhia tem ocupado no cenário da Tecnologia do Concreto no País.

A construção do Complexo Hidroelétrico de Urubupungá, impôs o desenvolvimento da tecnologia do concreto e de técnicas de produção e construção do concreto, anteriormente não estabelecidas no Brasil.

Esse período, iniciado na década de 60, possibilitou, e encorajou, aos engenheiros e técnicos da Companhia o aprendizado e o domínio de técnicas que, posteriormente foram divulgadas pelo País e nos dias atuais são de uso quase que rotineiro.

Este trabalho aborda, especificamente, a tecnologia do concreto refrigerado, do ponto de vista de desenvolvimento cronológico, e de suas vantagens.

ÍNDICE

1 - A INFLUÊNCIA DA CESP NO AVANÇO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO NO BRASIL

2 - INFORMAÇÕES TÉCNICAS:

2.1 - GENERALIDADES

2.2 - SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO

2.2.1 - PRÉ-RESFRIAMENTO

2.2.2 - PÓS-RESFRIAMENTO

3 - CRONOLOGIA DA IMPLANTAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO

4 - RELATO DAS EXPERIÊNCIAS

5 - CUSTO DA REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO

6 - COMENTÁRIOS

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - INFLUÊNCIA DA CESP NO AVANÇO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO NO BRASIL.

A construção das Usinas Hidroelétricas - Francisco L. de Souza Dias (Jupiá) e Ilha Solteira, bem como as posteriores, Água Vermelha, Capivara, Nova Avanhandava, Porto Primavera, Rosana, Taquaruçu e Três Irmãos, envolvendo em torno de 10.000.000 m³ de concreto induziu os dirigentes da CESP, à necessidade do desenvolvimento e domínio da Tecnologia do "CONCRETO MASSA".

Decorrente de um programa de aprendizado e pesquisas, várias tecnologias foram absorvidas e desenvolvidas. Assim é que a CESP, com a execução das suas obras, foi responsável pela introdução no Brasil de novidades e tecnologias dentre as quais podem ser citadas:

- Utilização de material pozolânico, para o combate à reação álcali-sílica dos agregados e para benefício das propriedades do concreto (JUPIÁ).
- Instalação de fábrica de material pozolânico e desenvolvimento da técnica de produção (JUPIÁ).
- Utilização de cimento de alta finura fabricado em instalações próprias (JUPIÁ).
- Utilização da técnica da armadura pré-montada (JUPIÁ).
- Utilização de pré-moldados em concreto para peças incorporadas à Barragem (JUPIÁ).
- Utilização de misturas de concreto massa com consumo de aglomerante inferior a 100 kg/m³ (ILHA SOLTEIRA - misturas com 86 kg/m³ e ÁGUA VERMELHA - misturas com 71 kg/m³ de cimento).
- Utilização intensa de emendas de barras de aço, por caldeamento topo a topo (ILHA SOLTEIRA).
- Uso de transporte de concreto por correia (ILHA SOLTEIRA).
- Implantação de laboratório com caráter de pesquisas e controle, com aparelhagem para estudos térmicos do concreto (ILHA SOLTEIRA).
- Produção e lançamento de concreto acima de 100.000 m³ por mês (ILHA SOLTEIRA).
- Instalação intensa e desenvolvimento de técnicas de fabricação de instrumentos de auscultação (ILHA SOLTEIRA).
- Utilização do concreto com agregado pré-colocado (ILHA SOLTEIRA).
- Uso de protensão de grande capacidade de carga - até 1.000 t (ILHA SOLTEIRA).
- Uso de caldas refrigeradas para injeção de protensão (ILHA SOLTEIRA).
- Uso da técnica de injeção a vácuo (ILHA SOLTEIRA).
- Uso do pré-resfriamento do concreto (protótipo JUPIÁ - definitivo ILHA SOLTEIRA).
- Processo de injeção em cabos protendidos utilizando-se o efeito chaminé e injeções complementares e suplementares (ÁGUA VERMELHA).

