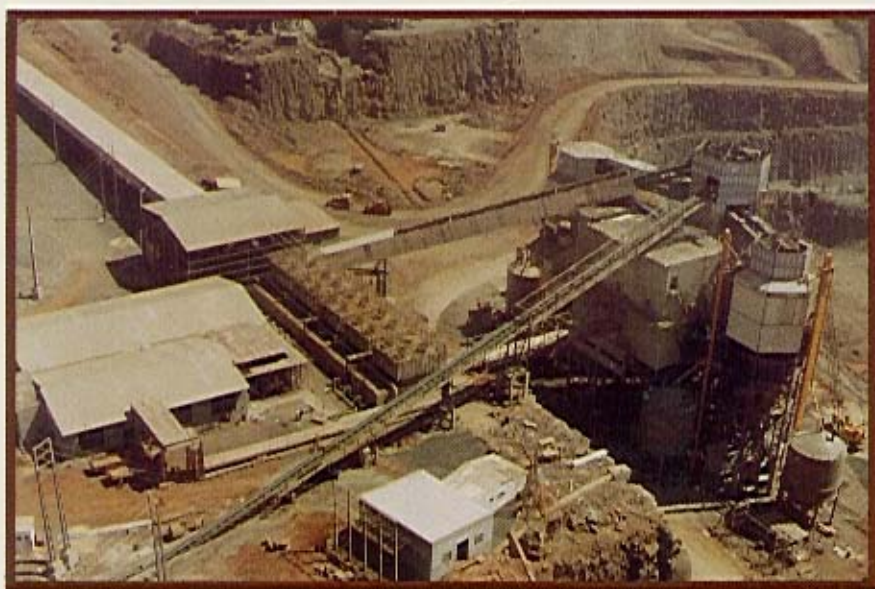


CONCRETO PRÊ-REFRIGERADO NO BRASIL: Uma Evolução com mais de 20 Anos



**Francisco Rodrigues Andriolo
Tadevsz M. Skwarczynski**

Eng^o Francisco Rodrigues Andriolo
Eng^o—Tadeusz M. Skwarczynski

CONCRETO
PRÉ-REFRIGERADO
NO BRASIL
Uma Evolução
Com Mais de 20 anos

OUTUBRO - 1988

PREFÁCIOS

I

Publicações como "CONCRETO PRÉ-REFRIGERADO NO BRASIL: UMA EVOLUÇÃO COM MAIS DE 20 ANOS" são fundamentais para o desenvolvimento da engenharia brasileira. Além de dar uma contribuição efetiva para o meio técnico, a iniciativa dos Eng^{os} Francisco R. Andriolo e Tadeusz M. Skwarczynski tem o mérito de registrar a experiência nacional em refrigeração de concreto nestas últimas duas décadas. Numa retrospectiva histórica do conhecimento, esta publicação aborda os primeiros estudos e ensaios na Usina Hidroelétrica de Jupia, realizados no princípio dos anos 60, mostrando a evolução das técnicas empregadas até os dias de hoje.

Na verdade, este trabalho atende a necessidade atual de condensar, em forma de "manual", as principais técnicas de refrigeração de concreto, fornecendo elementos essenciais para as seguintes avaliações:

- . técnicas e econômicas,
- . medidas minimizadoras dos problemas de origem térmica,
- . alternativas para atenuar os efeitos térmicos no concreto.

No concreto pré-resfriado a cristalização do cimento se processa mais lentamente do que na temperatura ambiente, permitindo o agrupamento mais ordenado dos cristais. Desta maneira, obtém-se um concreto com maior resistência mecânica para o mesmo consumo de cimento ou um menor consumo para a mesma resistência.

Este livro apresenta também subsídios para esclarecer que a refrigeração, além de resolver questões técnicas, como, por exemplo, a diminuição de trincas de origem térmica, possui outras vantagens:

- . melhor trabalhabilidade do concreto,
- . camadas de concretagem mais altas,
- . diminuição do consumo de cimento em cerca de 10% para um mesmo nível de propriedade mecânica,
- . redução ou eliminação de aditivos,

- . maior tempo para o fim de pega do cimento, minimizando a ocorrência de "juntas frias",
- . concreto mais econômico.

Com meus cumprimentos,

Alberto Maionchi

II

De importador de tecnologia na construção de grandes barragens, até a década de 60, o Brasil passou rapidamente a uma posição de vanguarda, já no final daquela década e nas subseqüentes, com constantes avanços.

E, em nosso País, a busca do aperfeiçoamento nessa área se fará necessária ainda por muitos anos, pois ao contrário do restante do mundo, onde as reservas de potencial hidráulico, praticamente se esgotaram, aqui ainda temos um amplo campo a ser explorado.

Gravitando ao redor das Concessionárias de Energia Elétrica, formaram-se equipes de profissionais com grande disciplina técnica onde a qualidade do que era feito nunca cedeu lugar ao compromisso, não menos importante, da economicidade desejada. Os autores deste livro são importantes exemplos desses profissionais.

A obra aqui apresentada mostra, de forma abrangente, o tema do Pré-Resfriamento do Concreto, desde suas bases conceituais até suas técnicas correntes de aplicação.

Além do seu grande valor informativo, como o próprio título sugere, chegando ao "ESTADO DA ARTE" atual, a obra condensa, de forma eficaz, os elementos básicos para formação dos novos técnicos que se dedicarão à construção de barragens.

José Florentino de Castro Sobrinho

São Paulo - Fevereiro/1989

ÍNDICE

1 .	APRESENTAÇÃO	9
2 .	HISTÓRICO	10
3 .	CLIMA	12
4 .	NECESSIDADE DO CONTROLE DE TEMPERATURA	16
4.1	– GENERALIDADE	
4.2	– CONDIÇÕES ESTRUTURAIS	
4.3	– DIMENSÕES DA ESTRUTURA	
4.4	– RESTRIÇÃO	
4.5	– CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO CONCRETO	
4.5.1	– Calor e Curva Adiabática de Evolução de Temperatura	
4.5.2	– Coeficiente de Expansão Térmica	
4.5.3	– Calor Específico	
4.5.4	– Condutividade Térmica	
4.5.5	– Difusividade Térmica	
4.6	– CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DO CONCRETO	
4.6.1	– Deformação Lenta	
4.6.2	– Capacidade de Alongamento	
4.7	– CORRELACIONAMENTOS	
5 .	AVALIAÇÕES DE SITUAÇÕES TÍPICAS DE CONCRETAGENS	31
6 .	MEDIDAS MINIMIZADORAS DOS PROBLEMAS DE ORIGEM TÉRMICA	35
6.1	– MOLDAR A ESTRUTURA EM BLOCOS DE PEQUENAS DIMENSÕES	
6.2	– MOLDAR A ESTRUTURA EM CAMADAS DE PEQUENA ALTURA	

- 6.3 – EXECUTAR AS CONCRETAGENS DAS CAMADAS A INTERVALOS DE TEMPO MAIS ESPAÇADOS
- 6.4 – REDUZIR A RESTRIÇÃO
- 6.5 – UTILIZAR AGLOMERANTE DE REDUZIDO CALOR DE HIDRATAÇÃO
- 6.6 – UTILIZAR MATERIAL POZOLÂNICO
- 6.7 – UTILIZAR CONCRETOS COM AGREGADOS DE MAIOR TAMANHO MÁXIMO
- 6.8 – UTILIZAR CONCRETO COM MAIOR CAPACIDADE DE ALONGAMENTO
- 6.9 – UTILIZAR CONCRETOS COM MENOR TEOR DE AGLOMERANTE
- 6.10 – UTILIZAR CONCRETO COM MENOR DIFUSIVIDADE
- 6.11 – APROVEITAR DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTES
- 6.12 – UTILIZAR O ISOLAMENTO NO CONCRETO
- 6.13 – UTILIZAR O PÓS-RESFRIAMENTO DO CONCRETO
- 6.14 – UTILIZAR O PRÉ-RESFRIAMENTO

7 . RECURSOS PARA O PRÉ-RESFRIAMENTO DO CONCRETO 42

- 7.1 – GENERALIDADES
- 7.2 – DISCUSSÕES SOBRE OS SISTEMAS ÁGUA E AR – PARA RESFRIAMENTO DE AGREGADOS
- 7.3 – EQUIPAMENTOS PARA O RESFRIAMENTO DOS AGREGADOS COM ÁGUA
- 7.4 – EQUIPAMENTOS PARA RESFRIAMENTO DOS AGREGADOS COM AR
- 7.5 – EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E DOSAGEM DO GELO
- 7.6 – COMPRESSORES DE AMÔNIA (NH₃)
- 7.7. – CONDENSADORES DE AMÔNIA (NH₃)
- 7.8 – SALA DOS COMPRESSORES
- 7.9 – ESTRUTURAS METÁLICAS DE SUPORTE
- 7.10 – ISOLAMENTO TÉRMICO
- 7.11 – INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

8 . PERSPECTIVAS DE USO 97

9 . ÍNDICES E CUSTOS 98

10 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 100

11 . AGRADECIMENTOS E PALAVRAS FINAIS 101

1 APRESENTAÇÃO

Mais de 20 anos se passaram, desde as primeiras providências, para aplicação da técnica do pré-resfriamento do concreto, no Brasil.

Nesse período várias informações foram publicadas sobre os processos e roteiros de cálculos para a determinação das condições limites para a aplicação do concreto em estruturas massivas.

Um grande acervo de informações sobre as propriedades termoelástica-mecânicas dos materiais e dos concretos, encontra-se disponível para os técnicos e usuários.

Pouco, ou quase nada, entretanto, tem sido divulgado sobre a técnica da refrigeração do concreto. Ou seja "o como é feito".

Dessa forma, esta publicação pretende fazer o registro de informações técnicas que possam ser úteis aos profissionais envolvidos nessas atividades.

O objeto destas notas é o de copilar e apresentar experiências, com o pré-resfriamento de materiais e do concreto, que se desenvolveram, fornecendo um conjunto de opções para seleção e aplicação dessas técnicas.

2 HISTÓRICO

A técnica do resfriamento artificial do concreto foi empregada pela primeira vez, através do pós-resfriamento, pelo Bureau of Reclamation, em 1933 [1], na construção da barragem de Hoover – E.U.A. 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 e início da década de 40 [2] (Barragem de Hiwassee – 1938 – Tennessee Valley Authority; Barragem de Friant – 1940 – Bureau of Reclamation).

O domínio mais amplo dessa técnica, entretanto, ocorreu na construção da barragem de Norfolk (1941-1945), pelo Corps of Engineers.

A adoção de ambos os sistemas – pré-resfriamento e pós-resfriamento – foi feita na construção da barragem de Glen Canyon (1960), [3].

No Brasil, a primeira aplicação prática da técnica do resfriamento do concreto, foi, efetuada com a pré-refrigeração, em 10 de junho de 1966 [4] na concretagem do “bloco” 122-A-PA-E, nos pilares da tomada d’água da Usina Hidrelétrica (Jupiá) – Francisco L. Souza Dias.

A partir dos estudos e experiências práticas realizadas pela CESP, em Jupiá, outras aplicações, da técnica de refrigeração do concreto, se sucederam como resume a Figura 1.

A aplicação dessa técnica ocorreu, fundamentalmente, na construção das barragens das Hidrelétricas. Somente no fim dos anos 70 é que essa técnica começou a ser usada para outros tipos de obras.

OBRA	ENTRADA	VOLUME DE CONCRETO (m³)	CAPACIDADE DE LANCAMENTO DE CONCRETO (m³/h)	TEMPERATURA DE LANCAMENTO DE CONCRETO (°C)	TIPO DE AGREGADO	NÚMERO DE MÁQUINAS	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m³)	PRODUTORES DE GEL	TIPO DO DEPOSITO	QUANTIDADE	TIPO	POTENCIA TOTAL (HP)	POTENCIA DE AGREGADOS MAIORES (HP)	OUTRAS INFORMAÇÕES DE ESTRUTURA CENTRAIS	TIPO DE CENTRAL DE CONCRETO
Jupia - Fraz. Jussara	CESP	1500.000	200 m³/h	11°C	Basalto	1	98 kg/m³	BBC	30t	1	York	4000 HP	380 HP	-	Johnson
Jupia - Fraz. Jussara	CESP	3.719.989	2.200m³/h	11°C	Basalto	8	92 kg/m³	North Star	2x75t	24	York	750 HP	-	-	Johnson
Jupia - Fraz. Jussara	CESP	884.737	150 m³/h	10°C	Basalto	3	83 kg/m³	North Star	150t	5	York	3400 HP	360HP	-	Johnson
Volta Grande	CEMG	550.000	220 m³/h	9°C	Basalto	8	82 kg/m³	North Star	2x75t	34	York	2360 HP	-	-	Johnson
Volta Grande	CEMG	1.330.330	220 m³/h	7°C	Basalto	10	50t	Star	50t	4	Sabroe	1200HP	-	-	Johnson
São Simão	CEMS	1792.000	240-340 m³/h	11°C	Quartzito	8	23t	Sabroe	23t	5	Sabroe	1400 HP	-	-	Johnson
Schiffelino	CEMS	1750.000	2x140 m³/h	11°C	Quartzito	8	23t	Alcoa	23t	14	Sabroe	15625 HP	1200 HP	-	Johnson
Itaipu	CEMS	2080.769	200-340m³/h	20°C	Basalto	54	-	North Star	81.000t	11	Sabroe	350 HP	-	-	Johnson
Itaipu	CEMS	13.000.000	6200m³/h	7°C	Basalto	54	-	North Star	81.000t	6	Sabroe	5225 HP	-	-	Johnson
Agua (I e II)	CEMS	200.000	6 m³/h	18°C	Granito	4	150 kg/m³	Star	25t	11	York	3400 HP	360HP	-	Johnson
Tucund (I)	CEMS	500.000	4x200m³/h	12°C	Meio-gravilha	4	30t	North Star	30t	16	Sabroe	2270 HP	-	-	Johnson
Tucund (II)	CEMS	5000.000	4x200m³/h	12°C	Meio-gravilha	16	250t	North Star	250t	16	Sabroe	1380 HP	-	-	Johnson
Nova Avanhandava	CESP	568.000	150 m³/h	12°C	Basalto	5	108kg/m³	Sabroe	2x45t	5	York	2270 HP	-	-	Johnson
Rosaria	CESP	500.000	110m³/h	12°C	Quartzito	5	54 kg/m³	Star	40t	3	Sabroe	2375 HP	-	-	Johnson
Três Ilhas	CESP	1945.634	200 m³/h	11°C	Basalto	13	62 kg/m³	Sabroe	80t	11	Sabroe	1770 HP	-	-	Johnson
Ponto Primavera	CESP	2240.311	2x150 m³/h	11°C	Quartzito	6	30 kg/m³	Sabroe	70t	7	Sabroe	1220 HP	-	-	Johnson
Tejuapucu	CESP	684.500	150 m³/h	14°C	Basalto	2	51 kg/m³	Star	20t	10	Sabroe	2650 HP	-	-	Johnson
Tapacuba	CHESF	2600.000	180-240 m³/h	12°C	Quartzito	20	230t	Alcoa	230t	7	Sabroe	390 HP	-	-	Johnson
Chapelaria	CELO	185	180 m³/h	15°C	Basalto	6	50t	Alcoa	50t	7	Sabroe	535 HP	-	-	Johnson
Angra (III)	NJC	1986	130 m³/h	18°C	Granito	6	14t	Alcoa	14t	8	Sabroe	2125 KP	-	-	Johnson
Xingó	CHESF	1988	130 m³/h	12°C	Granito	16	78,4 kg/m³	Alcoa	230t	8	Sabroe	2125 KP	-	-	Johnson

Figura - 1 — Dados gerais sobre instalações para refrigeração de concreto — obras Brasileiras

3 CLIMA

O conceito de clima refere-se ao conjunto de condições meteorológicas – temperatura, pressão e ventos, umidade e chuvas – características do estado médio da atmosfera em uma região da superfície terrestre [5].

Dos vários sistemas de classificação propostos o mais usado é o de KOPPEN, baseado em medidas anuais e mensais de temperatura e pluviosidade.

Do ponto de vista do comportamento de uma estrutura de concreto o “clima”, normalmente é subentendido como sendo a temperatura.

Do ponto de vista da tecnologia do concreto, entretanto, o “clima” deve ser entendido com uma abrangência maior, pois sobre o concreto fresco atuam as condições de insolação, ventos, umidade, além da temperatura.

Assim é que por “clima quente” pode ser entendido [6] uma das seguintes situações:

- Elevada Temperatura do Ar;
- Baixa Umidade Relativa;
- Alta Velocidade do Vento.

Essas situações atuando, isolada ou conjuntamente, podem alterar as características do concreto fresco, durante a fase de manuseio e aplicação, anterior ao endurecimento.

Outra condição que atua no comportamento do concreto, é a amplitude térmica que pode ocorrer em um mesmo dia, ou período, podendo, as vezes, provocar danos superficiais no concreto.

De maneira geral, entretanto, as atenções se voltam para a temperatura da região da obra.

As Figuras 2, 3 e 4 ilustram as isotermas no período mais quente, e mais frio, bem como a média anual, no Brasil [7].



Figura 2 – Temperatura Média no Mês de Janeiro

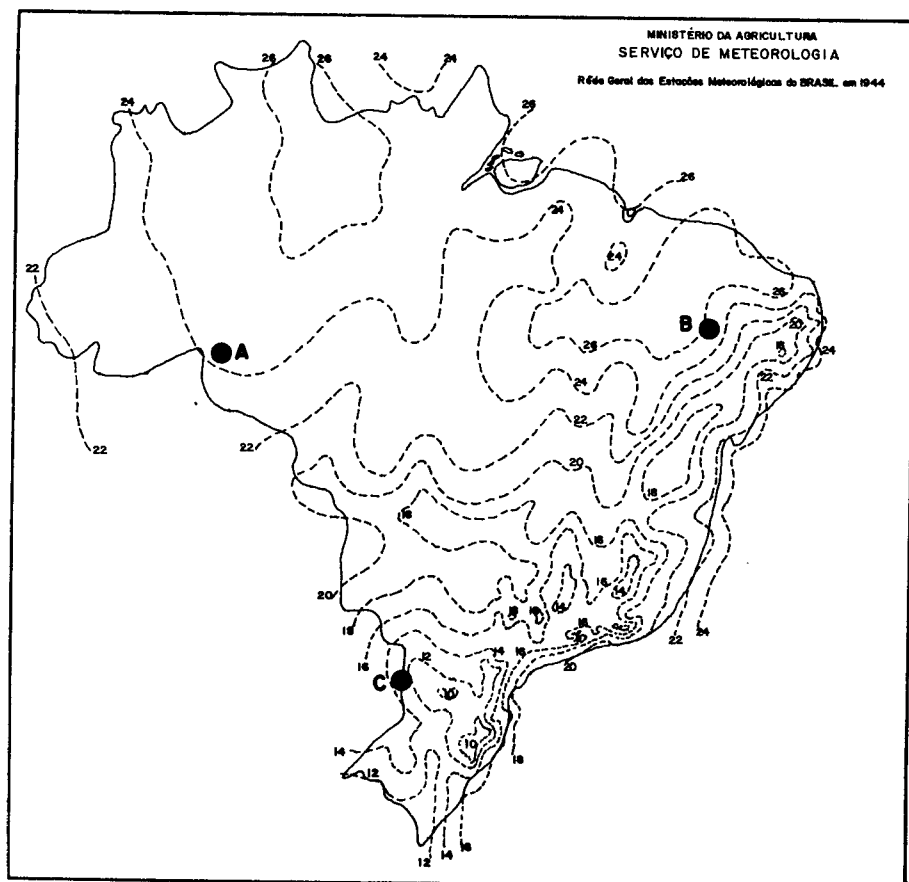


Figura 3 – Temperatura Média no Mês de Julho

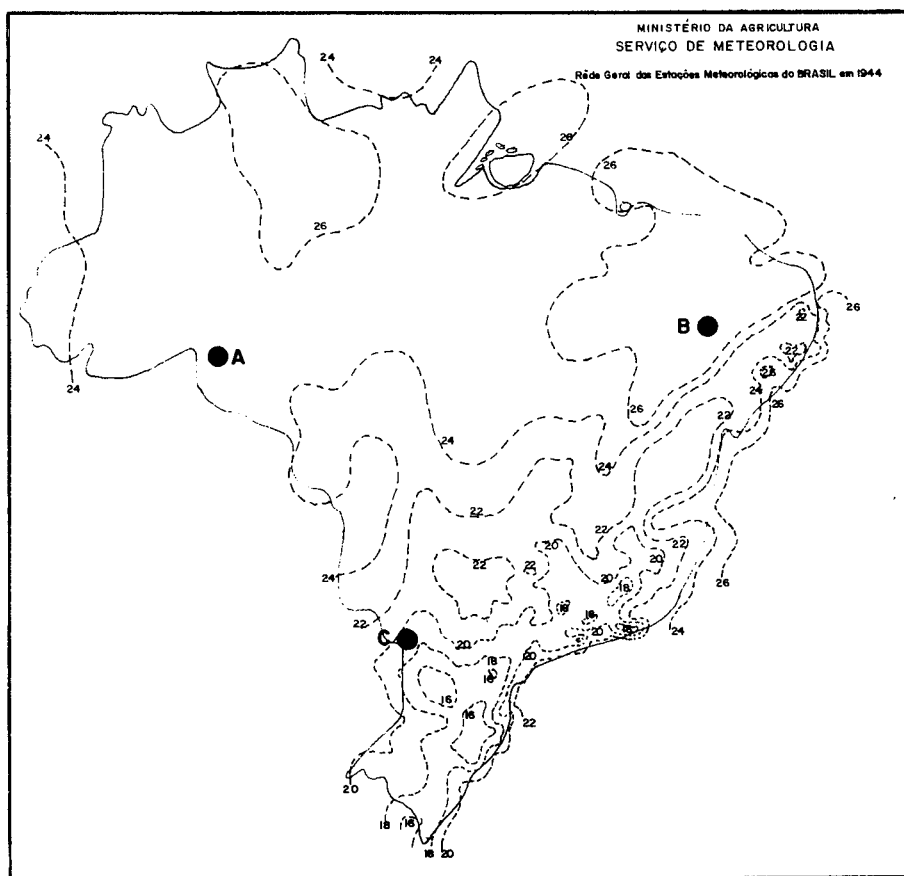


Figura 4 – Temperatura Média Anual

4 NECESSIDADE DO CONTROLE DE TEMPERATURA

4.1 GENERALIDADES

De maneira geral, quando nenhuma precaução é adotada, a temperatura do concreto, assim que aplicado nas formas, está pouco acima da média mensal do ambiente.