- Uso de cimento pozolânico com alta finura e alto teor de material pozolânico (PORTO PRIMAVERA/ROSANA).
- Aplicação de basalto desagregável (pesquisa - PORTO PRIMAVERA).
- Apoio aos sistemas de produção, transporte e lançamento de concreto, bem como em detalhes executivos de forma e armação.

Neste trabalho dar-se-á atenção ao uso da técnica do pré-resfriamento do concreto.

Não se pode deixar de mencionar a perseverança e dedicação dos Eng^{os} Fausto V. Guimarães e José Florentino de Castro Sobrinho, no convencimento e contribuição desse desenvolvimento da Companhia. E o inestimável apoio técnico e encorajador do consultor Professor Roy W. Carlson.

2. INFORMAÇÕES TÉCNICAS

2.1 - GENERALIDADES

Ao se efetuar a concretagem de qualquer estrutura de concreto, a reação de hidratação do cimento, sendo exotérmica, provoca a elevação da temperatura do concreto. Esta elevação atinge um valor máximo e, posteriormente, cessada a reação, a temperatura sofre um abaixamento, tendendo nas maiores idades à média do ambiente como ilustra a figura 1 [1].

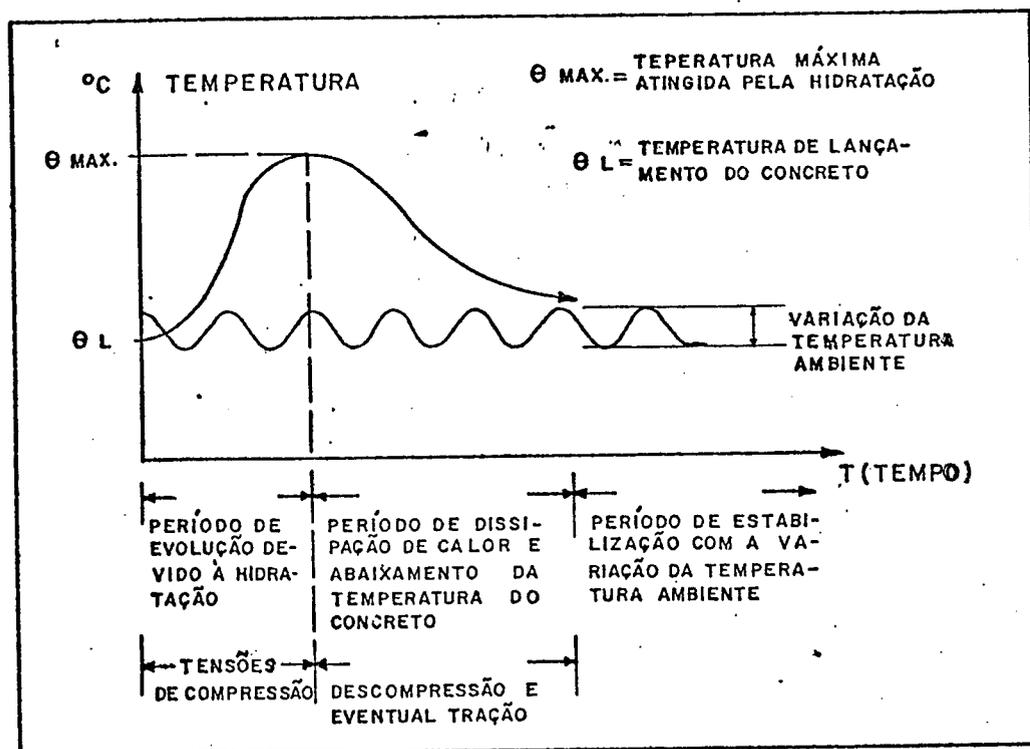


FIGURA 1 - HISTÓRICO DA TEMPERATURA DO CONCRETO [1]

Antes de atingir determinada temperatura de equilíbrio, o desenvolvimento da temperatura do concreto está associado a vários fatores, tais como temperatura e velocidade de lançamento; às condições de exposição durante o lançamento, teor e tipo de aglomerante, material pozolânico e aditivos, e dos processos de controle da evolução das temperaturas.

A elevação da temperatura de um concreto será tanto maior quanto menos favoráveis as condições para dissipação da energia térmica.

Em obras de menor volume, como pontes, viadutos e edifícios, esse problema passa despercebido, pois seus membros constituintes (viga, pilares e lajes) envoltos pelo ambiente apresentam grande facilidade de dissipação dessa energia, e o calor gerado flui imediatamente para o ambiente não ocasionando elevações acentuadas de temperatura e nem efeitos paralelos.

Em estruturas do tipo das barragens de gravidade, devido às grandes massas envolvidas e dadas as grandes dimensões dos blocos são consideráveis as quantidades de calor geradas.

Nessas estruturas o calor não pode fluir livremente para o ambiente, em direção horizontal, com exceção das regiões limites (paramentos). O fluxo de calor é, então, predominantemente vertical e em consequência a temperatura atinge valores elevados nas regiões centrais do maciço, com excessivas quedas até a estabilização.

No processo de construção incremental de uma barragem, lançando-se uma camada de concreto, a temperatura de cada um dos seus pontos eleva-se diferentemente, dependendo do tipo de concreto, das condições do lançamento e da geometria da estrutura. Estas elevações são ainda afetadas pelos lançamentos das camadas sucessivas que além de alterar o fluxo do calor de camadas subjacentes para o ambiente, ainda fornecem a estas, parte de seu próprio calor gerado.

Como as características físicas do concreto evoluem à medida que se processa a reação, simultaneamente desenvolvem-se tensões decorrentes das evoluções das temperaturas.

Inicialmente os aumentos de temperatura originam tensões de compressão. Estas compressões iniciais estando associadas ao baixo valor do módulo de deformação e à maior deformação lenta, nas primeiras idades, não são acentuadas e atingem valores máximos quando a temperatura atingir seu pico.

As quedas de temperatura, subsequentes, decorrentes do processo de estabilização provocam uma descompressão gradativa, e nas idades avançadas, já com valores finais do módulo de deformação, quando atingir as quedas máximas, os sucessivos acréscimos de descompressão superam a pré-compressão, podendo surgir

no maciço zonas localizadas com tração excessiva.

A quantidade de calor gerada em um volume unitário de concreto é função do tipo e quantidade de aglomerante na mistura. A velocidade com que esta reação se processa depende das propriedades e proporções dos agregados e principalmente da temperatura na qual o concreto é preparado, sendo maior quanto menor for essa temperatura.

Um grande volume de concreto pode ficar livre de fissuração decorrente das variações de temperatura, se forem tomadas medidas adequadas para reduzi-las.

No caso de barragens, várias técnicas construtivas podem ser aplicadas com o propósito de melhorar as condições de dissipação da energia térmica, tendo cada uma delas diferentes implicações econômicas, sendo importante considerar:

- tipo de cimento, com baixo calor de hidratação;
- utilização de material pozolânico, com atividade adequada;
- minimização da quantidade do aglomerante, nas misturas;
- uso de agregados com propriedades térmicas convenientes;
- subdivisão dos "blocos", ou a subdivisão das camadas em pequenos blocos;
- introdução de juntas verticais de resfriamento;
- uso de poços verticais de resfriamento;
- aumento do intervalo de tempo entre lançamentos consecutivos;
- concretagens em lances de pequena altura;
- umedecimento das superfícies, com água refrigerada;
- produção do concreto à baixa temperatura;
- circulação de água refrigerada, por tubulação embutida no concreto;
- isolamento da superfície.

2.2 - SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO.

A escolha do sistema de refrigeração é função das condições particulares de cada obra, sob os pontos de vista de: dimensões, técnicas construtivas, condições ambientais e tipo de materiais disponíveis.

Basicamente podem ser identificados por

- sistemas de refrigeração prévia (pré-resfriamento);
- sistemas de refrigeração posterior (pós-resfriamento).