De outra forma, ainda se o cimento do concreto não gerasse calor durante a hidratação, particularmente durante os primeiros dias, não haveria necessidade de grandes precauções.

Ao se trabalhar, então, com concreto observa-se um histórico de temperatura como mostra a Figura 5.

Ao se efetuar uma concretagem, a reação de hidratação do cimento, sendo exotérmica, provoca a elevação da temperatura do concreto (de θ_l para $\theta_{\max}$ na Figura 5). Essa elevação atinge um valor máximo de temperatura ($\theta_{\max}$) e, posteriormente, quando a quantidade de calor gerado é menor que a extraída pela difusão para o ambiente (diz-se normalmente que "cessou" a hidratação) entra em declínio, tendendo à temperatura média do ambiente (θ_a).

Há então um gradiente de queda de temperatura ($\Delta\theta$) = $\theta_{\max} - \theta_a$ (na Figura 5).

O aumento inicial de temperatura origina tensões de compressão. Essa compressão, inicial, estando associada ao baixo valor do módulo de deformação (elasticidade) e à maior fluência, nas primeiras idades, não é acentuada, atingindo valor máximo quando a temperatura atingir o seu pico ($\theta_{\max}$).

A queda subsequente de temperatura, decorrente do processo de estabilização, vai provocar uma descompressão gradativa e nas idades mais avançadas, já com elevado valor do módulo de deformação, pode superar a capacidade resistente do concreto à tração, provocando a fissuração.

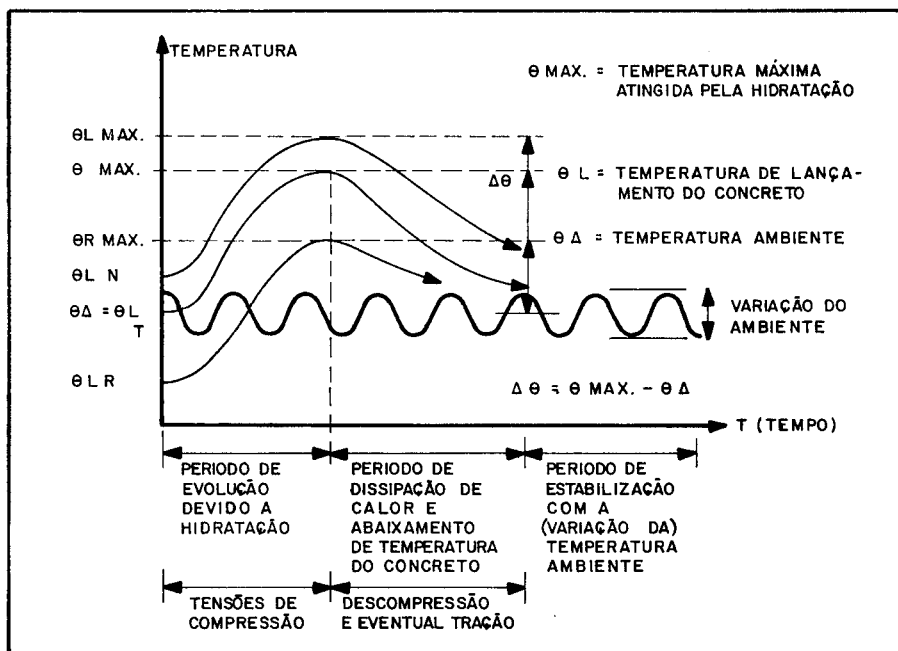


Figura 5 – Histórico de Desenvolvimento de Temperatura do Concreto

Os gradientes de evolução, e queda, da temperatura dependem de características da mistura, do cimento, das propriedades térmicas do concreto. O pico térmico ($\Theta_{\max}$) além de estar condicionado às características do concreto depende da temperatura de lançamento (Θ_L) e das dimensões da peça.

Essas condições podem ser observadas através das informações e dados colhidos durante as primeiras avaliações térmicas efetivadas pela CESP, Jupia [4].

A experiência consistiu em verificar, para “blocos” de mesmas dimensões e com o mesmo tipo (classe) de concreto, a influência da temperatura de colocação, (Θ_L) no desenvolvimento das temperaturas devido à hidratação, e na fissuração do “bloco” devido as tensões de origem térmica.

As informações são mostradas na Figura 6, onde pode ser observado que os concretos não refrigerados apresentaram maiores quedas de temperatura (e consequentemente mais fissuras). Os concretos com maior difusividade ($h_2 = 0,139 \text{ m}^2/\text{dia}$ – cascalhos de quartzito) iniciaram a queda de temperatura em idades menores que os respectivos concretos com menor difusividade

($h_2 = 0,072 \text{ m}^2/\text{dia}$ – britas de basalto) e consequentemente mais fissuras (que os respectivos pares).

Nota-se então a importância da temperatura de lançamento do concreto, no histórico e no comportamento da estrutura. Outro ponto de muita importância é o das condições ambientais, como se exemplifica a seguir.

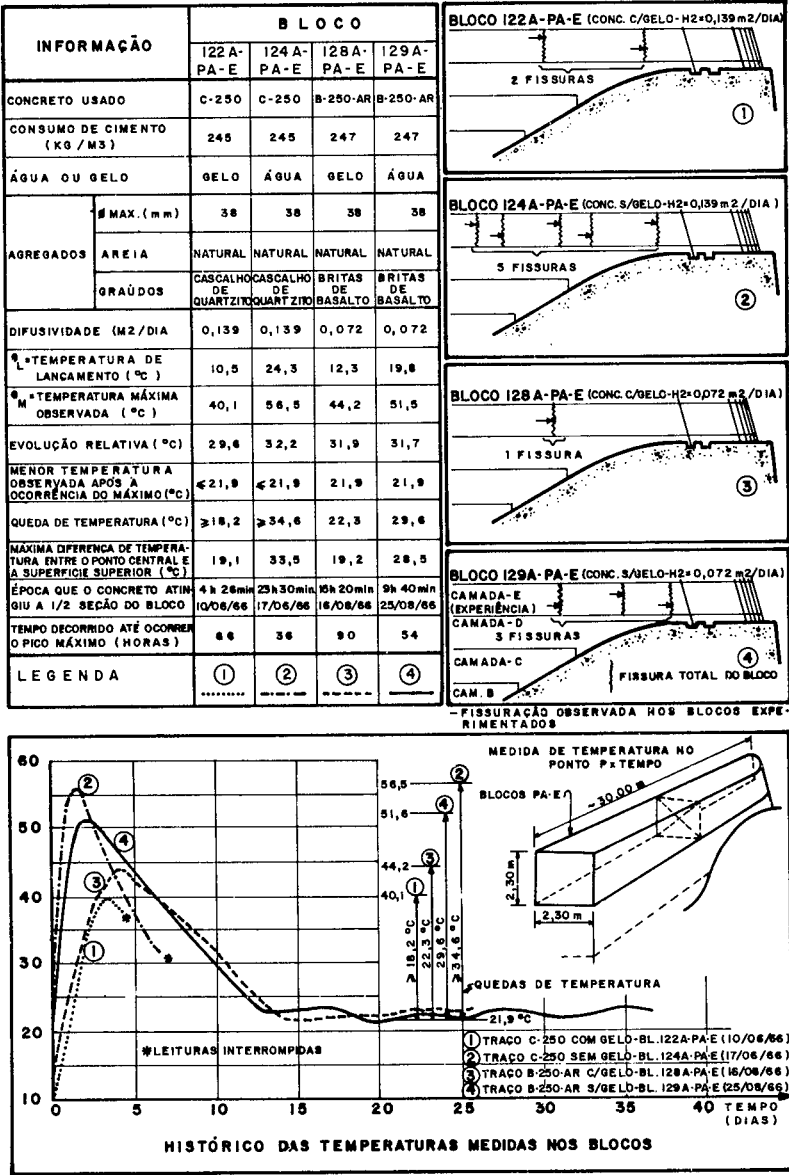


Figura 6 – Histórico das Temperaturas Medidas nos Blocos – Jupiá



Figura 7 – Instalação Pioneira para Fabricação de Gelo utilizado nos Ensaio de Pré-Resfriamento na UHE – Jupia – 1966

Estrutura do depósito de gelo feita inteiramente em madeira. Pilares de toras de eucalipto.

O equipamento para produção de gelo em escamas colocado na parte superior era uma unidade compacta premontada, autônoma e avaliada na fábrica.

Observando as Figuras 2, 3 e 4 e tomando as regiões representadas pelos pontos A, B, C, tem-se:

PONTO	REGIÃO	TEMPERATURAS MÉDIAS °C		
		VERÃO (JANEIRO)	INVERNO (JULHO)	ANUAL
A	PORTO VELHO (RONDÔNIA)	26	24	25
B	PIANCÓ (PARAÍBA)	26	26	26
C	FOZ DO IGUAÇU PARANÁ	26	13	19

Figura 8 – Pontos Representativos de Condições Climáticas

Nota-se, então, que ao lançar uma determinada classe de concreto, no verão, na região A, ter-se-á uma temperatura $\Theta_{LA} \equiv \Theta + \Theta_{AA}$ (sendo “ Θ ” o acréscimo de temperatura devido à temperatura dos materiais constituintes e da energia de mistura). Na região C, a mesma classe de concreto terá uma temperatura $\Theta_{LC} \equiv \Theta_{LA}$.

Ao se desenvolver o histórico de temperatura, como os concretos tem as mesmas características, as temperaturas máximas serão praticamente iguais ($\Theta_{\max A} \equiv \Theta_{\max C}$), entretanto ao se estabelecer o equilíbrio com o ambiente (Θ_{ambiente}) ter-se-á $\Theta_{\text{ambA}} (\equiv 25^\circ) > \Theta_{\text{ambC}} (\equiv 19^\circ\text{C})$ e dessa forma os gradientes de queda para se estabelecer o equilíbrio, serão:

$$\text{Região A: } \Theta_{\max}(A) - 25^\circ \equiv \Delta\theta_A$$

$$\text{Região C: } \Theta_{\max}(C) - 19^\circ \equiv \Delta\theta_C, \text{ donde } \Delta\theta_C = \Delta\theta_A + 6^\circ\text{C}$$

ou seja o gradiente de queda (que solicita o concreto) na região “C” (Fóz do Iguaçu) é maior que o da região A (Porto Velho), superando em 6°C . Esse acréscimo, no gradiente de queda de temperatura, equivale (ver comentários à frente – no item 4.7) a um acréscimo de aproximadamente $60 \mu\text{strain}$ (deformação específica) na solicitação do alongamento de tração.

Dessa forma, a necessidade de medidas minimizadoras dos problemas de origem térmica, em obras de concreto na região “C” é maior que em obras da região “A”.

Por outro lado, ao se observar as regiões “A” e “B” embora as temperaturas médias sejam praticamente iguais, sabe-se que as condições de insolação e umidade na região “B” (Piancó-Paralba), são mais prejudiciais ao concreto fresco, que as da região “A”.

Dessa forma, na aplicação do concreto fresco na região “A” poderá haver uma menor necessidade de precauções quanto às exigências do “clima quente” do que na região “B”.

É importante lembrar que os efeitos do “clima quente” no concreto fresco podem englobar.

- Aumento do teor de água;
- Aumento da tendência da perda de trabalhabilidade e a correspondente tendência de adição de água;
- Aumento de velocidade de pega proporcionando dificuldades no manuseio, acabamento e cura, aumentando a possibilidade de “junta fria”;
- Aumento da tendência de fissuração plástica;
- Aumento da dificuldade no controle de incorporação de ar.

No concreto endurecido o “clima quente” pode ter os seguintes efeitos.

- Redução da resistência devido ao aumento do teor de água e aumento do nível da temperatura;
- Aumento da tendência da retração por secagem;
- Redução da durabilidade;
- Redução da uniformidade do aspecto superficial.

4.2 CONDIÇÕES ESTRUTURAIS

As características, tipo e função da estrutura, a agressividade do meio e o grau de restrição interna ou externa ditam o controle necessário para a temperatura.

Estruturas do tipo gravidade que dependem da integridade estrutural quanto à segurança e estabilidade podem impor a inexistência de fissuras em certos planos de orientação.

Tanques de concreto não devem ter fissuras, de forma a impedir a lixiviação ou prevenir contra o ataque da armadura.

A quantidade de juntas verticais ou horizontais deve ser consistente com o projeto.

O projeto estrutural, na grande maioria das vezes, requer resistências estabelecidas à 28 dias, mesmo quando é notório que os carregamentos sejam impostos a idades bem maiores. Isso faz com que se necessite um teor de cimento maior do que seria suficiente e conveniente. Decorre disso, um pico térmico mais alto, e consequentemente uma potencialidade maior, de fissuração.

Dessa forma, o conceito de que uma estrutura de concreto com alta resistência é impermeável e/ou durável passa por um questionamento, devido à potencialidade da fissuração.

Para integridade da estrutura esse alto consumo de cimento pode então exigir precauções contra a fissuração.

4.3 DIMENSÕES DA ESTRUTURA

A estrutura de concreto tendo dimensões reduzidas, o calor gerado durante a hidratação, pode difundir-se para o ambiente e o pico térmico pode não ser elevado. Entretanto à medida que as dimensões da estrutura aumentam, dificulta-se a dissipação do calor para o ambiente, o pico térmico ($\theta_{\max}$) torna-se mais elevado, consequentemente aumenta-se o gradiente de queda

($\Delta\theta$) (para o equilíbrio com o ambiente), e em decorrência a potencialidade de fissuração é maior.

A Figura 9, [8] ilustra o tempo necessário para se atingir 90% do resfriamento de uma laje de concreto (espessura variável) sobre uma fundação.

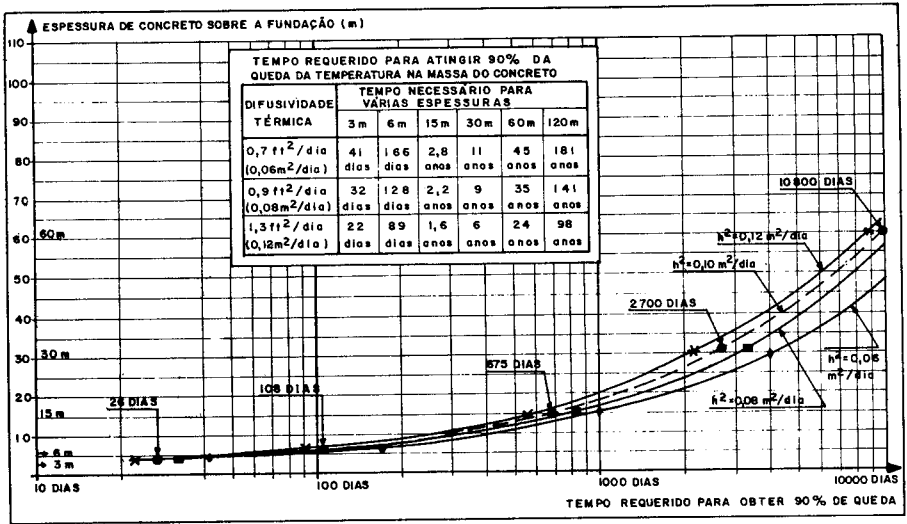


Figura 9 – Tempo Necessário para se Atingir 90% do Resfriamento [8]

4.4 RESTRIÇÃO

Um corpo sólido que possa se movimentar livremente, expandindo ou contraindo, com variações associadas às alterações de temperatura, não desenvolve tensões ou deformações de tração. Entretanto, quando essa solicitação (redução da temperatura) ocorre, e a livre movimentação é impedida, quer seja parcial ou totalmente, como ocorre entre um “bloco” de concreto sobre a fundação, ou entre elementos estruturais contíguos, ou internamente, ocorrem deformações e tensões de tração.

Uma laje ou bloco de concreto lançado sobre a rocha de fundação, apresenta uma restrição total (100%), junto à fundação. Entretanto esse grau de restrição diminui consideravelmente à medida que a estrutura (o bloco) aumenta com a altura.

A Figura 10 [9], ilustra essa conceituação.

STRAIN CAPACITY TESTS

TABLE 1

VARIATION OF FOUNDATION RESTRAINTS WITH HEIGHT OF CONCRETE

HEIGHT OF CONCRETE ABOVE FOUNDATION	REDUCTION IN FOUNDATION RESTRAINT - %
0	0
0.1 H	35
0.2 H	70
0.3 H	90
0.4 H	95
0.5 H	100

NOTE Table is based on finite element studies of temperature and stress strain data obtained from Dwarshak Dam. In these studies and others made of Libby Dam percent restraint of rock foundation and of old concrete on the first lift of concrete placed above was found to range from 60 to 100 %.

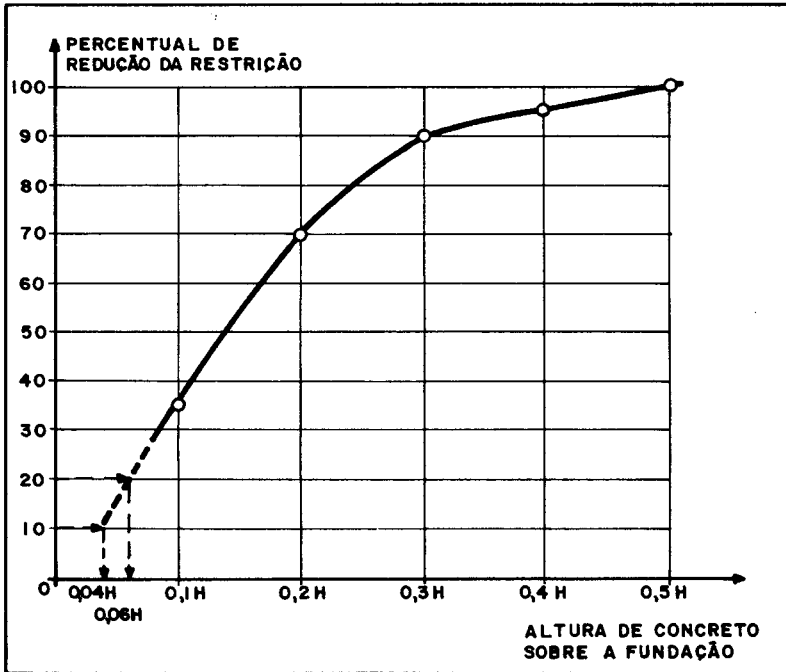


Figura 10 – Redução da Restrição sobre a Fundação [9]

De maneira geral as fissuras de origem térmica, observadas nas estruturas originam-se a partir da camada junto à fundação, ou a partir de camadas lançadas sobre concretos com elevada idade (elevado módulo de deformação).