2.2.1 - Pré-Resfriamento

Uma das influências preponderantes para evitar a fissuração térmica é o controle da temperatura de lançamento do concreto. De modo geral, quanto menor a temperatura do concreto, quando passou do estado plástico, ao ser lançado, para o

estado elástico, ao endurecer, menor é a tendência à fissuração. A temperatura de lançamento (θ_L) pode ser escolhida de tal forma, que a deformação de tração potencial, resultante da queda da temperatura do valor de pico para uma temperatura final estável (θ_A), não exceda a capacidade de alongamento, por tração, do concreto, e que pode ser estimada por:

$$\theta_L = \theta_A + \frac{100 \times \epsilon}{\alpha_1 \times k_p} - \Delta \theta \quad \text{sendo}$$

θ_L = Temperatura de lançamento do concreto ($^{\circ}\text{C}$),

θ_A = Temperatura de estabilização (ambiente) ($^{\circ}\text{C}$),

ϵ = Capacidade de alongamento à tração, do concreto,

α_1 = Coeficiente linear de expansão térmica do concreto ($^{\circ}\text{C}^{-1}$),

k_p = Grau de restrição (%),

$\Delta \theta$ = Evolução adiabática da temperatura do concreto ($^{\circ}\text{C}$).

Efetuada-se o lançamento do concreto a temperatura $\theta_L < \theta_A$, o fluxo de calor é, inicialmente no sentido do meio ambiente para o maciço, até que se atinja o potencial do meio externo, a seguir, elevando-se ainda a temperatura do maciço o fluxo inverte-se, dissipando energia ao meio ambiente.

Quanto maior a diferença entre θ_A e θ_L , mais intenso será o fluxo de calor inicial, elevando-se mais rapidamente a temperatura do maciço.

O objetivo almejado, ao se lançar o concreto refrigerado, é aproveitar esta diferença de temperatura para absorver o calor liberado pela reação exotérmica de tal modo que:

- as temperaturas subam mais lentamente enquanto que, simultaneamente, o concreto vai adquirindo pré-compressão durante maior período;
- as temperaturas máximas e as quedas até a estabilização sejam reduzidas;
- a pré-compressão seja suficiente para evitar excessivas tensões finais de tração.

Fixando ou determinando a temperatura de lançamento (θ_L) do concreto, resta fazer um balanço térmico dos materiais, para que se possa, a partir de suas propriedades, determinar a temperatura dos ingredientes.

Os componentes do concreto podem ser refrigerados de diversas maneiras.

A água de mistura pode ser esfriada, parcialmente ou totalmente substituída por gelo. As pilhas de agregados podem ficar à sombra. Os agregados podem ser processados usando água gelada.

Os agregados graúdos podem ser resfriados pela aspersão de água, e pela insuflação de ar frio, forçado, nos silos da central.

Em vários casos, as obras da CESP têm usado uma combinação de diversas dessas práticas.

2.2.2 - Pós-Resfriamento.

O controle das temperaturas do concreto pode ser feito eficazmente pela circulação de um líquido frio (geralmente água) por meio de serpentinas constituídas por tubos de paredes finas que são embutidos no concreto. O calor removido durante os primeiros dias, após o lançamento, vai reduzir o pico inicial de temperatura.

3 - CRONOLOGIA DA IMPLANTAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO.

A técnica do pós-resfriamento do concreto foi empregada pela primeira vez, pelo Bureau Of Reclamation, em 1933 [2] na construção da Barragem de Hoover. Essa técnica foi suportada, na época, por vários estudos sobre as propriedades termo-elásticas do concreto e seus constituintes.

A técnica do pré-resfriamento do concreto, com intuito de reduzir os problemas de origem térmica, foi adotada pela primeira vez nos fins dos anos 30 [3] na Barragem de Hiwassee, em 1938, pelo T.V.A. (Tennessee Valley Authority) e na Barragem de Friant, em 1940, pelo Bureau of Reclamation .

Entretanto o domínio mais intenso da técnica ocorreu na construção da Barragem de Norfolk em 1941, pelo Corps of Engineers.

A adoção de ambos os sistemas - pré-resfriamento dos ingredientes do concreto e pós-resfriamento do concreto - foi na Barragem de Glen Canyon em 1960 [4] . O concreto refrigerado foi aplicado pela primeira vez no Brasil, através do pré-resfriamento, em 10/junho/1966, em caráter experimental [5] , no bloco 122-A-PA-E, durante a construção da Hidroelétrica de Jupia.

Deve ser salientado que essa aplicação experimental foi planejada através de [6] - "Programação de ensaios para determinação de distribuições de temperatura em blocos de concreto", de 18/janeiro/1966, que estabelecia a instalação de uma fábrica piloto de gelo, no primeiro semestre de 1966.

A programação previa a determinação das elevações adiabáticas e difusividade dos concretos e de estudo teórico para a estimativa das temperaturas com posterior confronto com as medições.

4 - RELATO DAS EXPERIÊNCIAS.

Foram escolhidos [5] quatro blocos de mesmas dimensões e de idênticas localizações relativas, no conjunto da obra, sendo que:

BLOCO	CONCRETO	CONDIÇÃO	DATA
122 A-PA-E	C-250	SUBSTITUINDO A ÁGUA DE MISTURA POR GELO	10/6/1966
124 A-PA-E	C-250	SEM USO DE GELO	17/6/1966
128 A-PA-E	B-250 AR	SUBSTITUINDO A ÁGUA DE MISTURA POR GELO	16/8/1966
129 A PA-E	B-250 AR	SEM USO DE GELO	25/8/1966

Figura 2 - Experiência executada em Jupiã

O concreto C-250 era constituído por cascalhos 19 e 38 mm, areia natural, com 245 kg/m³ de cimento (Ponte Alta). O concreto B-250 AR era constituído por britas 19 e 38 mm, areia natural, pedrisco de basalto e 247 kg/m³ de cimento (Ponte Alta).

A experiência consistiu em verificar, para blocos de mesmas dimensões e com misturas iguais a influência da temperatura de colocação no desenvolvimento das temperaturas devido à hidratação, e na fissuração do bloco devido às tensões de origem térmica.

Efetuiu-se a comparação dos efeitos devido ao uso de concretos de mesmo consumo, mas de difusividades distintas, pois:

h^2 (difusividade) C-250 \approx 0,139 m²/dia e

h^2 (difusividade) B-250 AR \approx 0,072 m²/dia.

Os dados obtidos nessas concretagens são apresentados nas figuras 3, 4 e 5.

Da figura 3 pode se extrair que os concretos não refrigerados apresentaram maiores quedas de temperatura e os concretos com britas de basalto apresentaram pico térmico em idades maiores que os concretos com cascalhos de quartzito. Isto devido à menor difusividade dos concretos com basalto.

5 - CUSTOS DA REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO.

A determinação dos custos decorrentes da refrigeração é relativamente simples. A avaliação do reflexo sobre o custo final do concreto lançado já é mais complexa devido à combinações de diversos fatores [1].

O custo da instalação, para temperaturas do concreto ao redor de 7 °C, bem como a sua manutenção e operação tem oscilado [1] [7] em torno de 3% do custo do concreto.

I N F O R M A Ç Ã O	B L O C O			
	122A-PA-E	124A-PA-E	128A-PA-E	129A-PA-E
CONCRETO USADO	C-250	C-250	B-250-AR	B-250-AR
DIFUSIVIDADE (M ² /DIA)	0,139	0,139	0,072	0,072
ÁGUA OU GELO	GELO	ÁGUA	GELO	ÁGUA
CONSUMO DE CIMENTO KG/M ³	245	245	247	247
e _L = TEMPERATURA DE LANÇAMENTO (°C)	10,5	24,3	12,3	19,8
e _M = TEMPERATURA MÁXIMA OBSERVADA (°C)	40,1	56,5	44,2	51,5
EVOLUÇÃO RELATIVA (°C)	29,6	32,2	31,9	31,7
MENOR TEMPERATURA OBSERVADA APÓS A OCORRÊNCIA DO MÁXIMO (°C)	≤ 21,9	≤ 21,9	21,9	21,9
QUEDA DE TEMPERATURA (°C)	≥ 18,2	≥ 34,6	22,3	29,6
MÁXIMA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE O PONTO CENTRAL E A SUPERFÍCIE SUPERIOR (°C)	19,1	33,5	19,2	28,5
ÉPOCA QUE O CONCRETO ATINGIU A 1/2 SEÇÃO DO BLOCO	4h 26 min 10/06/66	23h 30 min 17/06/66	15h 20 min 16/08/66	9h 40 min 25/08/66
TEMPO DECORRIDO ATÉ OCORRER O PICO MÁXIMO (HORAS)	66	36	90	54