4.5 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO CONCRETO

4.5.1 Calor e Curva Adiabática de Evolução de Temperatura

A resistência requerida pelo projeto, as condições de agressividade do meio, os critérios de durabilidade, e as características dos agregados e do processo de colocação do concreto, governam o conjunto de teores de água e cimento da mistura.

A quantidade e o tipo de aglomerante utilizado determinam o potencial de temperatura que poderá atingir a massa de concreto.

A Figura 11 [10] ilustra um conjunto de curvas adiabáticas de evolução de temperatura (em termos de evolução unitária de temperatura), para vários teores de material pozolânico e vários tipos de cimento.

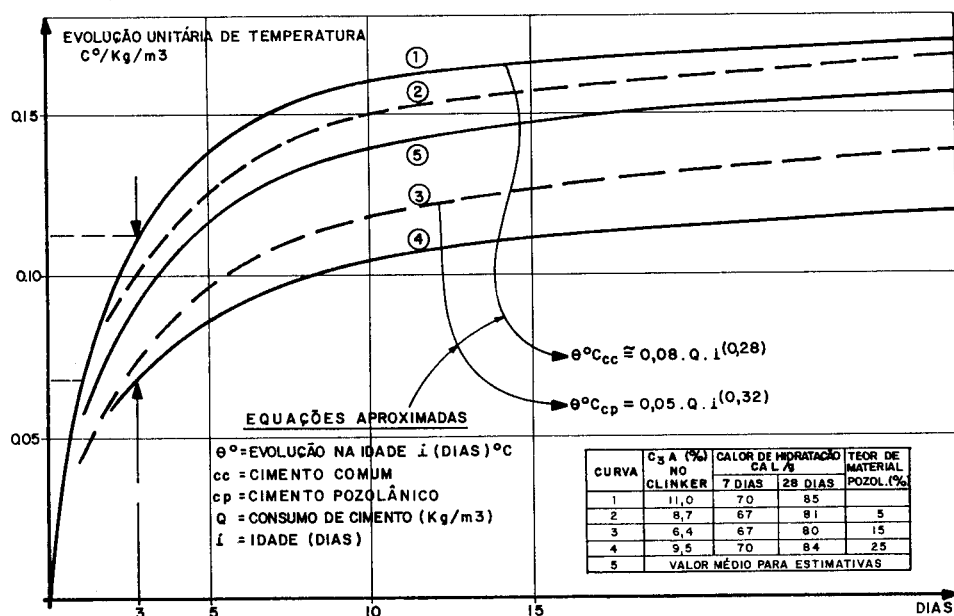


Figura 11 – Evolução (Unitária) de Adiabática Temperatura do Concreto [10]

Pelas curvas da Figura 11, evidência-se a importância do uso de material pozolânico para a redução do calor desenvolvido durante a hidratação.

De outra forma, ainda, através da Figura 10, nota-se que aproximadamente 60 a 70% do calor desenvolvido (correspondente ao calor gerado à idade convencional de 28 dias) ocorre até o terceiro dia a partir do início da hidra-

tação. A evolução adiabática da temperatura pode ser expressa sob uma equação do tipo $y = a.x^b$, com razoável aproximação como ilustrado na Figura 11.

4.5.2 Coeficiente de Expansão Térmica (α)

O coeficiente de expansão térmica é entendido como sendo a variação linear de um comprimento unitário, causada por uma variação unitária de temperatura, ou a variação volumétrica de um volume unitário também causado por uma variação unitária de temperatura. É expresso normalmente em termos de deformação específica por “°C”.

A Figura 12 [3] [10] [11] fornece um conjunto de valores característicos de concretos de algumas obras.

4.5.3 Calor Específico (C)

O calor específico é entendido como sendo a quantidade, de calor, necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa.

Para concretos dentro das faixas usuais de massa específica, há poucas variações decorrentes das características dos agregados, temperatura e grau de saturação.

A Figura 12 fornece também um conjunto de valores de calor específico de vários concretos.

4.5.4 Condutividade Térmica (K_t)

Condutividade térmica é a propriedade que traduz a habilidade (facilidade) do material em conduzir calor e é entendida com a razão do fluxo de calor para um gradiente de temperatura.

Valores usualmente encontrados para os concretos, são vistos na Figura 12.

4.5.5 Difusividade Térmica (h^2)

A difusividade térmica traduz a maior ou menor facilidade com que o concreto permite a alteração de temperatura e numericamente é expresso por $h^2 = \frac{K_t}{P.C}$. A Figura 12 fornece também um conjunto de valores dessa característica.

OBRA	PAÍS	TIPC DC AGREGADO	COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) $\propto \times 10^{-6}$	CONDUTIVIDADE TÉRMICA $\text{Kcal/m.h.}^{\circ}\text{C}$ K_t	CALOR ESPECÍFICO $\text{Kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ C	DIFUSIVIDADE TÉRMICA m^2/DIA h^2	MASSA ESPECÍFICA t/m^3
Ilha Solteira	Brasil	Quartzito	11,0	3,45	0,199	0,161	2,62
Ilha Solteira	Brasil	Quartzito e Basalto	10,0	1,85	0,205	0,086	2,50
Água Vermelha	Brasil	Quartzito e Basalto	9,5	1,72	0,210	0,077	2,56
Porto Primavera	Brasil	Quartzito	12,3	3,02	0,213	0,144	2,35
Sobradinho	Brasil	Quartzito	10,0	2,96	0,210	0,134	2,50
Tucuruí	Brasil	Metagrauvaque Metasedimento	10,0	3,10	0,220	0,116	2,50
Itumbiara	Brasil	Basalto	9,0	1,78	0,241	0,071	2,50
Itaipu	Brasil – Paraguai	Basalto	8,1	1,55	0,215	0,065	2,66
Hoover	E.U.A	Calcário e Granito	9,5	2,48	0,225	0,106	2,50
Grand Coulee	E.U.A.	Basalto	7,9	1,61	0,231	0,065	2,53
Hungry Horse	E.U.A.	Arenito	11,2	2,59	0,232	0,110	2,41
Yellowtail	E.U.A.	Calcário e Andesita	7,7	2,26	0,239	0,094	2,44
Dworshak	E.U.A	Granito e Gnaiss	9,9	2,00	0,220	0,089	2,50
Libby	E.U.A	Quartzito	11,0	3,45	0,220	0,149	2,56
Capanda	Angola	Arenito	8,4	2,30	0,225	0,100	2,45

Figura 12 – Características Térmicas e Massa Específica de Vários Concretos

4.6 CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DO CONCRETO

4.6.1 Deformação Lenta

O concreto em seu estado ainda plástico absorve variações de volume ou de comprimento sem o desenvolvimento de tensões.

A medida que o concreto prossegue com a hidratação do cimento, o material passa do estado plástico e apresenta comportamento elástico, até que, por uma solicitação maior que a sua capacidade, se rompa.

Nessa fase a deformação que decorre de uma solicitação aplicada, lhe é proporcional. Entretanto o concreto, como vários outros materiais, é caracterizado por apresentar uma considerável fluência, que é o fenômeno de deformação com o tempo, sob carga constante. (ver Figura 13 [11] [12]).

4.6.2 Capacidade de Alongamento

A capacidade de alongamento (ou de deformação) do concreto é entendida como sendo a máxima deformação que o mesmo apresenta, quanto submetido à uma solicitação de tração.

Tendo em vista a fluência do concreto, quando o carregamento for lento, semelhante ao que ocorre com o resfriamento da massa de concreto (ver Figura 9) a capacidade de alongamento é superior à obtida por uma solicitação rápida (resfriamento rápido ou superficial).

A capacidade de alongamento sob carregamento lento pode, então, ser estimada a partir dos valores de ensaio rápido de flexão (executados com maior facilidade), considerando a capacidade de alongamento do ensaio rápido e a fluência, como sugere a expressão I [9] [13].

$$(I) \quad \epsilon_F = \frac{\sigma_{TF}}{E_{CF}} + \frac{\sigma_{TI} + \sigma_{TF}}{2} \times f_e \quad \text{onde}$$

ϵ_F = Capacidade de alongamento na idade final (carregamento lento)

σ_{TF} = Módulo de ruptura na idade final

E_{CF} = Módulo de deformação (à compressão) na idade final

$$\frac{\sigma_{TF}}{E_{CF}} = \epsilon_e = \text{Capacidade de alongamento na idade final (carregamento rápido)}$$

σ_{TI} = Módulo de ruptura na idade em que se procede o carregamento inicial.

f_e = Fluência específica entre as idades inicial e final

Dessa forma nota-se que a capacidade de alongamento sob o carregamento lento é obtida pela capacidade de alongamento sob carregamento rápido, acrescida de uma parcela devido a fluência.

A Figura 14 mostra um conjunto de curvas referentes a concretos com agregados de tamanho máximo 76 mostrando o aumento devido a fluência, no carregamento lento.

4.7 CORRELACIONAMENTOS

A partir do instante (ver Figura 5) que se inicia o resfriamento da estrutura de concreto para se estabilizar com a temperatura ambiente, se estabelece um processo de solitação, lento, de deformações de tração que pode ser, de maneira simplificada, equacionada da seguinte forma:

$$(II). \epsilon_i = \alpha \Delta \theta_i$$

sendo ϵ_i = alongamento de tração (devido ao resfriamento), no instante "i"

α = coeficiente de expansão térmica do concreto,

$\Delta \theta_i$ = gradiente térmico de redução de temperatura (resfriamento), no instante "i".

A condição suportável pelo concreto será superada, e ocorre a fissuração quando, $(\epsilon_{\max} = \epsilon_i) \geq \epsilon_F$ sendo ϵ_F a capacidade de alongamento, como citado no item 4.6.2. Nessa situação, pode-se rearranjar a equação para (uma condição adiabática).

$$(III) \epsilon_{\max} = F_R \cdot \alpha \cdot (\theta_L + \Delta \theta_{\text{eh}} - \theta_A)$$

com

F_R = Condição de restrição (ver figura 10);

θ_L = Temperatura de lançamento do concreto;

$\Delta \theta_{\text{eh}}$ = Gradiente elevação da temperatura devido a hidratação;

θ_A = Temperatura ambiente.

Em condições adiabáticas, $\Delta \theta_{\text{eh}}$ é a temperatura mostrada pela elevação adiabática (ver Figura 11). Entretanto, em condições reais, de aplicação prática, há uma alteração devido a troca de calor com o ambiente, quando então é considerada a Difusividade (h^2), que pode interferir no valor o $\theta_{\max}$ e na velocidade de troca de calor (ver Figura 6).

Para que se tenha uma estrutura com segurança quando a fissuração de origem térmica $\frac{\epsilon_F}{\epsilon_{\max}} \geq f_s$, ou seja, a relação entre a capacidade de alongamento (ϵ_F) e o alongamento máximo de tração ($\epsilon_{\max}$) deve ser superior ao coeficiente de segurança " f_s " estabelecido no projeto.

Os cálculos e simulações elaborados com auxílio de computadores permitem avaliar esta situação $\frac{\epsilon_F}{\epsilon_{max}}$ para qualquer ponto da estrutura e a qualquer instante do histórico de desenvolvimento da temperatura.

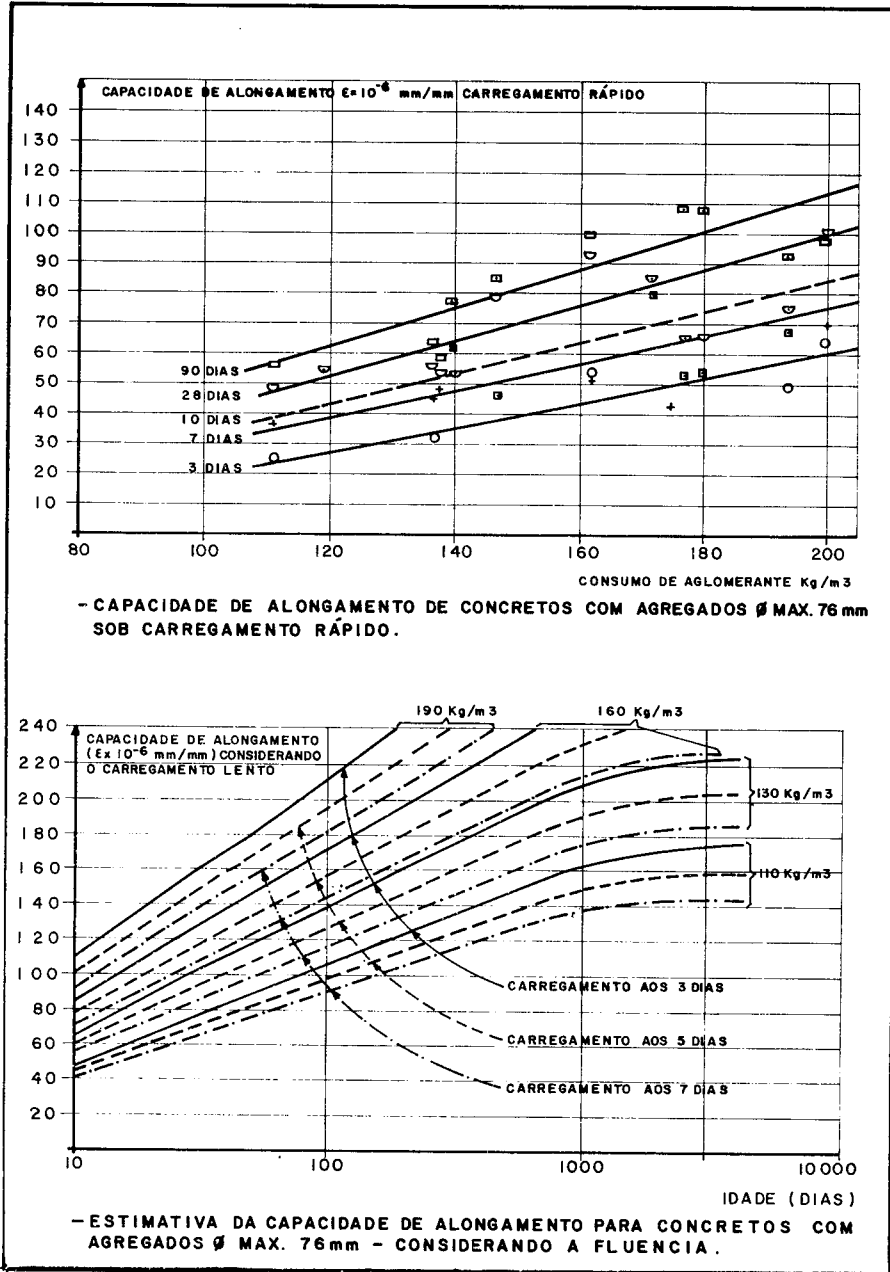


Figura 14 – Capacidade de Alongamento de Concretos com Agregados de Tamanho máximo 76 mm.

5 AVALIAÇÕES DE SITUAÇÕES TÍPICAS DE CONCRETAGENS

Para as simulações apresentadas neste item adotou-se a situação do clima da região "C" "Fóz do Iguaçu" (ver Figuras 2, 3 e 4 do item 3), apresentando:

PONTO	REGIÃO	TEMPERATURAS MÉDIAS °C		
		VERÃO	INVERNO	ANUAL
C	– Fóz do Iguaçu Paraná	26	13	19
θ_L = Temperatura de Lançamento do Concreto		28	21	–
θ_A = Temperatura Média para Equilíbrio		–	–	19
θ_F = Temperatura Média da Fundação		–	–	19
θ_{Acura} = Temperatura da Água de Cura		23	10	–

Figura 15 – Simulações de Situações de Concretagem

Para essas simulações foram consideradas as seguintes características do concreto:

- Consumo de cimento, 280 Kg/m³ e 320 Kg/m³
- Tipo de cimento – Portland Pozolânico, sendo que utilizou-se a curva (Ver Figura 11) do tipo – $\theta_{cp} \text{ °C} = 0,05 \cdot Q \cdot i^{(0,32)}$
- Difusividade = $h^2 = 0,10 \text{ m}^2/\text{dia}$

- Coeficiente de expansão térmica $=\alpha = 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- Restrição $= F_R = 1,0$ - camadas junto à fundação
- Intervalos de lançamento entre camadas (IL) = 3,7 e 10 dias
- Altura das camadas - (H.L) 1,0 e 1,5 m.

Admitiu-se para esse exemplo um fator de segurança $f_s = 1,1$ e $\epsilon_F \equiv 260 \mu\text{strain}$ ($260 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$), para as duas classes de concreto, para simplicidade dos cálculos.

Dessa forma os alongamentos de tração para garantir a integridade da estrutura não devem superar a

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_f / f_s = \frac{260}{1,1} = 236 \mu\text{strain}$$

Tendo sido adotado $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}/^{\circ}\text{C}$ tem-se que o gradiente de queda $\Delta\theta$, deve ser inferior a:

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{236 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}}{10 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}/^{\circ}\text{C}} = 23,6^{\circ}\text{C}$$

Sendo θ_A = temperatura média de equilíbrio = 19°C , $\theta_{\max} = 23,6^{\circ} + 19^{\circ}\text{C} = 42,6^{\circ}\text{C}$, ou seja a temperatura máxima, $\theta_{\max}$, atingida pelo concreto deverá ser inferior a $42,6^{\circ}\text{C}$, para que a estrutura seja considerada segura.

Através de cálculos, que determinam a distribuição da temperatura do concreto na massa do concreto, com as condições de contorno variando com o tempo, através do método Schmidt [14] (Nota: outros processos podem ser adotados) chega-se ao conjunto de dados mostrados na figura 16.

De uma forma simplificada, o método Schmidt assume que a temperatura θ_2 de um volume unitário em um instante qualquer, depende não só de suas condições térmicas, mas também das temperaturas θ_1 e θ_3 dos elementos adjacentes, que no instante " Δt " tem se:

$$(IV) \theta_{L, \Delta t} = \frac{\theta_1 + (M-2) \theta_2 + \theta_3}{M} \text{ sendo}$$

$$M = \frac{\Delta x^2}{h^2 \cdot \Delta t}$$

Δx = Intervalo de espaço na camada de concretagem

Δt = Intervalo de tempo

h^2 = Difusividade

O conjunto de informações fornecidas na Figura 16, é comentado no item 6.