FIGURA 3 - DADOS GERAIS DAS EXPERIÊNCIAS DE CONCRETO REFRIGERADO EM JUPIÁ

Esses 3% podem, porém, ser totalmente absorvidos, ou até suplantados vantajosamente, quando ocorrer:

- maior velocidade de concretagem devido a lances (camadas) mais altos, com menor número de juntas;
- menores intervalos de lançamento;
- redução de uso de aditivos, visto que o concreto refrigerado é mais plástico e tem início de pega retardado.

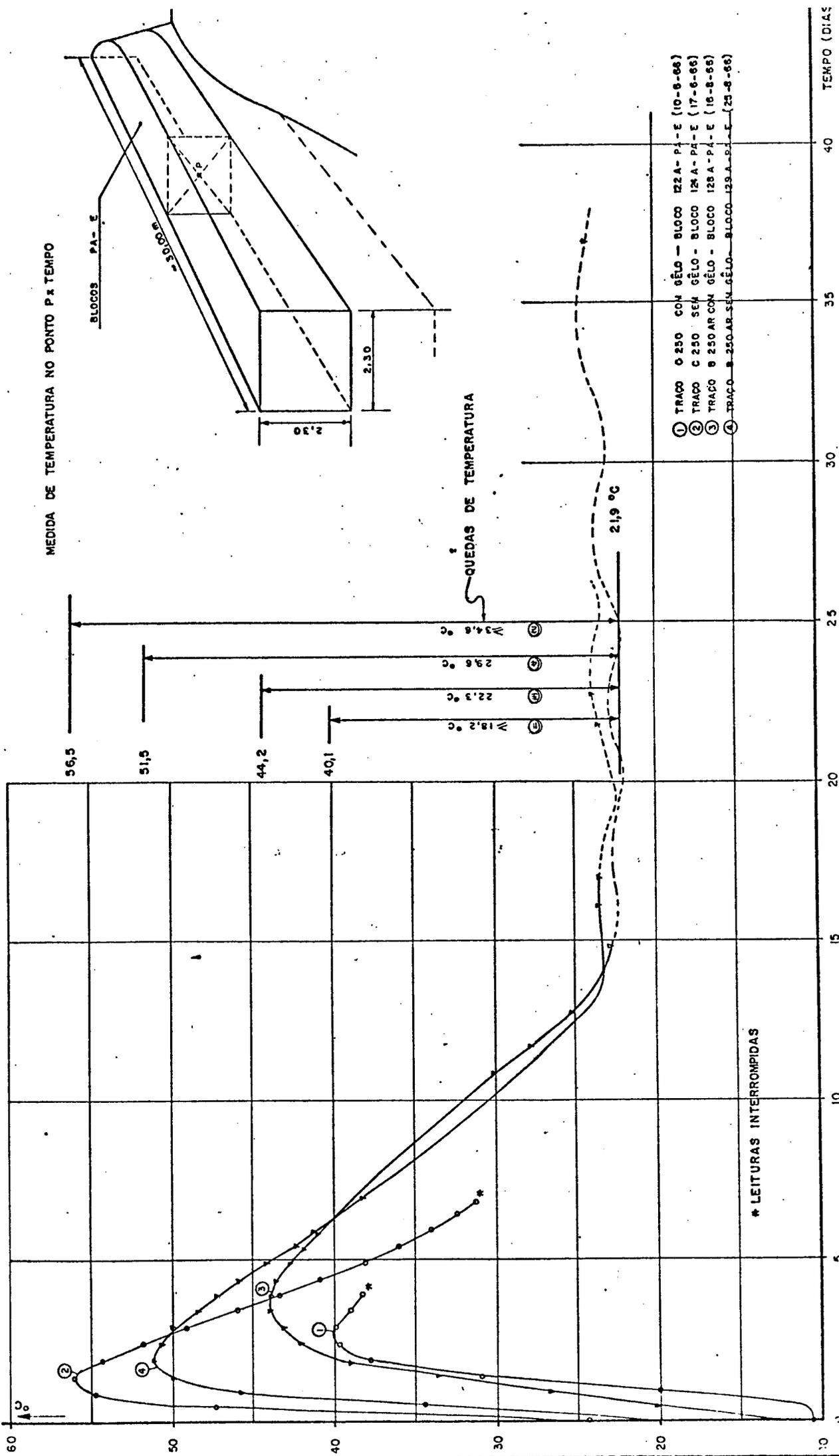
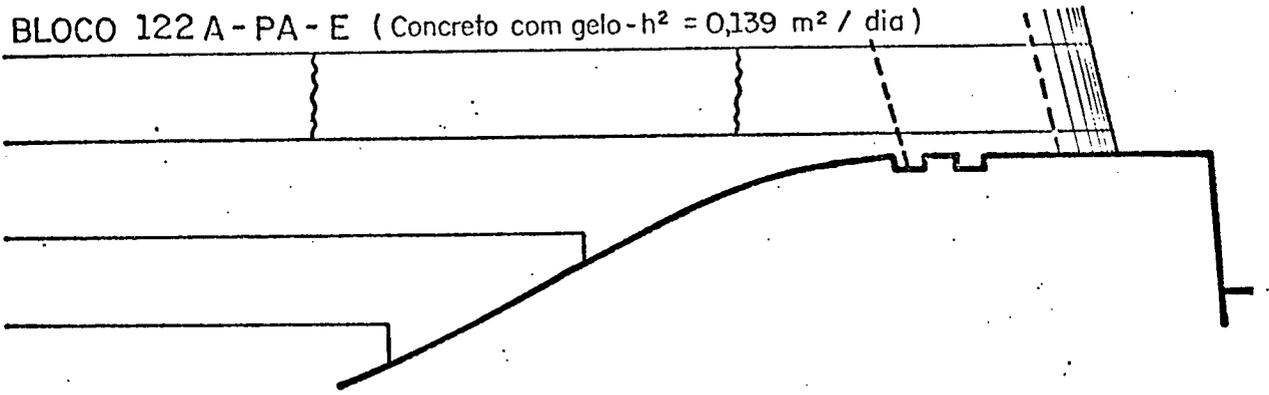
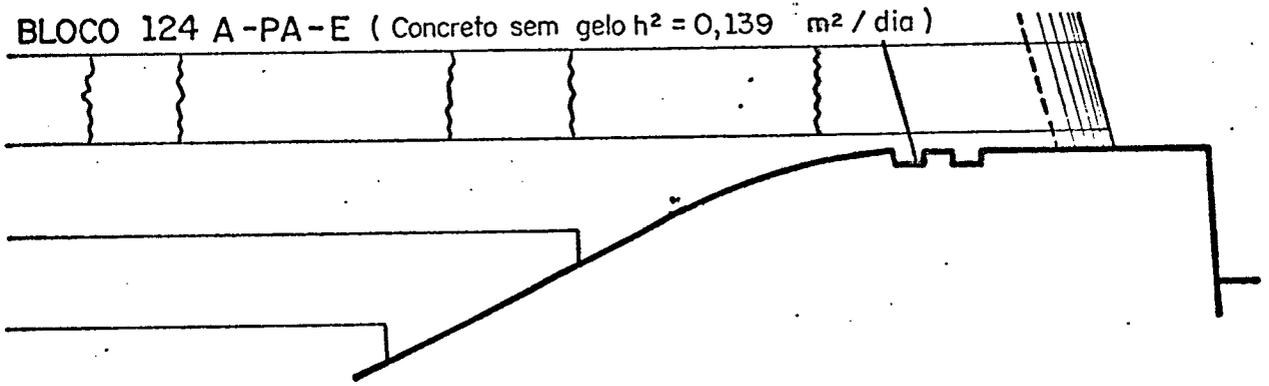


Figura 4 - Histórico das temperaturas medidas nos blocos.