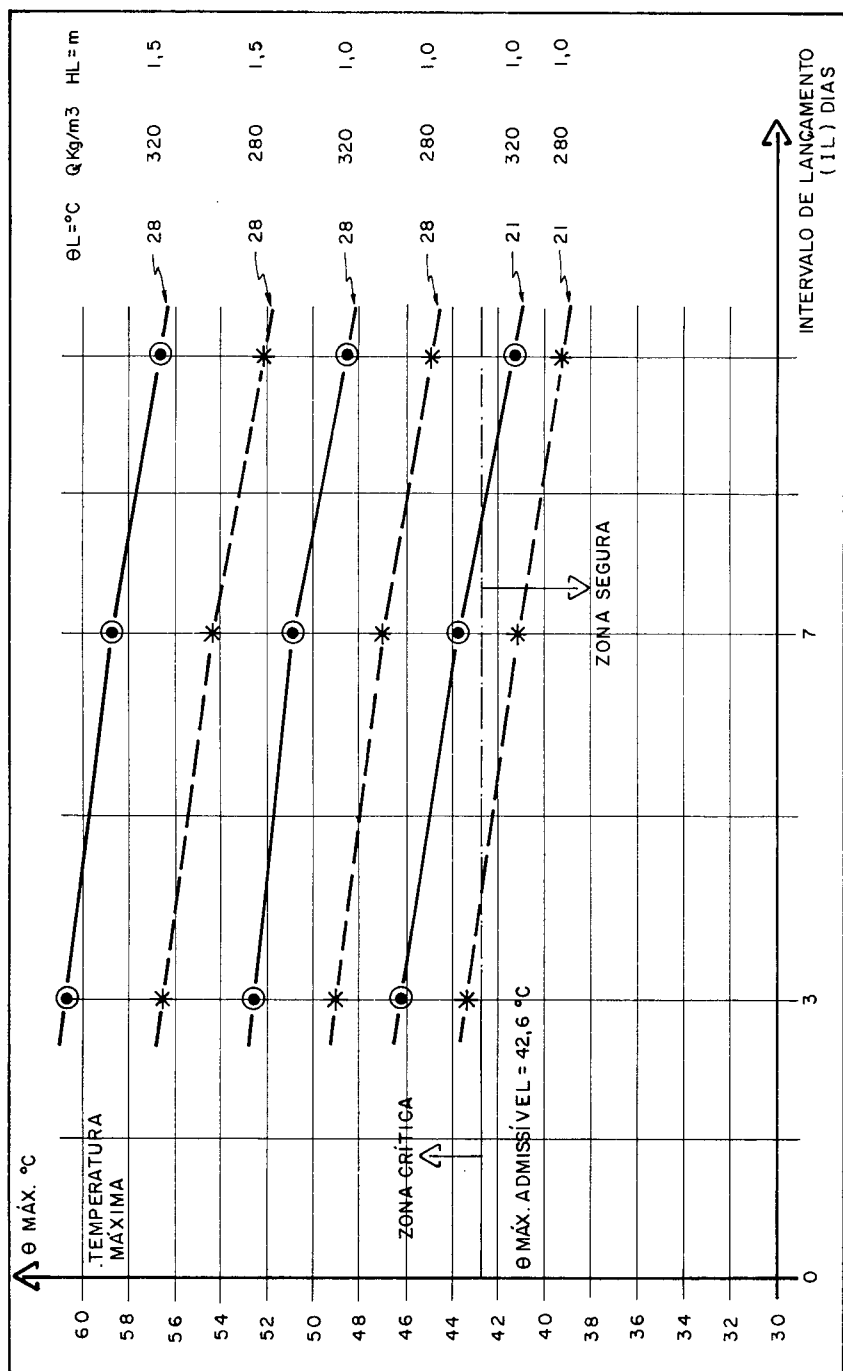


Figura 16 – Dados de uma Simulação da Temperatura (θ_{max}) máxima para várias situações de Concretagem – Para C – Foz Iguaçu

6 MEDIDAS MINIMIZADORAS DOS PROBLEMAS DE ORIGEM TÉRMICA

As medidas preventivas, tecnicamente disponíveis, podem ser de pequeno vulto e custo, quando as condições e materiais são favoráveis, ou chegar a custos elevados, quando o conjunto de materiais e condições são desfavoráveis.

Para discussão dessas medidas é importante ter em consideração.

. A equação (III) - $\epsilon_{\max} = F_R \cdot \alpha \cdot (\theta_L + \Delta\theta_{eh} - \theta_A)$

. As informações da figura 16

As medidas preventivas tecnicamente disponíveis são citadas a seguir.

6.1 MOLDAR A ESTRUTURA EM BLOCOS DE PEQUENAS DIMENSÕES

Isso envolve as considerações de projeto na conceituação do modelo estrutural. Requer o equacionamento do espaçamento entre as juntas de contração, a existência de galerias que permitam a difusão do calor gerado.

6.2 MOLDAR A ESTRUTURA EM CAMADAS DE PEQUENA ALTURA

Essa medida tem seu efeito mostrado na Figura 16, quando se comparam as concretagens com camadas de HL = 1,0m, e HL = 1,5 m. Nota-se que a redução da altura da camada de HL = 1,5m, para 1,0 m diminui a temperatura do pico máximo ($\theta_{\max}$) de aproximadamente 6 a 7°C (nota) **

6.3 EXECUTAR AS CONCRETAGENS DAS CAMADAS A INTERVALOS DE TEMPO, MAIS ESPAÇADOS.

Pela Figura 16, nota-se que ao espaçar as retomadas de concretagens há uma redução no pico máximo ($\theta_{\max}$) de temperatura (nota)**.

** - Nota: Essas alternativas não apresentam o mesmo desempenho quando se utiliza concreto pré-restriado

Essa medida conta, entretanto, com uma componente antagônica que é o aumento relativo da restrição (F_R) entre camadas, devido à evolução do módulo de deformação e redução da fluência específica (f_e) como mostra a Figura 13.

Dessa forma essa medida, embora traga uma redução no pico térmico (θ_{max}) não é tão salutar sob o ponto de vista elástico-resistente global da estrutura.

6.4 REDUZIR A RESTRIÇÃO (F_R)

A redução da restrição (F_R – ver equação [III]) é uma medida possível teoricamente, porém pouco viável do ponto de vista prático.

Significaria assentar, por exemplo, a estrutura sobre uma fundação com maior deformabilidade (baixo módulo de deformação).

A pouca viabilidade desta medida decorre de que normalmente o material da fundação é o mesmo que se utiliza para produzir agregados e consequentemente, duro e resistente e de módulo de deformação semelhante ou superior ao do concreto.

Essa medida é viável, por exemplo, quando se constrói um bloco de concreto sobre as cabeças (deformáveis) de estacas, ou sobre solo ou areia.

6.5 UTILIZAR AGLOMERANTE DE REDUZIDO CALOR DE HIDRATAÇÃO

O uso de aglomerante de reduzido calor de hidratação, implica em uma menor quantidade de calor gerado pela mistura (ver Figura 11) e consequentemente um pico térmico menor, o que decorre um menor gradiente de temperatura.

6.6 UTILIZAR MATERIAL POZOLÂNICO

O emprego de material Pozolânico, ativo e de boa qualidade proporciona, de forma geral, uma redução da quantidade de calor gerado, como se evidencia pelas equações das curvas da Figura 11.

6.7 UTILIZAR CONCRETOS COM AGREGADOS DE TAMANHO MÁXIMO

O emprego de concretos com agregados de tamanho máximo para um determinado nível de resistência (ou outra propriedade mecânica) significa uma redução no consumo de aglomerante (devido ao menor teor de água necessário para a mistura).

6.8 UTILIZAR CONCRETOS COM MAIOR CAPACIDADE DE ALONGAMENTO (ϵ_F)

O emprego de concretos com elevada capacidade de alongamento significa (Ver equação II) suportar maior solicitação térmica.

Essa medida técnica não deve, entretanto, ser obtida como aumento do teor de cimento.

6.9 UTILIZAR CONCRETOS COM MENOR TEOR DE AGLOMERANTE (Q)

O emprego de concretos com baixo teor de aglomerante pode ser conseguido com a otimização da propriedade mecânica solicitada em projeto e/ou pela utilização da evolução da propriedade mecânica (por exemplo a evolução da resistência), observada à longas datas. Isso significa por exemplo, considerar a resistência de projeto à idade de 90 ou 180, ou 360 dias em lugar do tradicional 28º dia.

As medidas citadas no itens 6.5, 6.6 e 6.7 bem como a deste item podem ser comparadas quando se observa as diferenças mostradas na Figura 16, para os concretos com $Q = 280 \text{ kg/m}^3$ e $Q = 320 \text{ kg/m}^3$.

Nota-se que ao passar o consumo de 320 Kg/m^3 para 280 Kg/m^3 há uma redução de aproximadamente 4°C no pico térmico ($\theta_{\max}$).

Deve ser salientado que ao se procurar otimizar o conjunto de propriedades do concreto, é importante que obtenha um máximo de capacidade de alongamento (ϵ_F) com um mínimo de consumo de aglomerante (Q), ou seja, com um mínimo de calor gerado, e consequentemente menor ($\theta_{\max}$) pico térmico.

6.10 UTILIZAR CONCRETOS COM MENOR DIFUSIVIDADE (h^2)

A utilização de concretos com menor difusividade significa uma difusão mais lenta e uma potencialidade menor de fissuração.

Isso pode ser notado na Figura 6, através das experiências efetuadas pela CESP em Jupia [4] ao se comparar as curvas 1 ($h^2 = 0,139 \text{ m}^2/\text{dia}$) e 3 ($h^2 = 0,072 \text{ m}^2/\text{dia}$) ou 2 e 4, e os respectivos panoramas de fissuração ocorridos.

6.11 APROVEITAR DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTES

O lançamento do concreto na época das temperaturas (θ_L) mais baixas, proporciona a redução de picos térmicos (θ_{max}) também mais baixos.

Isso pode ser observado pelas informações da Figura 16.

6.12 UTILIZAR O ISOLAMENTO NO CONCRETO

Essa técnica consiste em isolar a massa de concreto proporcionando um resfriamento controlado após o pico térmico (θ_{max}).

Isso significa, de uma certa forma, uma difusão mais lenta, de forma semelhante ao que se propicia, com o uso de concretos com menor difusividade (Ver Figura 6).

6.13 UTILIZAR O PÓS-RESFRIAMENTO NO CONCRETO

O controle da temperatura do concreto pode ser feito eficazmente pela circulação de um líquido à baixa temperatura (geralmente água), por meio de serpentinas constituídas por tubos de paredes finas que são deixadas embutidas no concreto.

O calor removido durante os primeiros dias, após o lançamento, vai reduzir o pico inicial de temperatura, diferindo e modificando o histórico de desenvolvimento de temperatura, como indica a Figura 17.

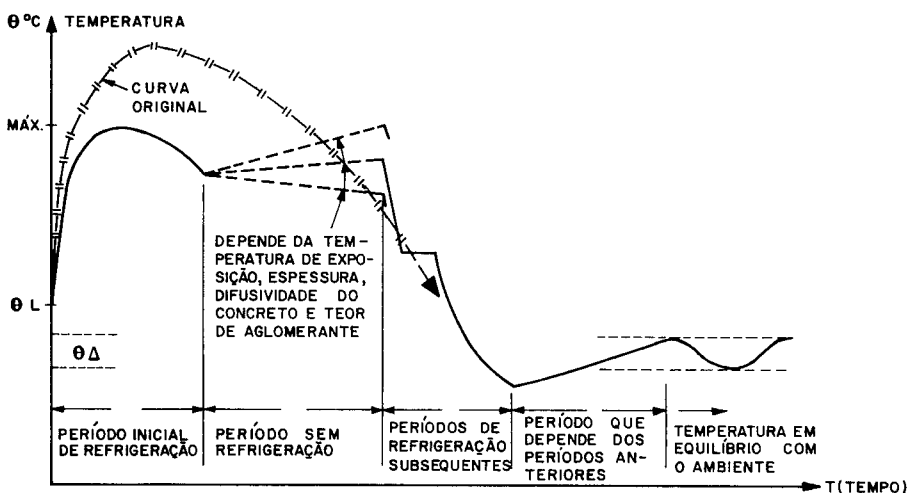


Figura 17 – Histórico de Temperatura do Concreto, com a Aplicação do Pós-Resfriamento.

O sistema acelera a remoção de calor (e a consequente variação volumétrica) durante as primeiras idades quando o módulo de deformação é relativamente baixo.

A duração do período inicial de refrigeração, normalmente é de duas a seis semanas. A velocidade de refrigeração (em graus/hora ou graus/dia) é menor nos períodos subsequentes (ver Figura 17) que no período inicial, visto que no início (Ver Figura 11) há a maior quantidade de geração de calor.

A tubulação a ser usada para as serpentinas deve ser de parede fina e de material que permita troca rápida de calor.

Por razões práticas as serpentinas tem sido colocadas sobre a fundação e/ou sobre as juntas horizontais de construção sendo que nessa situação o distanciamento vertical é o da altura da camada.

O espaçamento horizontal, o comprimento da tubulação, tempo de duração do resfriamento, são resultantes de um dimensionamento com base no modelo mostrado nas figuras 18 e 19 sendo que as características térmicas e do fluxo refrigerante são interrelacionadas pela equação [V]:

$$[V] : \frac{h^2 t}{D^2} = X \cdot \frac{K_t \cdot L}{C_a \cdot \Theta_a \cdot q_a}$$

h^2 = Difusividade do concreto;

t = tempo de duração do resfriamento;

D = Diâmetro da área de atuação;

k_t = Condutividade do concreto;

L = Comprimento da tubulação;

C_a = Calor específico do líquido;

Θ_a = Massa específica do líquido;

q_a = vazão do líquido.

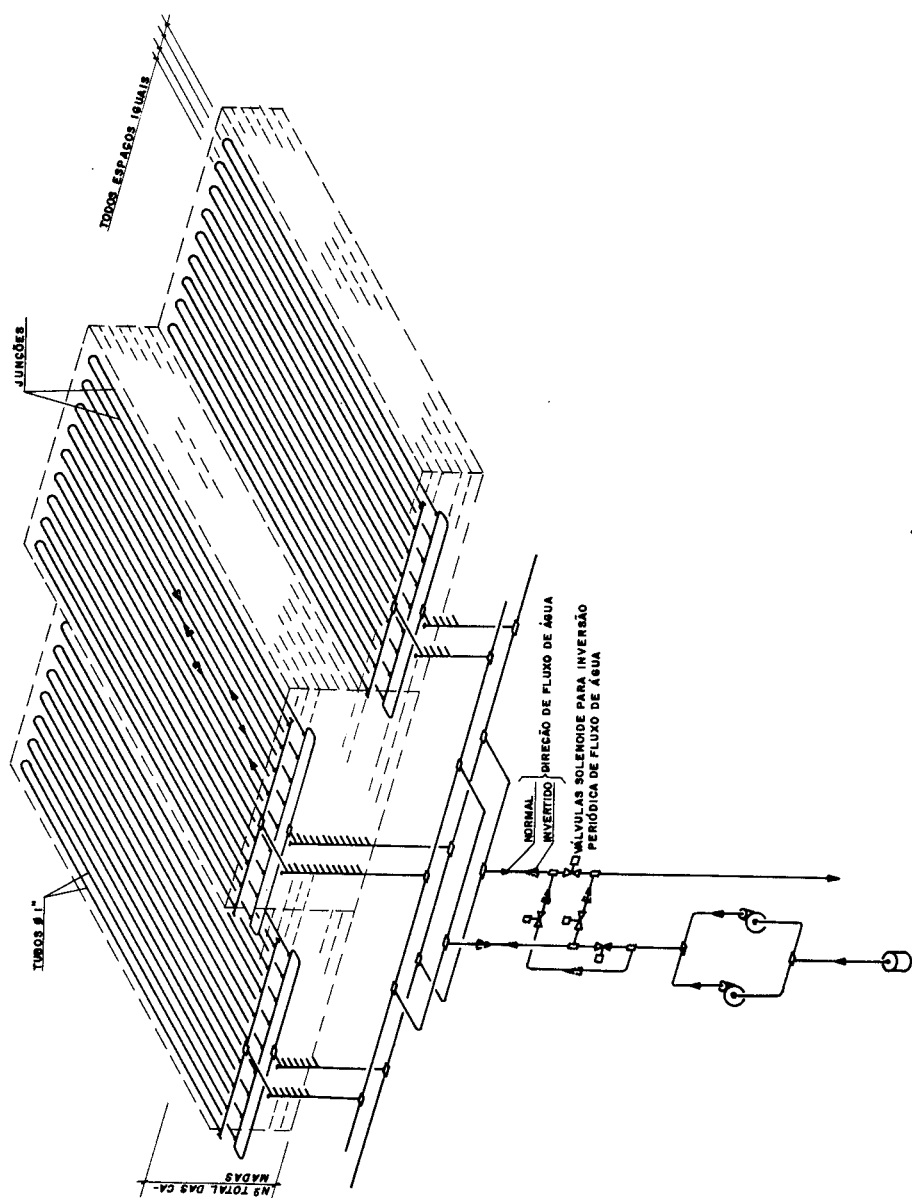


Figura 19 – Modelo Teórico para Cálculo da Atuação do Pós-Resfrição [14] [15]

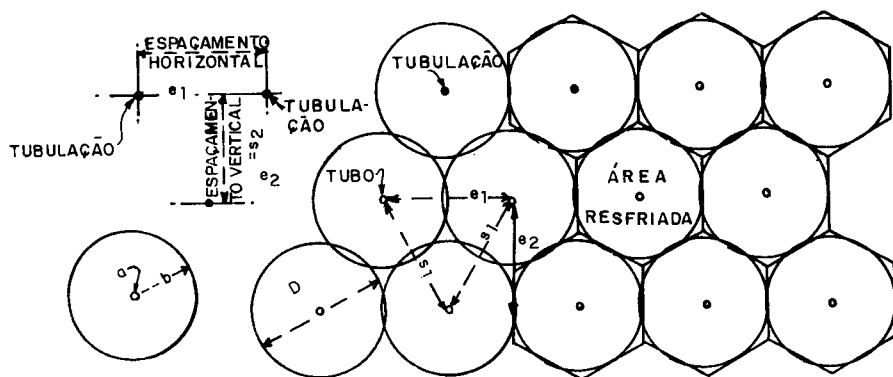


Figura 18 – Esquema de Tubulação para Pós-Resfriamento do Concreto

6.14 UTILIZAR O PRÉ-RESFRIAMENTO

Verificando a Figura 16, nota-se que a medida que se reduz a temperatura de lançamento (θ_L) reduz-se a θ_{max} e por conseguinte o risco de fissuração.

A cada 6°C de diminuição da temperatura θ_L , abaixo da temperatura ambiente (θ_A) obtém-se aproximadamente uma redução de 3°C [16] na temperatura máxima (θ_{max}) que pode ser atingida pelo concreto. Isto pois nessa situação ocorre um fluxo de calor do ambiente para a massa do concreto até que se inverta o processo.

Além dessa vantagem tem-se que a cada 1°C de diminuição na temperatura ' θ_L ' do concreto corresponde à aproximadamente, 0,3% de redução no teor de água de mistura (e em decorrência no cimento, para atender as propriedades) [10] [11] [17].

Decorre dessa vantagem, outras vantagens adicionais:

- A redução proporcional do teor de aglomerante (para um mesmo nível de propriedade mecânica) e por conseguinte uma redução no θ_{max} ;
- A uniformidade de produção da mistura e minimização dos problemas comuns de “clima quente” (grande parte do território brasileiro);
- O aumento dos tempos de Início e Fim de Pega permitindo um maior tempo de manuseio do concreto, e evitando a possibilidade de ocorrência de “juntas frias”.

Tendo em vista a importância do pré-resfriamento do concreto, os itens subsequentes apresentam outras informações sobre o processo.

7 RECURSOS PARA O PRÉ-RESFRIAMENTO DO CONCRETO

7.1 GENERALIDADES

Com base na equação [III], pode ser determinada a temperatura de lançamento (θ_L) para que se construa a estrutura com a segurança prevista contra a fissuração de origem térmica.

Isso pode ser feito através de cálculos de balanceamento térmico com base na equação do tipo [VI]:

$$[VI] U = \Sigma G \cdot C \cdot (\theta_1 - \theta_2) \text{ sendo}$$

U = Quantidade de calor necessária para passar de uma temperatura (θ_1) para outra temperatura (θ_2). É a capacidade calorífica.

G = Massa do material

C = calor específico

θ = Temperaturas

Os componentes do concreto podem ser refrigerados previamente de diversas maneiras.

O pré-resfriamento do concreto utiliza, geralmente, parte ou a totalidade dos três seguintes recursos:

- Resfriamento da água de mistura;
- Substituição da água de mistura por gelo;
- Resfriamento dos agregados graudos.

O resfriamento de pequenas partículas, como a areia ou cimento e material pozolânico, por dificuldades técnicas e por ser de elevado custo, não tem sido aplicado rotineiramente.

Uma das dificuldades, principalmente em regiões de clima quente e com alto teor de umidade do ambiente, como na maior parte do Brasil, é o fato de que o resfriamento à níveis inferiores à temperatura de bulbo úmido possibilita a condensação dessa umidade sobre as partículas. O problema se agrava pela grande superfície dessas partículas.

No caso de cimento esse fato obviamente elimina por completo a possibilidade de resfriamento, e no caso de areia torna-se pouco eficaz.

Para evitar essa dificuldade, conseqüente do resfriamento, é necessário manter todo o sistema de resfriamento e transporte, desses materiais, hermeticamente fechado e vedado, o que eleva o custo.

A utilização de nitrogênio como recurso para resfriamento dos componentes de concreto fica restrito para alguns casos bem limitados, na maioria, de pouca duração, e para pequenas produções de concreto [23].

A utilização de nitrogênio líquido a primeira vista parece um sistema interessante, pois pela sua simplicidade ganha vantagens contra instalação frigorífica convencional composta de muitos componentes e inúmeras tubulações e válvulas.

Também atrai a ausência dos motores elétricos e de extensa parte elétrica das instalações convencionais. Porém por outros motivos estas vantagens aparentes desaparecem.

Para resfriar 1m^3 de concreto com um diferencial de 1°C são necessários aproximadamente 10 kg de nitrogênio líquido.

Portanto para uma produção de $150\text{ m}^3/\text{h}$ de concreto com uma temperatura de produção de 12°C serão necessárias em média 2 toneladas de nitrogênio em cada hora.

Pelo motivo de que as grandes construções pesadas serem localizadas longe dos centros industriais e produtores de nitrogênio, o custo e problemas de manuseio tornam este sistema completamente inviável, além de alto custo de nitrogênio no Brasil em comparação com países mais industrializados.

Dessa forma o alto custo de nitrogênio e dos cuidados para seu manuseio torna sua utilização na prática, apesar de algumas tentativas, apenas como demonstração, ou em pequena escala, não chegando a ser utilizado em escala industrial.

Dessa maneira, como solução principal para pré-resfriamento de concreto com os sistemas citados, permanece a utilização de instalações frigoríficas convencionais usando somente o gás amoníaco como meio refrigerante.

Esta situação permanece praticamente inalterada desde o início de pré-resfriamento de concreto nos Estados Unidos.

Os equipamentos das instalações convencionais podem ser reutilizados.

A vida útil dos equipamentos, que sofrem de desgaste mecânico como os compressores e as máquinas de gelo, e que representam a parte mais cara das instalações, pode ser admitida em 20 anos.

Isso significa que podem ser reutilizados em diversas obras, em média quatro vezes.

Como exemplo pode-se citar algumas máquinas compradas em 1965 para as instalações de resfriamento de concreto na obra de UHE Ilha Solteira foram utilizados nas obras das Usinas de Água Vermelha, Tucuruí e trabalham ainda (1988) na obra de UHE Porto Primavera.

Para poder aproveitar esta possibilidade, existe uma tendência para uso dos equipamentos em maior quantidade numérica, de melhor qualidade possível e de menor porte. Como por exemplo pode-se citar o uso de três compressores de 350 HP é mais recomendado, que o uso de um compressor de 1.000 HP, pois reutilização deste fica mais difícil.

Cada obra tem suas características, produções, materiais, temperaturas, etc. ficando mais fácil adaptar os equipamentos menores para outras condições de funcionamento.

Tanto hoje, como antes, para a utilização de refrigeração "artificial" fazem parte dos equipamentos os recursos para fabricação de gelo e resfriamento de água e agregados graúdos.

Todos esses recursos nem sempre são utilizados. Dependendo das temperaturas dos materiais componentes, das dosagens e o nível da temperatura de lançamento(θ_l). Poderá ser necessário o uso dos três recursos. Com as temperaturas mais elevadas apenas um ou dois recursos são usados.

No transcorrer dos anos, com a experiência ganha sob diversas condições operacionais e em diversas obras, os recursos para resfriamento dos agregados foram aperfeiçoados e houve essenciais alterações. Houve, também um desenvolvimento normal das técnicas de resfriamento de água, na produção, armazenamento e transporte de gelo.

Entretanto as maiores mudanças ocorreram nos recursos usados para resfriamento dos agregados.

O resfriamento da água da mistura apresenta uma solução simples e barata, mas ao mesmo tempo de menor eficiência térmica, principalmente para os concretos de massa, quando o teor de água é pequeno como se ilustra pelos exemplos a seguir:

- Concreto com massa específica igual a 2400 kg/m^3 , calor específico $0,225 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$: de uma quantidade total de água de 100 Kg/m^3 (o que para um concreto de massa com Θ_{max} 152 mm pode ser considerado um valor médio) aproximadamente a metade fica contida como água associada aos agregados. Dos restantes 50 Kg/m^3 devem ser preservados pelo menos 7 kg para os aditivos.

Ao se resfriar a quantidade restante (43 Kg/m^3) de uma temperatura de 25°C para 5°C – conseguir-se-á, com isso, abaixar a temperatura de concreto de apenas, $1,5^\circ\text{C}$ aproximadamente.

- Dessa forma resfriamento apenas de água de mistura tem uma influência maior nos concretos de maior teor de água que nos de menor teor. Nos concretos de agregados de $\Theta_{\text{max}} = 19\text{mm}$, por exemplo com um teor de 200kg/m^3 descontando água associada e para aditivos, tem-se 150 kg/m^3 de água disponível cujo resfriamento pode abaixar a temperatura de concreto 5°C , em lugar de $1,5^\circ\text{C}$.
- Com a substituição de água pelo gelo, no primeiro exemplo (de concreto de massa) consegue-se uma redução de temperatura de concreto de $7,5^\circ\text{C}$ em vez de $1,5^\circ\text{C}$. Esta diferença considerável explica a ampla utilização de gelo na maioria das obras.

Com utilização de gelo, conhecidamente uma forma física de “frio concentrado”, se consegue duas vantagens ao mesmo tempo, pois além da vantagem principal de aproveitamento integral de calor de fusão de 80 kcal/kg , aproveita-se ainda a diferença de 5°C entre temperatura suposta de água gelada (considerando-se as condições práticas da obra) e água proveniente de descongelamento do gelo (a 0°C).

Por esses motivos gelo é considerado um ingrediente valioso.

Nas condições climáticas do Brasil o concreto produzido sem nenhum recurso de resfriamento atinge temperaturas entre 25 e 35°C . Portanto à temperatura mais altas que as temperaturas dos agregados. Isso reside no fato que a temperatura de cimento se situa, normalmente, ao redor de 50°C e que o concreto ganha ainda de $1,5^\circ\text{C}$ a 3°C devido ao equivalente térmico de “trabalho-mistura” (2.100 kcal/m^3), pela agitação na betoneira.

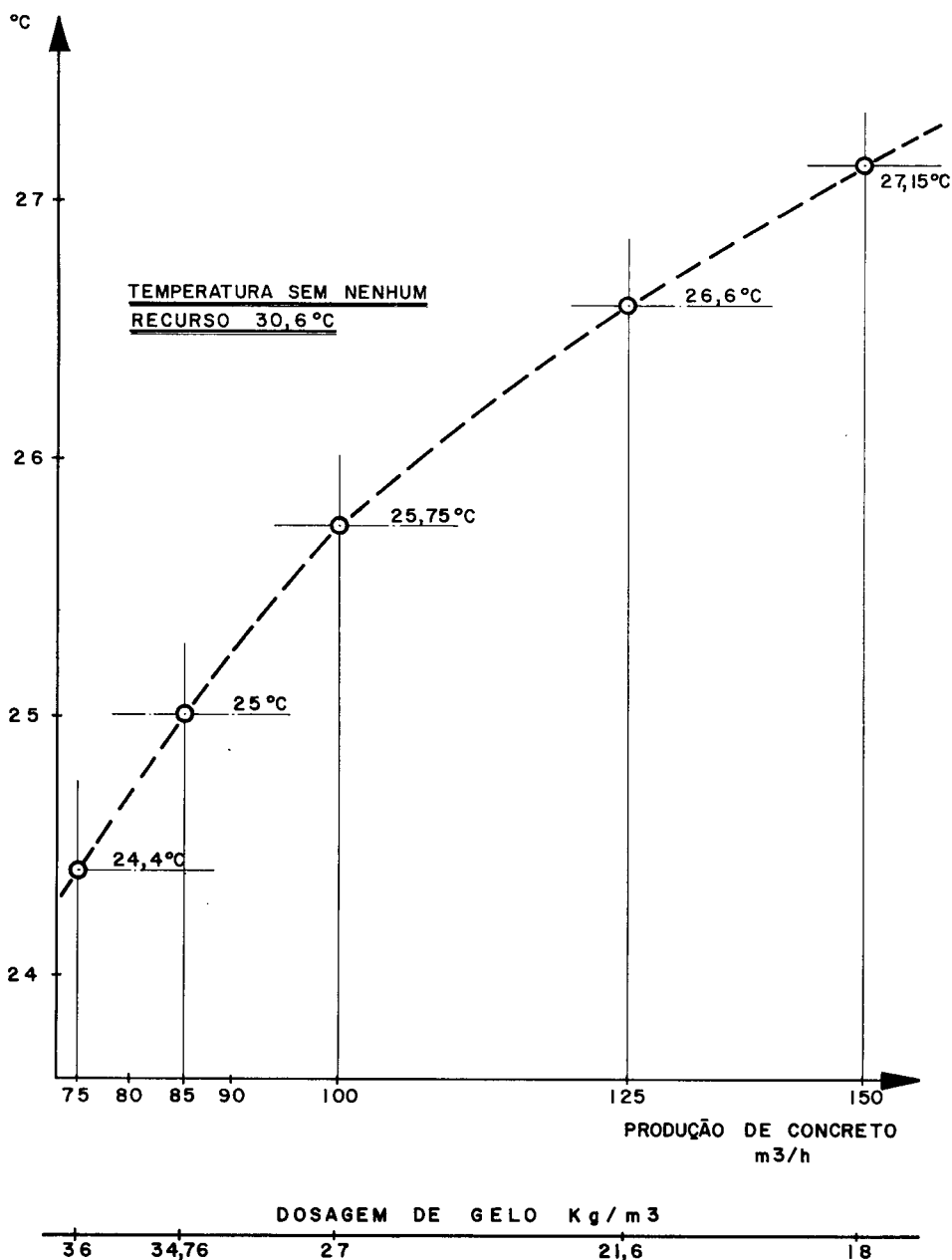


Figura 20 – Refrigeração do Concreto, com utilização de, apenas, gelo.

Por outro lado as temperaturas exigidas para concretos de barragens de massa oscilam entre 6°C e 14°C.

Isso significa que mesmo com utilização de gelo não se chega aos níveis desejados de (θ_L). Dessa forma, o terceiro recurso do resfriamento dos agregados graúdos assume uma importância essencial na técnica do pré-resfriamento do concreto.

Os agregados graúdos no Brasil foram resfriados pela primeira vez, por imersão, em tanques com água na obra de Ilha Solteira CESP (Ver figura 1 e 21).

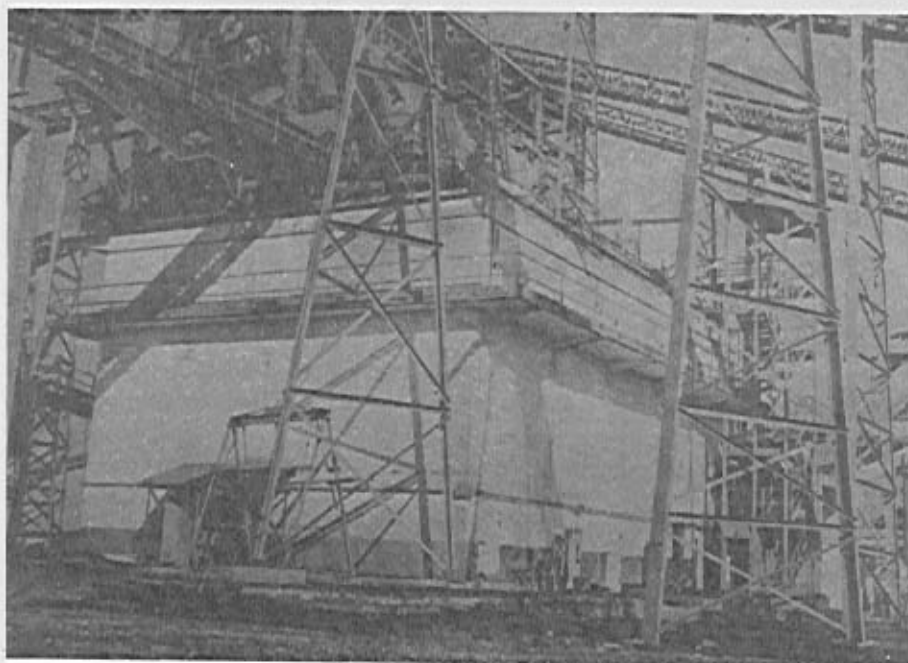


Figura 21 – Silos de Refrigeração de Agregados – Obra de Ilha Solteira – CESP.

A partir da obra da hidrelétrica de Capivara (1971) os agregados graúdos têm sido resfriados por aspersão e inundação de água, sobre uma correia transportadora, como ilustra a Figura 22.

Outro processo usado para resfriamento dos agregados graúdos é a insuflação de ar, à baixa temperatura, nos silos da própria central de concreto, onde o ar é introduzido na parte baixa e succionado na parte superior.

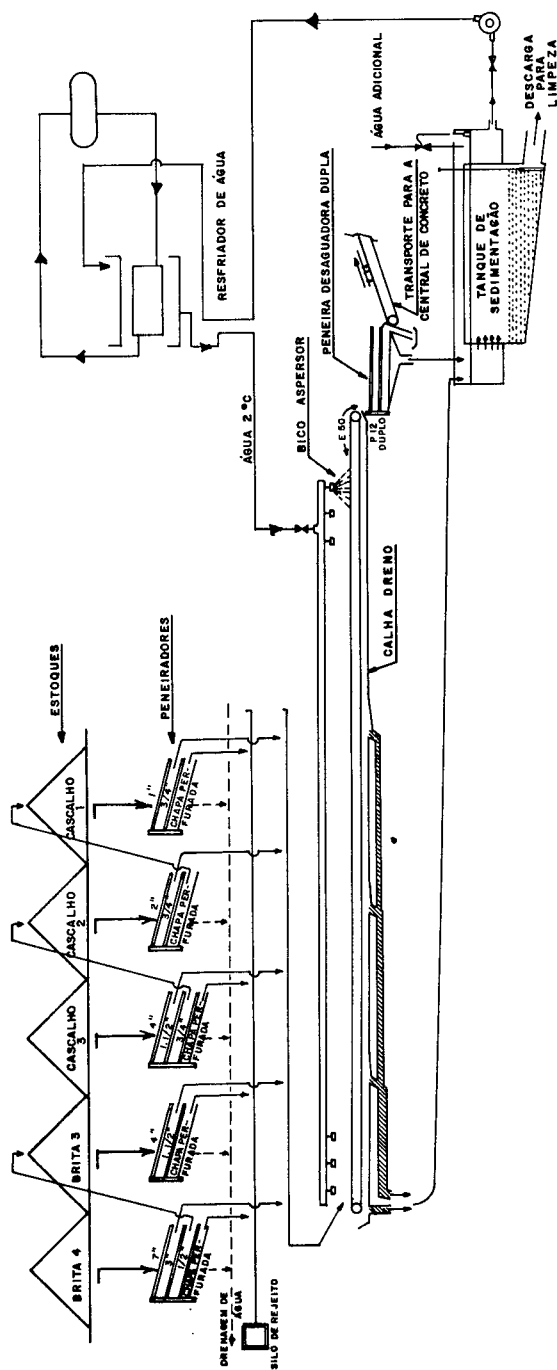


Figura 22 – Esquema de Resfriamento do Agregado Graúdo por Aspersão de Água Correia Transportadora.



Figura 23 – Bicos Aspersores de Água Gelada, sobre os Agregados Transportados pela Correia-UHE-Água Vermelha.

Nos dois sistemas, por resfriamento em correia e por insuflação de ar frio, trabalha-se com os agregados que são resfriados pelo princípio de circulação contínua (tanto de água como ar) passando pelos respectivos resfriadores, em circuito fechado.

O dimensionamento das instalações-potências frigoríficas, capacidade da correia transportadora, velocidade da correia, vazão de água – toma em consideração como parâmetro fundamental a difusividade (h^2) dos agregados, como ilustra a Figura 24 onde se observa que os agregados de maior difusividade (quartzito – $h^2 = 0,21 \text{ m}^2/\text{dia}$) requerem um menor tempo de resfriamento para uma a mesma temperatura, que agregados de menor difusividade.

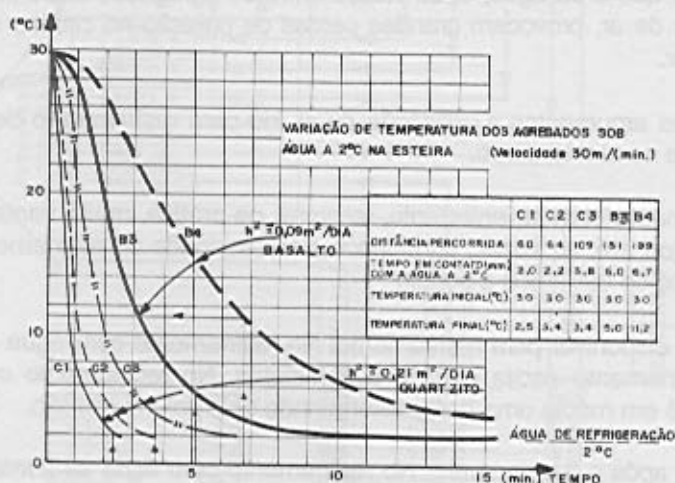


Figura 24 – Tempos de Exposição de Agregados ao Resfriamento com Água Aspergida sobre Correia [18]

Para a obtenção de temperatura de concreto ao redor de 6 a 7°C, há necessidade de aplicação dos três sistemas citados. Esse é o exemplo que se cita na Figuras 25 e 26 [10], e foi adotado para a obra de Itaipu.

Através de medições de controle de temperatura dos materiais nos vários estágios do sistema mostrado nas Figuras 25 e 26, obteve-se o conjunto de valores, mostrado na Figura 27 [10]. De maneira comparativa, na Figura 27, observa-se o conjunto de medidas efetuadas nos sistemas de obra de Tucuruí – Eletronorte [19], onde se destaca a influência da difusividade dos materiais, evidenciado pela temperatura mais baixa, atingida pelos agregados de Tucuruí, do que os agregados basálticos ($h^2 = 0,09 \text{ m}^2/\text{dia}$) de Itaipu, para um mesmo tempo de exposição, aspersão e inundação dos agregados.

7.2 DISCUSSÕES SOBRE OS SISTEMAS – ÁGUA E AR – PARA RESFRIAMENTO DE AGREGADOS

Há grandes diferenças entre esses dois sistemas. O ar, de ponto de vista térmico, é um transmissor pouco vantajoso. O calor específico do ar é quatro vezes menor que o da água, em peso, e aproximadamente três mil vezes menor que o da água, por volume. Isso significa, na prática, que para eliminar a mesma quantidade de calor são necessárias enormes vazões de ar.

O ar, além disso, tem outras desvantagens: o coeficiente de transmissão de calor do ar na superfície do agregado é aproximadamente vinte e cinco vezes menor que o da água, e; os vazios entre os agregados disponíveis para passagem de ar, provocam grandes perdas de pressão no circuito de circulação de ar.

Com esses argumentos a utilização de ar frio para resfriamento de agregados parece ser um absurdo.

O resfriamento com ar, entretanto, torna-se, na prática, muito vantajoso, diminuindo ou até, as vezes, eliminando a necessidade de resfriamento com água, como se esclarece a seguir

- Tempo disponível para resfriamento: No resfriamento com água o tempo de resfriamento oscila entre 6 e 9 minutos. No resfriamento com ar o tempo é em média uma hora, determinado pelo volume de silo.
- Perdas após o resfriamento: No resfriamento com água se perde, aproximadamente, de 3°C até 10°C dependendo das características dos agregados e do tipo de equipamento de transporte e isolamento. (Ver Figura 27).