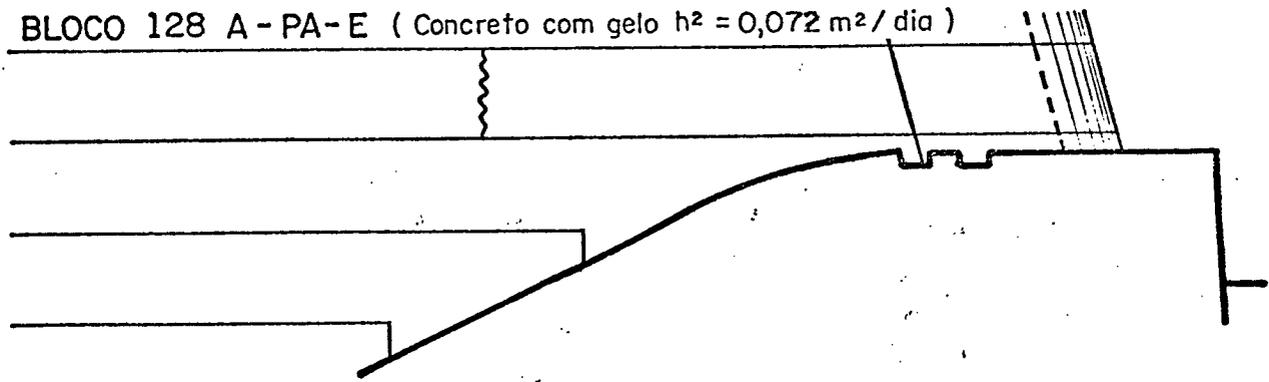
BLOCO 122 A-PA-E (Concreto com gelo - $h^2 = 0,139 \text{ m}^2 / \text{dia}$)



BLOCO 124 A-PA-E (Concreto sem gelo $h^2 = 0,139 \text{ m}^2 / \text{dia}$)



BLOCO 128 A-PA-E (Concreto com gelo $h^2 = 0,072 \text{ m}^2 / \text{dia}$)



BLOCO 129 A-PA-E (Concreto sem gelo $h^2 = 0,072 \text{ m}^2 / \text{dia}$)

CAMADA E (experiência)

CAMADA D

CAMADA C

CAMADA B

FISSURA TOTAL DO BLOCO

FIG.5 - FISSURAÇÃO OBSERVADA NOS BLOCOS EXPERIMENTADOS.

- menor consumo de aglomerante (ao redor de 0,3% a cada redução de 1°C na temperatura do concreto).

6 - COMENTÁRIOS

É importante lembrar a importância da CESP, nesse desenvolvimento tecnológico, visto que além de melhorar a qualidade das estruturas de concreto de suas obras, tem satisfatória vantagem econômica e ainda, auxiliou no estabelecimento de "know-how" brasileiro da técnica do concreto refrigerado.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1 "Construções de Concreto: Manual de Práticas para Controle e Execução" - Francisco Rodrigues Andriolo - Editora Pini - 1984.
- 2 "Concrete Manufacture, Handling and Control" - Bulletin nº 4 - Part IV - Design and Construction Boulder Canyon - Project Final.
- 3 "Control of Cracking in Concrete Gravity Dams" - William R. Wagh - James A. Rhodes - Journal of the Power Division - A.S.C.E. - 1959
- 4 "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures" - A.C.I. - Committee 207
- 5 Relatório C-16 - CESP - Experiência sobre calor de hidratação em grandes blocos de concreto - Influência da temperatura de lançamento e do tipo de agregado - Jupia.
- 6 Relatório C-21 - CESP - Concretos para a Barragem de Jupia.
- 7 Construction cost and design considerations - Rapid construction of concrete dams - Proceedings of the Engineering Foundation Research Conference - Pacific Grove - Califórnia - Março - 1970 - A.S.C.E. John W. Leonard.