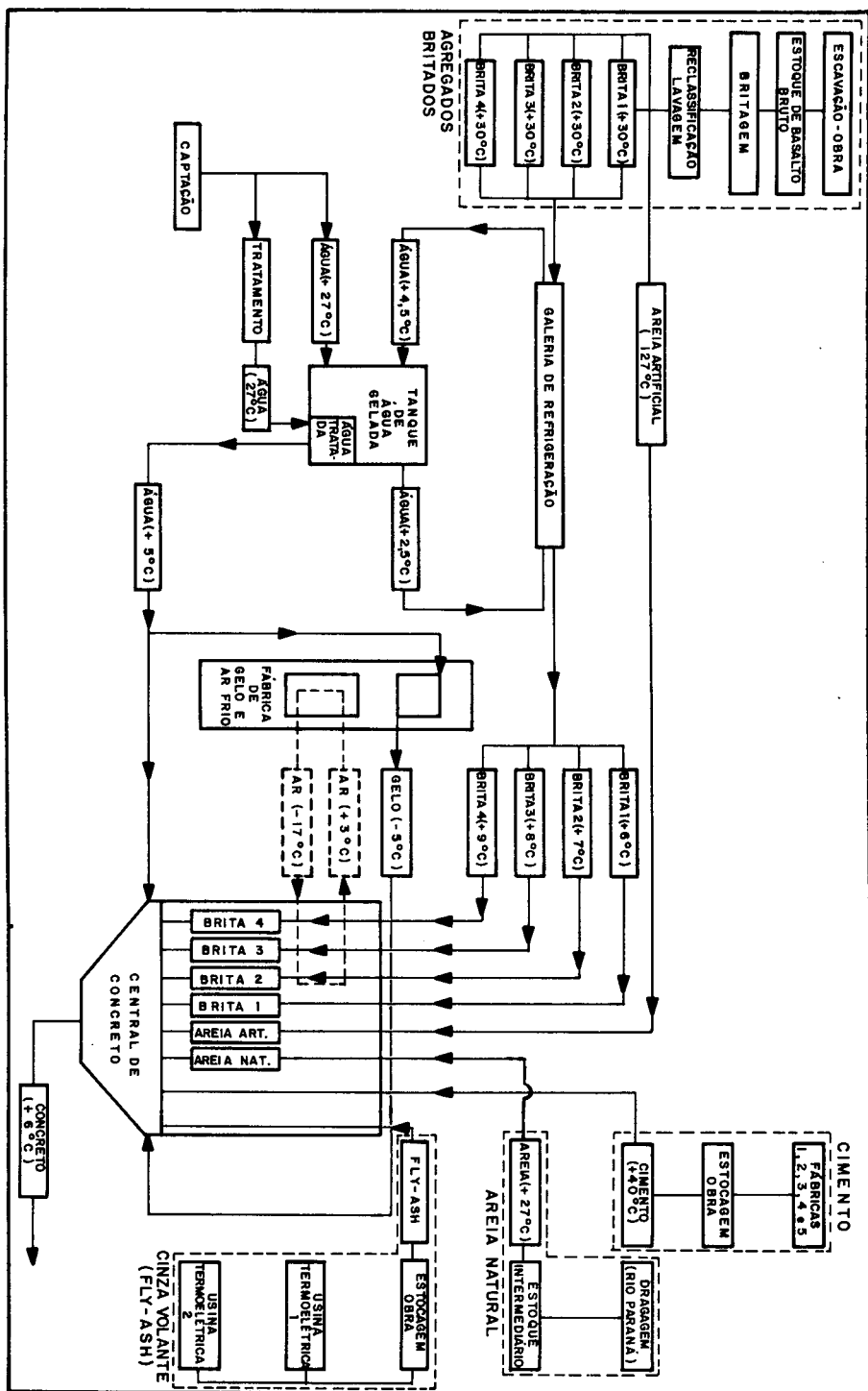


Figura 25—Fluxograma dos Materiais para Produção de Concreto Refrigerado em Itaipu

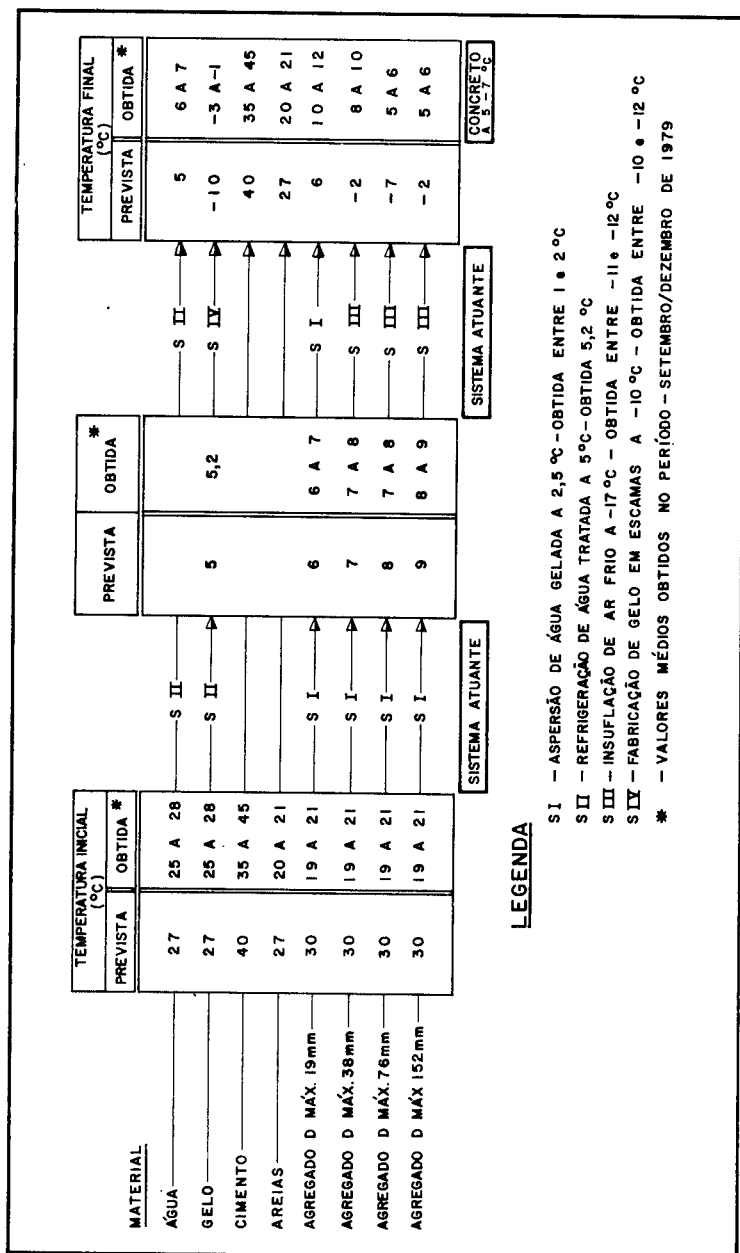


Figura 26 - Esquema de Variação das Temperaturas dos Materiais - Itaipu

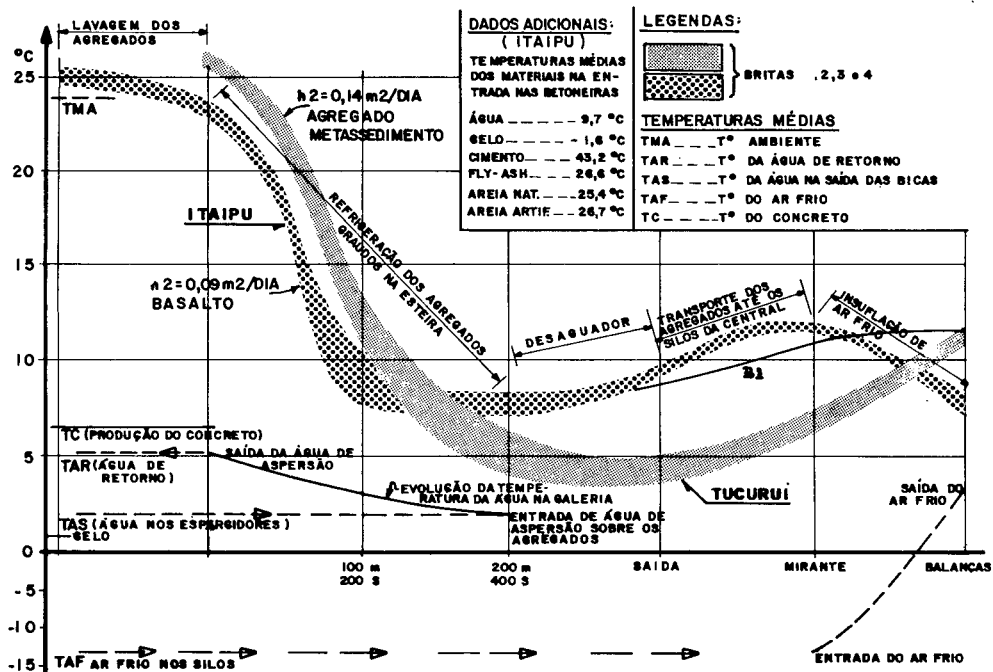


Figura 27 – Informações de medições de temperaturas nos sistemas de Itaipu [10] e Tucuruí [19]

- Esse aumento ocorre no caminho entre a saída da correia transportadora resfriadora até chegada no misturador, passando assim pelo desaguador, transportador inclinado, até o chute de descarga na central de concreto e passando também pelos próprios silos. O caminho dos agregados, resfriados mediante ar nos silos até o misturador, é direto; portanto sem perdas.
- Continuidade no Processo: Com produções de concreto reduzidas ou com interrupções, o que ocorre com frequência, o resfriamento com ar facilita, pois o tempo disponível fica prolongado. Além disso existe outra vantagem pois ar frio pode ser sempre insuflado conforme a necessidade, por exemplo após uma parada prolongada no fim de semana. No resfriamento com água, ao contrário, as perdas são menores quando as produções de concreto são estáveis, maiores e sem interrupções, pois o aquecimento durante o transporte e nos silos é menor. Em produções menores, as perdas são maiores, sendo que durante as paralisações há a necessidade de se esvaziar os silos, devido ao aquecimento dos agregados, caso não se disponha do recurso de resfriamento com ar.

O funcionamento da central de concreto não é simples, devido a diversos fatores externos e internos na própria central. O trabalho é tenso, e às ve-

zes até dramático, precisando atender solicitações da obra na frente de concretagem, a qual iniciada não pode ser interrompida.

Na central de concreto concentram-se os resultados de diversos equipamentos da obra sendo que os "traços"(misturas), e as temperaturas de concreto devem ser obedecidas. Portanto o resfriamento com ar é a mais cômodo e facilmente adaptável às situações, oferecendo respostas mais rápidas e as interrupções não são prejudiciais.

- Diferenças Operacionais: A Temperatura da água na saída do resfriador fica (na melhor das hipóteses) aproximadamente entre $1,5^{\circ}\text{C}$ e $2,0^{\circ}\text{C}$ (no caso de resfriadores abertos tipo Bauçelot - ver à frente). No caso dos resfriadores fechados (tipo "shell & tube" ver à frente) multitubulares, fica mais, alta, entre 4°C e 6°C . Logo a temperatura média final dos agregados no fim da correia transportadora-resfriadora fica entre 6 e 12°C . Com as perdas mencionadas, até a entrada para misturador eleva-se mais 6°C , aproximadamente. (Ver Figura 25).

Com resfriamento mediante ar pode-se trabalhar com temperatura de ar bastante baixa, até um limite de -20°C , o que possibilita conseguir temperaturas de alguns agregados, até -12°C , o que com água ou com uso de gelo não é atingível.

. Outras Considerações

O resfriamento com água, apesar das vantagens termodinâmicas óbvias, tem ainda outras considerações:

.. Dimensões da correia

A localização da correia transportadora-resfriadora, cujo comprimento total, inclusive secção de alimentação e desaguador, atinge aproximadamente 250m, é uma condição que nem sempre pode ser facilmente resolvida no canteiro.

.. O volume da água

O sistema de resfriamento de água, principalmente com resfriadores abertos ou inundados, é extenso e com grande volume de água. Por isso os tempos de resfriamento para se conseguir a temperatura de água determinada, após as interrupções, ou limpezas, não são pequenos.

A inércia térmica do sistema é grande e as condições para atender as demandas que oscilam, são dificultadas.

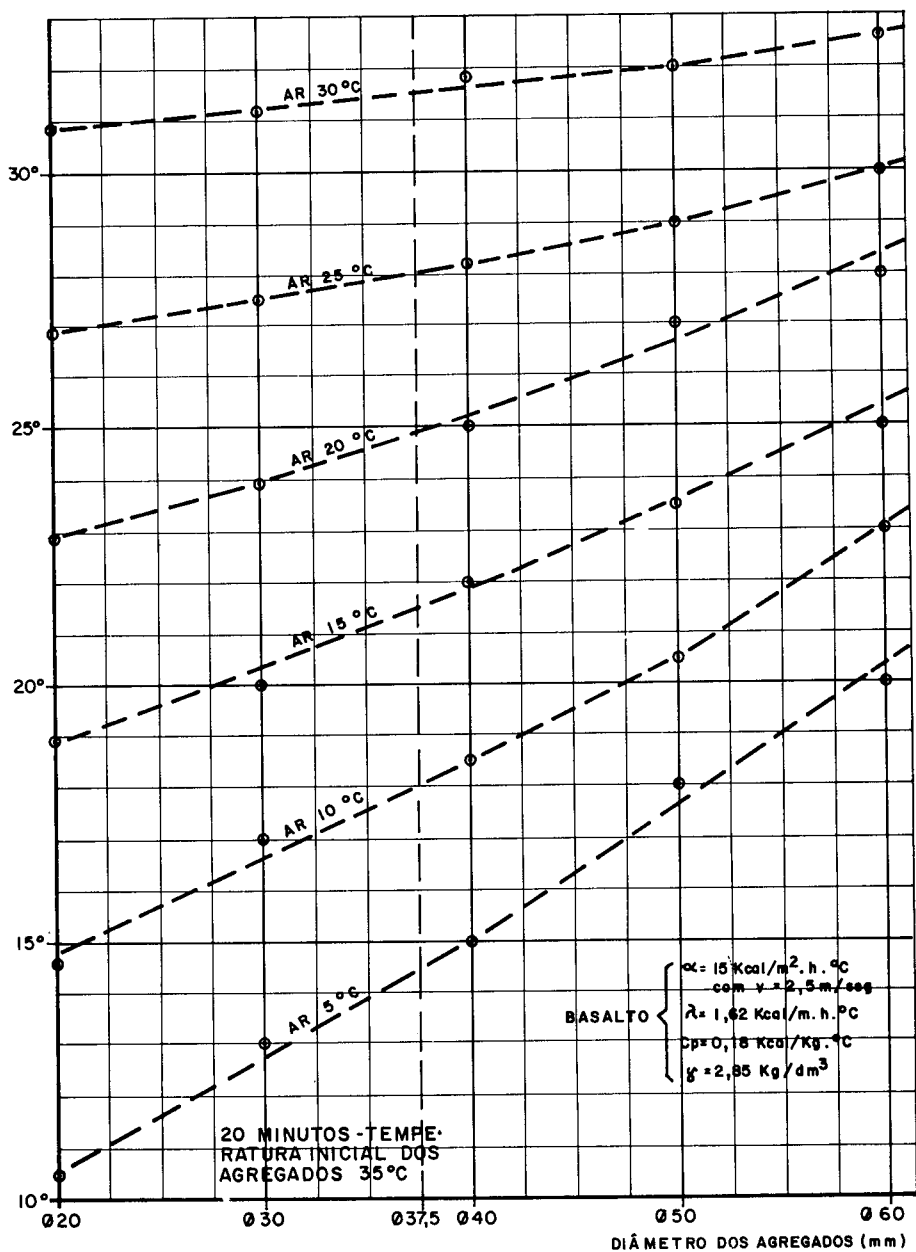


Figura 28 – Dados comparativos para resfriamento com insuflação de ar ($v = 2,5 \text{ m/seg}$) com exposição de 20 minutos.

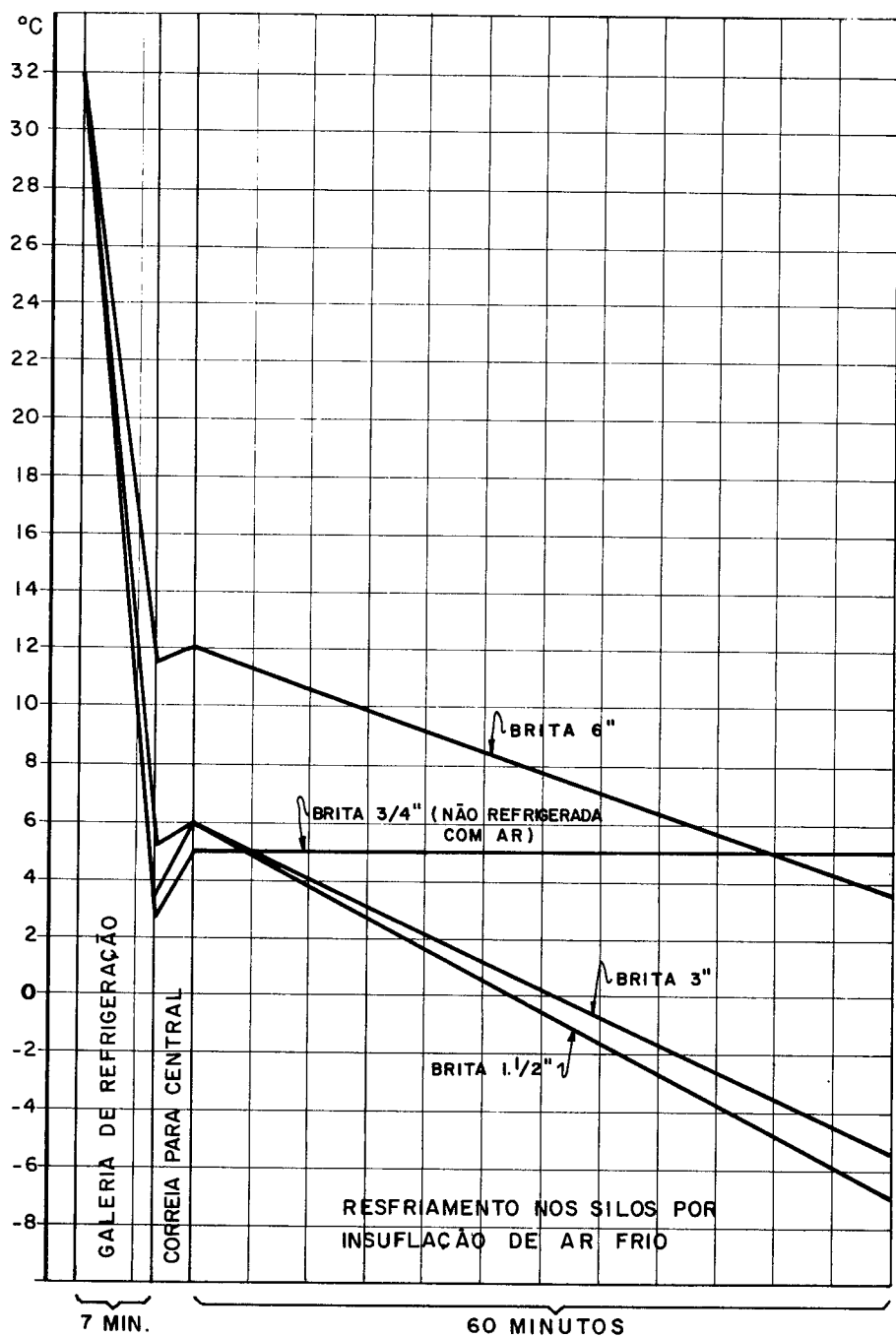


Figura 29 – Dados comparativos do resfriamento com água (por aspersão em correia) e ar (por insuflação de ar frio nos silos).

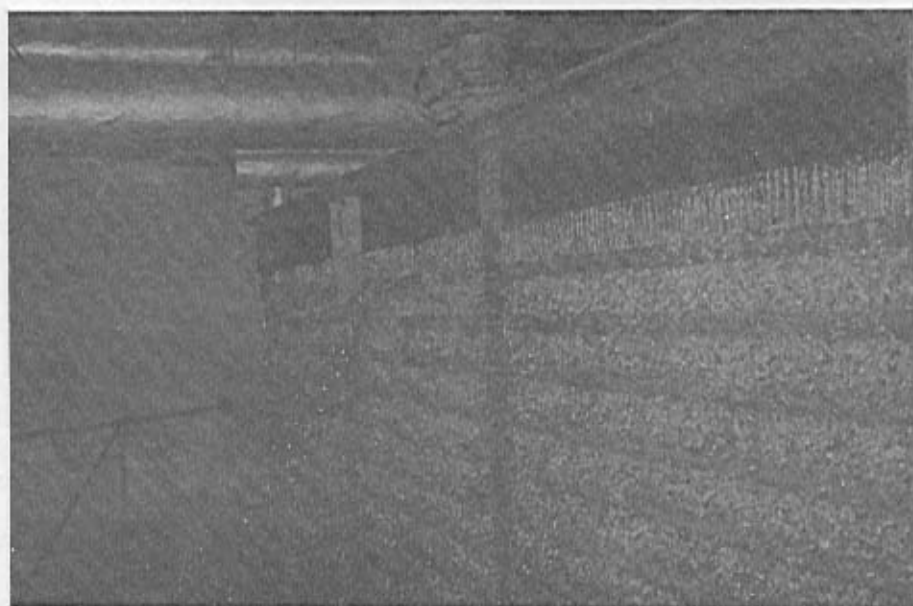


Figura 30 – Resfriador tipo Baudelot – Vista da Parte Retã da Tubulação – UHE-Água Vermelha.

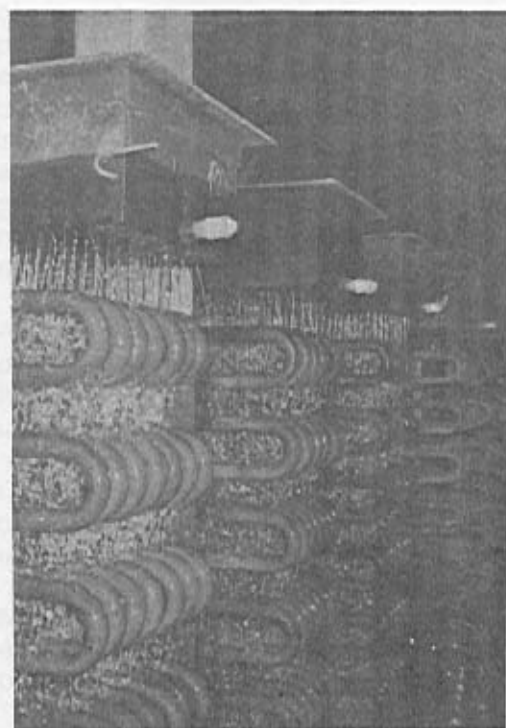


Figura 31 – Detalhe de extremidade das Tubulações do Baudelot – UHE-Água Vermelha.



Figura 32 – Resfriador de água, multitubular tipo "Shell and Tube" – UHE – Porto Primavera

.. Limpeza do Sistema

A limpeza de todo sistema de circulação de água é um outro problema sério criando problema de continuidade e de mão-de-obra. As perdas de tempo e as paradas do resfriamento com água devido a limpeza necessária são maiores que com o sistema de resfriamento com ar.

.. Controle da Umidade Superficial

No resfriamento com água, especialmente dos agregados menores onde a superfície específica é grande, surge uma dificuldade adicional em controlar a quantidade de água no "traço" de concreto, pela umidade associada neste material. Além de inconstante esta quantidade é impossível de se prever.

Sem o resfriamento com água os agregados entram secos na betoneira eliminando esta dificuldade e permitindo aumentar dosagem de gelo.

7.3 EQUIPAMENTOS PARA O RESFRIAMENTO DOS AGREGADOS COM ÁGUA

Os agregados, são resfriados, atualmente, de modo contínuo no transportador de correia.

No início do uso de resfriamento de concreto no Brasil os agregados foram resfriados em grandes tanques verticais mediante inundação em funcionamento cíclico (ver figura 19).

Hoje há de se considerar esta solução como superada pelas grandes vantagens do sistema na correia, pois o resfriamento contínuo é sempre melhor que o intermitente. Mas as principais vantagens consistem em menor volume de água necessária e no menor aquecimento de água ao mesmo tempo. Menor aquecimento significa temperatura média de água mais baixa, consequentemente temperaturas, dos agregados, mais baixas, o que é mais eficaz.

A temperatura dos agregados na entrada da correia é igual, (ver figura 25) correspondendo a temperatura média diária do ambiente, (acrescida de $\cong 20^{\circ}\text{C}$) enquanto que a temperatura final após resfriamento varia, dependendo de tamanho, considerando o mesmo tempo de contato com água.

Agregados menores obtêm temperatura mais baixa (devido a $\frac{h^2 \cdot t}{D^2}$).

Aproveitando esse fato, existe uma possibilidade de determinar o tempo de resfriamento (ver Figura 22) menor para agregados menores, (por exemplo $\emptyset$ 19 mm), médio para médios e maior para os maiores (por exemplo $\emptyset$ max 152 mm). Para conseguir isso, determinam-se os pontos de alimentação da mesma correia nos diferentes lugares. Usa-se uma maior Distância para agregados maiores que para agregados menores. Esta possibilidade apesar de certa lógica nem sempre é exequível, principalmente para grandes capacidades de resfriamento. Outra vantagem em relação aos silos de imersão é que a correia de resfriamento pode ser colocada diretamente abaixo das pilhas dos agregados. Mas salienta-se que a compatibilização da geometria das pilhas, com a distância entre os respectivos pontos de alimentação da correia, nem sempre é possível, sendo que, por este motivo, esta prática foi poucas vezes usada.

A água gelada em contato com agregados, carrega material pulverulento e outras partículas finas, que aderem aos agregados. Em pouco tempo a água fica suja, com muita substância fina em suspensão e precisa passar por uma decantação antes que volte para os resfriadores.

Os decantadores são, normalmente, grandes, volumosos, divididos em seções para possibilitar a limpeza parcial sem interrupção do funcionamento de resfriamento, sendo então caros e a limpeza tem custo operacional alto.

Mesmo com boa decantação, nas condições operacionais reais de obra, a água gelada não fica limpa, o que se confirma pelo ponto de congelamento observado para essa água. Já foi constatada temperatura abaixo de -20°C .

Como resfriadores de água entram em consideração três tipos de aparelhos, com evaporação direta de NH_3 :

- Resfriadores em forma de serpentinas inundadas dentro da própria água, com circulação forçada de água para aumentar rendimento.
- Resfriadores, também em forma de serpentinas, chamadas Baudelot, sobre as quais a água cai por gravidade (ver Figuras 30 e 31).
- Resfriadores fechados, multitubuladores com tubos retos, (“shell & tube”) onde a água passa, ao contrário dos dois tipos anteriores, por dentro dos tubos. (ver Figura 32).

O primeiro tipo, com bom rendimento, é desvantajoso pelas dificuldades de limpeza, para o qual toda água do tanque (onde estão instalados) deve ser esvaziada. Mesmo assim a limpeza é difícil devido a pouca distância entre os tubos, obstruindo o acesso.

O segundo tipo – Baudelot, é dominante no Brasil, principalmente para grandes obras e tem as seguintes vantagens:

- . Os tubos, além de serem de certa maneira autolaváveis, com a queda da própria água, podem ser facilmente limpos mediante escova, sem precisar interromper o funcionamento;
- . É único tipo, onde um eventual congelamento de água não cria nenhum perigo;
- . É único tipo onde se consegue temperaturas de água mais baixas possíveis, com funcionamento seguro, e com bom rendimento;

As desvantagens do Baudelot são:

- . O alto custo do fornecimento e de montagem;
- . Grande área de construção, necessitando grandes espaços a serem cobertos e termicamente isolados.

Essas desvantagens são compensadas pela alta confiabilidade e simplicidade em funcionamento.

O resfriador “shell & tube” ao contrário, é um equipamento compacto, cujo isolamento térmico, em comparação com Baudelot, é desprezível, podendo ser colocado até no ar livre. O equipamento é barato e de montagem fácil. Pelo fato da água fluir dentro dos tubos e o congelamento podendo provocar rompimento, este resfriador deve trabalhar com temperaturas mais altas, o

que é a principal desvantagem. Outra desvantagem consiste na necessidade de usar equipamentos de segurança sensíveis para controle do perigo de congelamento, o que mesmo assim às vezes ocorre.

A limpeza destes resfriadores é relativamente simples, porém o resfriador deve ficar fora de funcionamento.

A Figura 1, mostra os tipos de resfriadores usados nas várias obras.

A Figura 33 mostra um esquema para resfriamento da água para gelo e agregados.

7.4 EQUIPAMENTOS PARA RESFRIAMENTO DOS AGREGADOS COM AR

O resfriamento de ar sob ponto de vista de técnica de refrigeração é mais simples e menos problemático que resfriamento de água. Os resfriadores de ar evoluíram tecnicamente no decorrer do tempo.

Os tubos das serpentinas foram, inicialmente, equipados com aletas helicoidais. Há tempo, entretanto, foram substituídos pelos tubos com aletas estampadas retas, mais fáceis para descongelar e exigindo menor volume de NH_3 , além de serem mais compactas e mais baratas.

O descongelamento dos refrigeradores, feito inicialmente mediante água, foi aperfeiçoado com uso simultâneo de gás quente NH_3 diminuindo assim o tempo efetivo de descongelamento. O descongelamento feito inicialmente de maneira manual passou a ser feito de modo completamente automático.

Os próprios resfriadores de ar com seus respectivos ventiladores foram inicialmente colocados na própria Central de Concreto, no lado externo dos silos dos agregados (Figuras 34 e 35). Esta solução desenvolvida nos EUA permanece de mesma forma lá, ainda.

Os estudos feitos por ocasião do projeto de resfriamento de concreto para obra da Itaipu Binacional em 1974 provocaram uma mudança deste conceito. Os resfriadores individuais para cada silo, foram substituídos por um resfriador só (ver Figura 31) para cada Central de Concreto, com apenas um ventilador centrífugo de maior potência em vez dos ventiladores axiais, usados anteriormente. O ar frio foi distribuído mediante dutos de ar para cada silo. O ar aquecido era captado no "mirante" (parte superior) da Central e mediante um duto de retorno voltava para o resfriador.

O ventilador central era acionado por um motor de duas velocidades e na entrada de ar para cada silo tinha dispositivo mecânico (manual) de controle da entrada de ar frio.

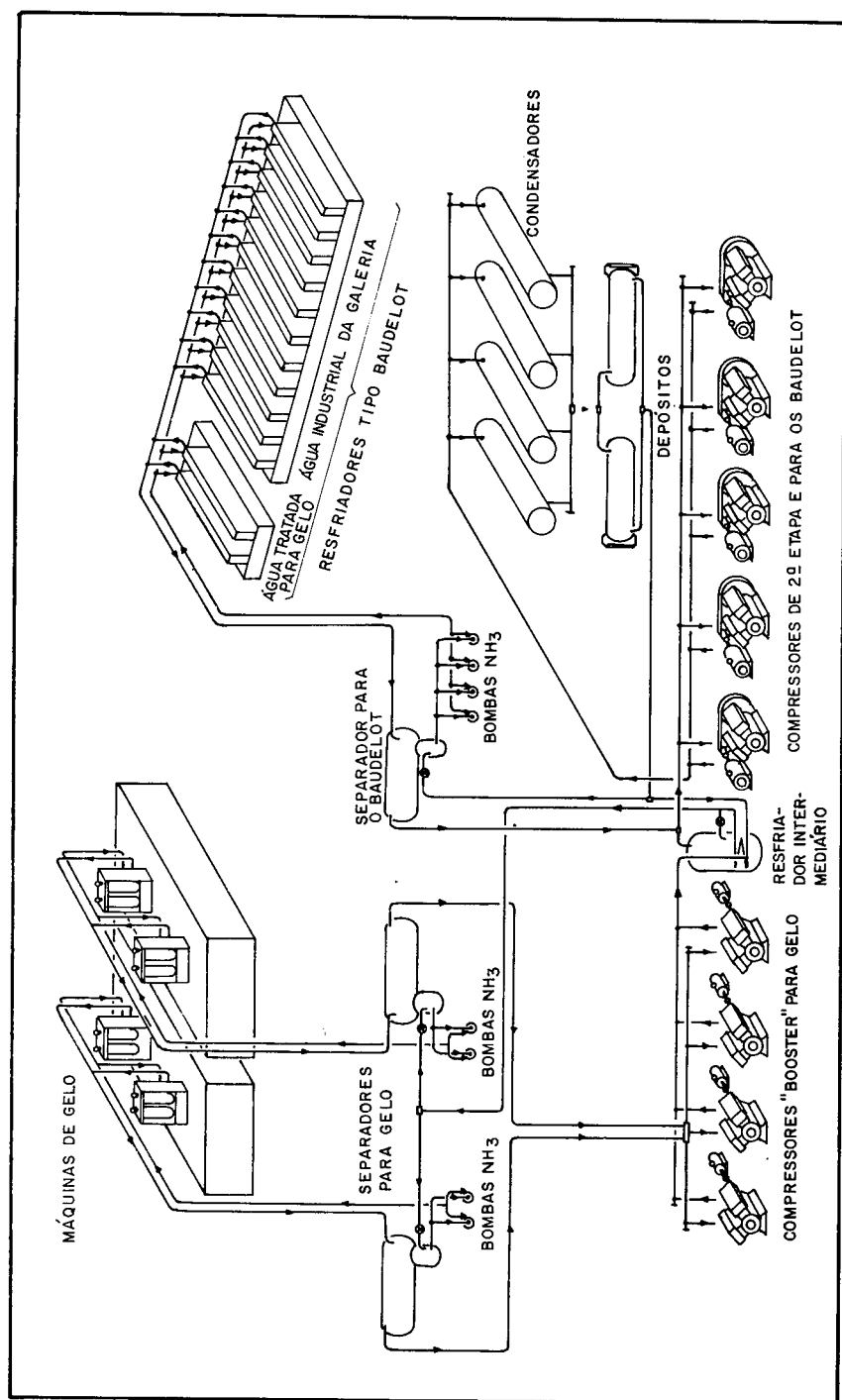


Figura 33 – Esquema para Resfriamento de água para fabricação de gelo e refrigeração dos agregados.

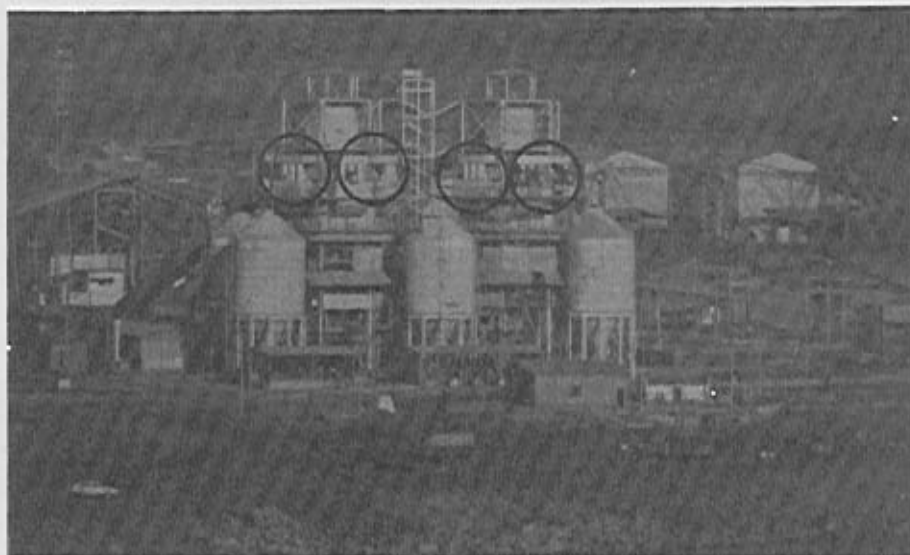


Figura 34 – Sistema de Insuflação de Ar Frio colocado junto aos silos das Centrais de Concreto UHE – Ilha Solteira.

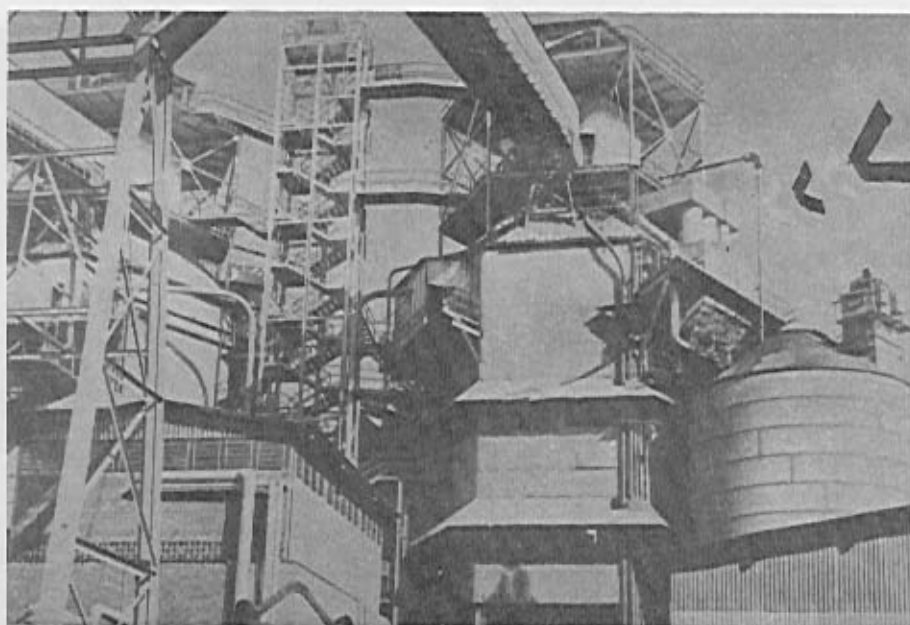


Figura 35 – Detalhe do Sistema de Insuflação de Ar Frio das Centrais de Concreto de UHE – Ilha Solteira.

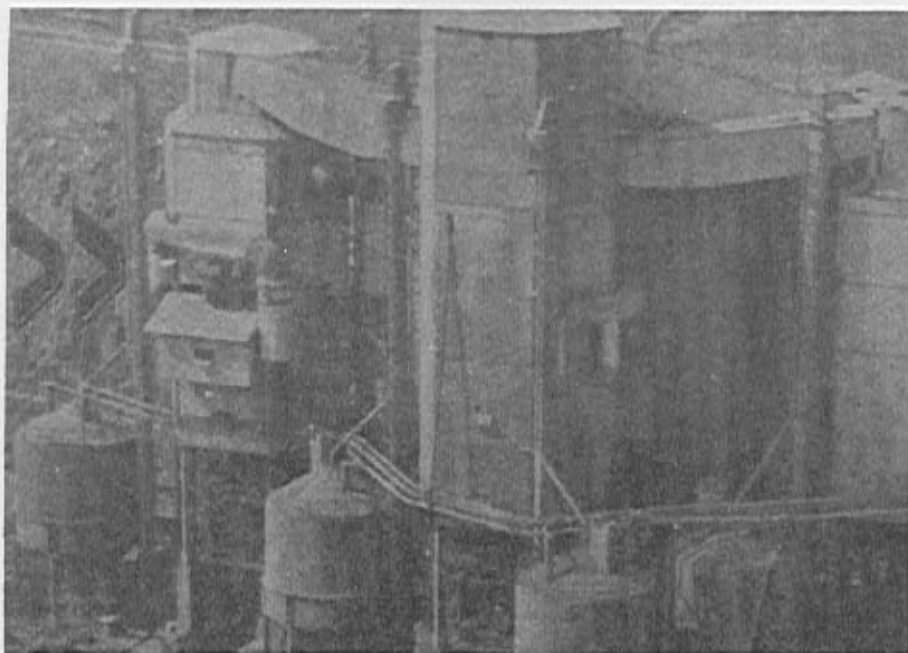


Figura 36 – Sistema Adotado em Itaipu, para a Insuflação do Ar Frio.

As vantagens deste sistema podem ser resumidas como segue:

- . Maior flexibilidade de insuflamento de ar;
- . Menor custo de equipamento e de montagem;
- . Controle de operação centralizado, sendo mais fácil;
- . Manutenção mais rápida e eficiente;

O uso do ventilador centrífugo, com maior rendimento do que os axiais obtém maior pressão estática, com fácil possibilidade de variar velocidade.

Este sistema foi usado a primeira vez nas diversas centrais de refrigeração na obra de Itaipu e atendeu às produções diferentes mostrando nas severas condições da obra sua superioridade e aprovação.

Os levantamentos feitos em Itaipu, durante 5 anos de produção de concreto refrigerado para a temperatura de 6°C , mostraram um pequeno número de horas paradas ocasionadas por diversos defeitos ou revisões no sistema de refrigeração com ar.



Figura 37 – Montagem dos Dutos de Recirculação de Ar Frio – UHE – Porto Primavera.

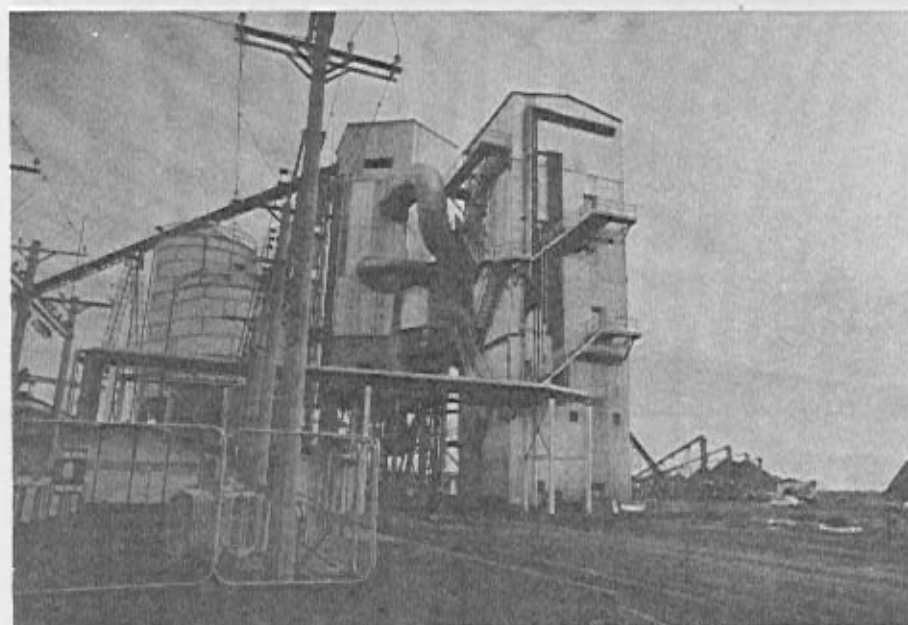


Figura 38 – Dutos de Recirculação de Ar Frio UHE – Três Irmãos

Um maior número de horas de paralisação de funcionamento foi constatado no sistema de resfriamento com água, provocadas principalmente pelas necessidades de limpeza contínua.

O sistema centralizado do resfriamento de ar foi, em seguida, utilizado em outras obras, onde aperfeiçoamentos adicionais foram introduzidos, como se cita:

- Válvulas com acionamento remoto (mediante ar comprimido) na entrada de ar para cada silo dos agregados em vez de dispositivos manuais. Estas válvulas além da disposição "aberta" e "fechada" permitem ainda 3 ou 4 posições intermediárias podendo assim dosar ar frio insuflado dependendo da necessidade.
- Acoplamento hidráulico entre motor e ventilador possibilitando regulação de 0% até 100% das rotações do ventilador.

Os resultados do resfriamento com ar são tão positivos que se chegou a substituir por completo o resfriamento de agregados mediante água usando-se somente resfriamento com ar, além de dosagem de gelo, como na obra de UHE Três Irmãos (CESP), onde a temperatura especificada para fabricação de concreto foi de 12°.



Figura 39 – Entradas de ar frio para silos da Central e Sistema de Controle com as Válvulas Borboletas – UHE- Três Irmãos.



Parágrafo 40 – Duto Central de retorno de ar frio dos silos da Central de Concreto. Preparação para montagem. Diâmetro 2,4 m – UHE-Três Irmãos.



Figura 41 – Montagem de Resfriador de Ar com 9000 m² e Ventilador de 450 HP. UHE – Três Irmãos.

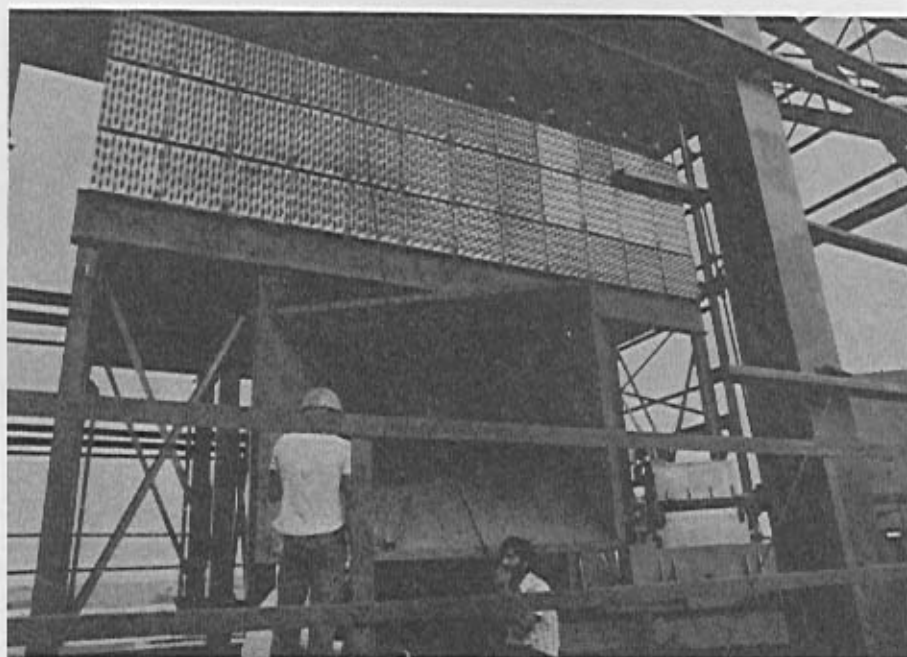


Figura 42 – Fase de Montagem do Resfriador de Ar de 9000 m² e Ventilador Centrifugo de 450 HP UHE – Três Irmãos.

7.5 EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E DOSAGEM DE GELO

A mistura do concreto é feita de maneira rápida, demorando entre 1,5 e no máximo 3 minutos. Neste pequeno lapso de tempo o gelo adicionado a mistura deve derreter por completo. Dessa maneira o tamanho e forma geométrica do gelo assume grande importância.

O gelo, antigamente, produzido em blocos e triturado, não está sendo mais usado pois a forma tetragonal e o tamanho dos pedaços de gelo não garantem a fusão durante a mistura, o que pode provocar como consequência espaços vazios dentro do concreto e heterogeneidade da temperatura da massa.

O gelo em tubos (na realidade anéis) ou em placas não é adequado, pois a espessura tem no mínimo de 8 a 12 mm. Além da forma e da espessura esse gelo não é seco, mas sim com superfície molhada, o que diminui valor calórico.

A única forma de gelo adequado é o fino, em escamas, produzido pelas máquinas rotativas de funcionamento contínuo, isto é, sem descongelamen-

to (necessário em outros tipos de gelo). Esta forma de gelo tem uma espessura entre 1,5 e 3,0 mm. e por isso uma grande superfície específica, de aproximadamente 140 m²/tonelada.

Existem dois tipos de máquinas rotativas para fabricação desse tipo de gelo:

- com cilindro fixo, e removedor, girando na parte interna (ver Figura 43);
- com cilindro rotativo e removedor fixo na parte externa (Figura 44);

Cada tipo tem suas vantagens. O primeiro tipo (fixo) é fechado isolado termicamente na parte externa e a superfície de formação de gelo não tem contato com ambiente. Por outro lado, o controle de superfície de formação de gelo e ajuste do removedor é mais difícil.

O segundo tipo (rotativo) é aberto e tem vedação do eixo na parte inferior onde entra e sai o NH₃.

Essa peça não existe no primeiro tipo da máquina, com cilindro fixo.

A vantagem do segundo tipo é que a máquina ocupa menos que a metade do espaço ocupado pelo primeiro tipo e é uma máquina de construção mais leve, simplificando o dimensionamento do teto do depósito de gelo sobre o qual as máquinas são colocadas.

Esta máquina costuma ser fechada com estrutura leve de madeira compensada, equipada com porta da inspeção e visor de vidro, conforme mostrado na Figura 45.

No Brasil observa-se a utilização dos dois tipos de máquinas, sendo que a maioria é do segundo tipo, por ser de fabricação nacional.

O armazenamento de gelo em escamas é delicado, pois trata-se de um material submetido a influências térmicas, propício para empedramento e derretimento, além de sublimação – fenômeno relativamente raro na natureza.

Das diversas soluções encontradas nenhuma é ideal, podendo-se distinguir três tipos de depósitos:

- Depósito por gravidade, de tipo horizontal com piso inclinado.
- Depósito cilíndrico vertical com fundo cônico e equipado com eixo central giratório com corrente removedora.
- Depósito com raspador (rake) de tipo horizontal com piso, também horizontal, equipado com raspador e rosca extratora.

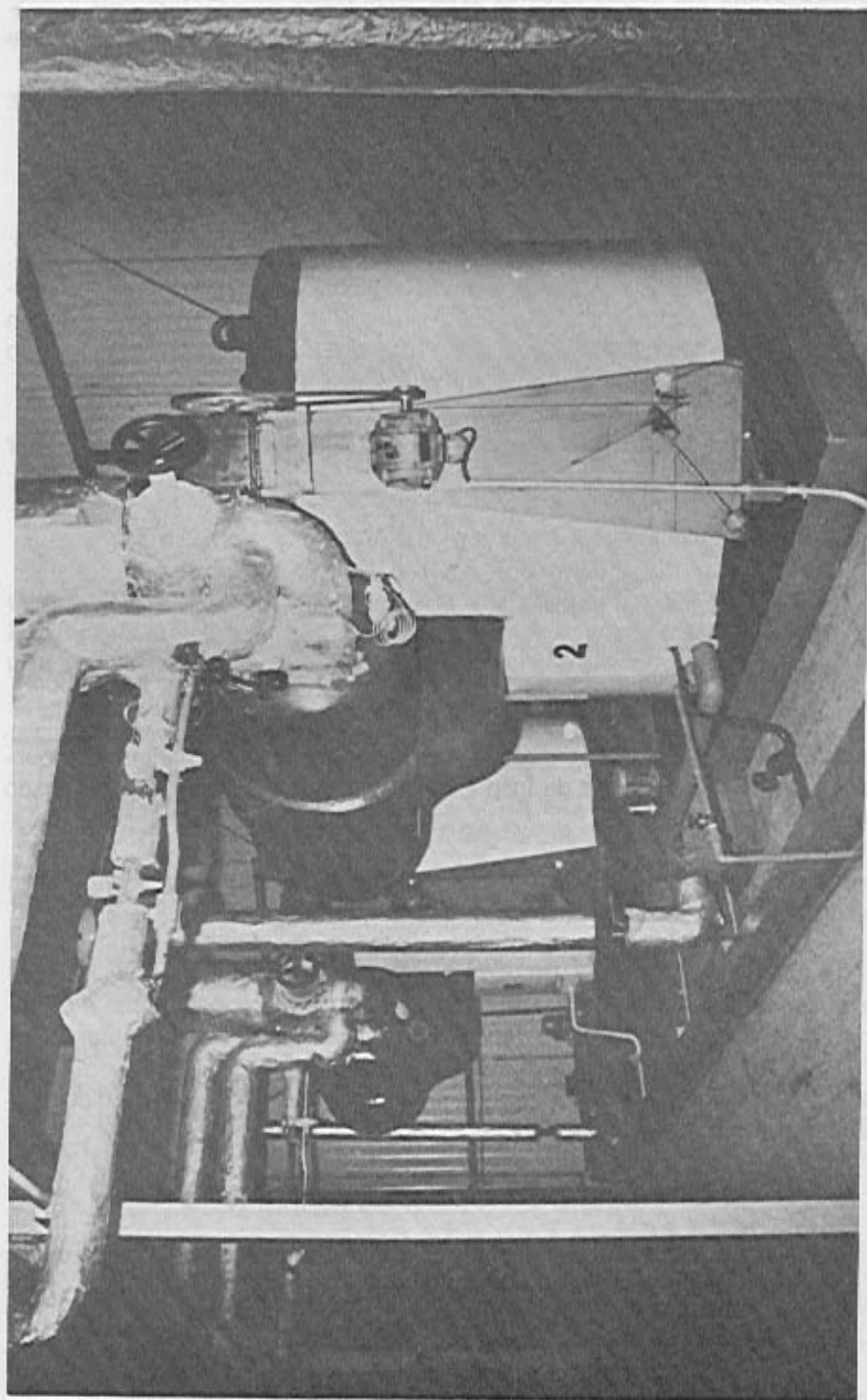


Figura 43 – Máquina de Gelo com Cilindro Fixo – Tipo North Star. Capacidade 1T/H – UHE – Nova Avanhandava.

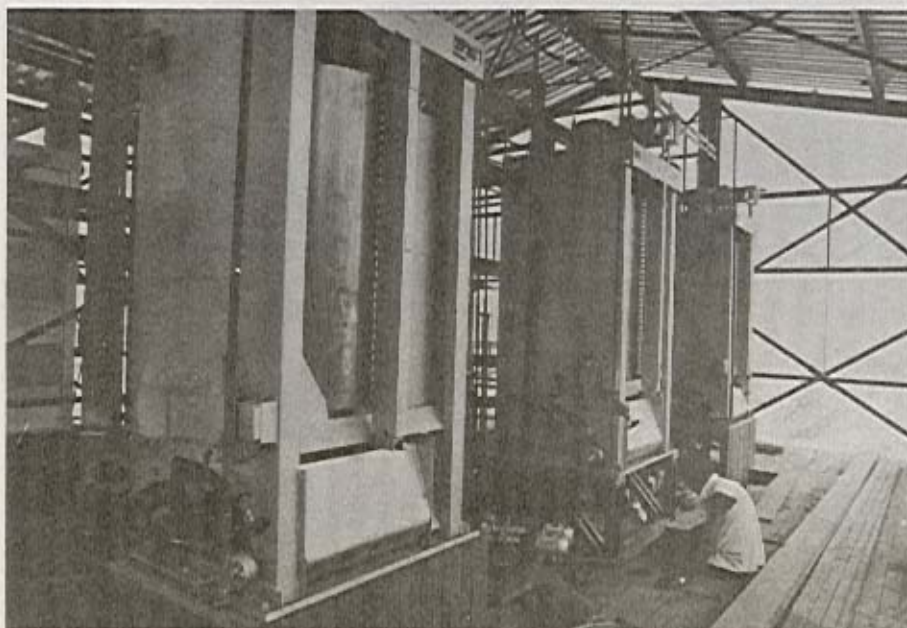


Figura 44 – Montagem de máquinas de Gelo com Cilindro Rotativo – Tipo Sabroe – Capacidade 0,6 T/H – UN – Angra III

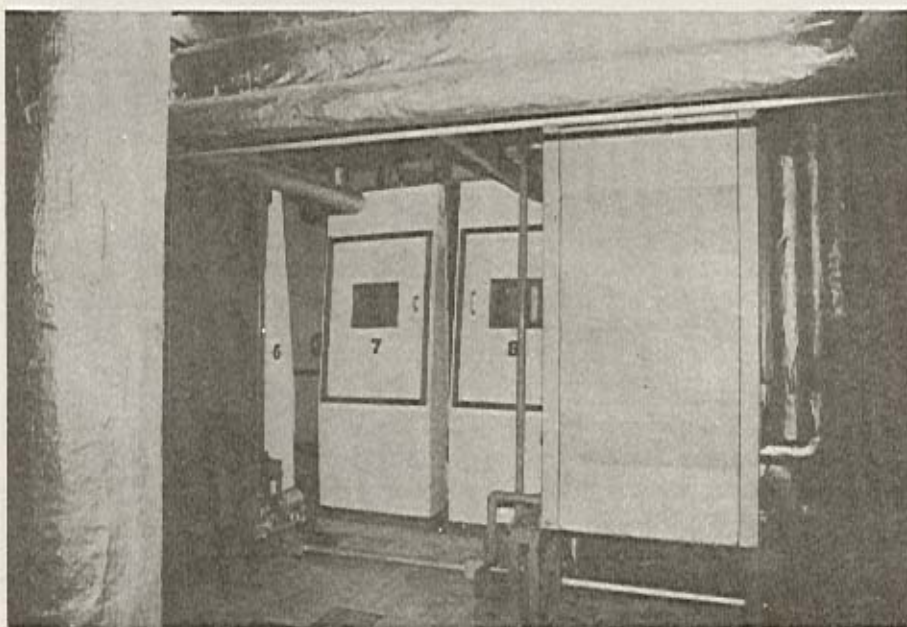


Figura 45 – Máquina de Gelo com Cilindro Rotativo – Tipo Sabroe – 0,6 t/H – UHE – Nova Avanhandava

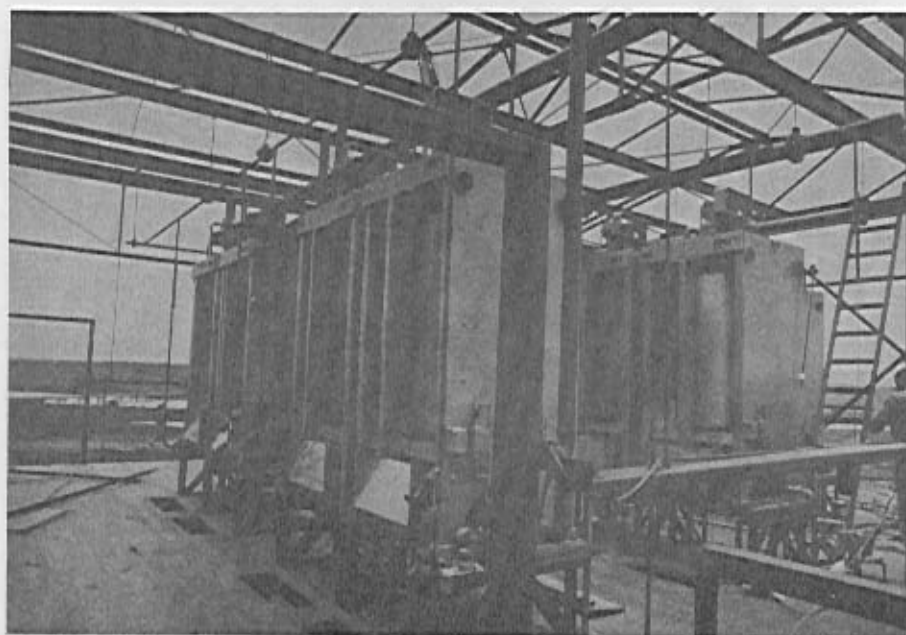


Figura 46 – Montagem de Máquinas de gelo com cilindro rotativo Tipo Sabroe de Capacidade 0,6 t/h UHE – Três Irmãos.

O primeiro tipo não tem dispositivo mecânico para remoção de gelo – na parte do próprio depósito e necessita da presença contínua dos operários durante extração. Se caracteriza pelo baixo custo de construção e confiabilidade de operação a qual às vezes é laboriosa mas segura, sem grandes riscos para a continuidade de fornecimento. Obviamente este tipo de depósito é justificado pela mão de obra, disponível. Este tipo é dominante do Brasil para pequena e médias capacidades de estocagem – na faixa entre 5 e 40 toneladas. Às vezes dois depósitos deste tipo são colocados juntos, duplicando assim a capacidade e ficam divididas com espaço de operação, o que serve para os dois depósitos, no meio deles.

O segundo, tipo cilíndrico, é muito pouco usado e serve para pequenas capacidades, aproximadamente até 20 toneladas. Tem pouca confiabilidade. No caso de defeito da parte mecânica, trabalha no regime adverso – precisa-se remover manualmente todo gelo, o que é difícil e lento.

O último tipo – “rake” – apesar da parte mecânica e elétrica complexa, se caracteriza pela alta confiabilidade, sendo usado para grandes capacidades, entre 70 até 100 toneladas. O custo do depósito e da manutenção é, porém, alto. É usado para grandes obras onde suporte técnico é maior.



Figura 47 – Raspador ("Rake") do Silo de Gelo – UHE – Porto Primavera.



Figura 48 – Construção e Montagem de Depósito de Gelo – Tipo Gravidade – UHE – Nova Avanhandava.

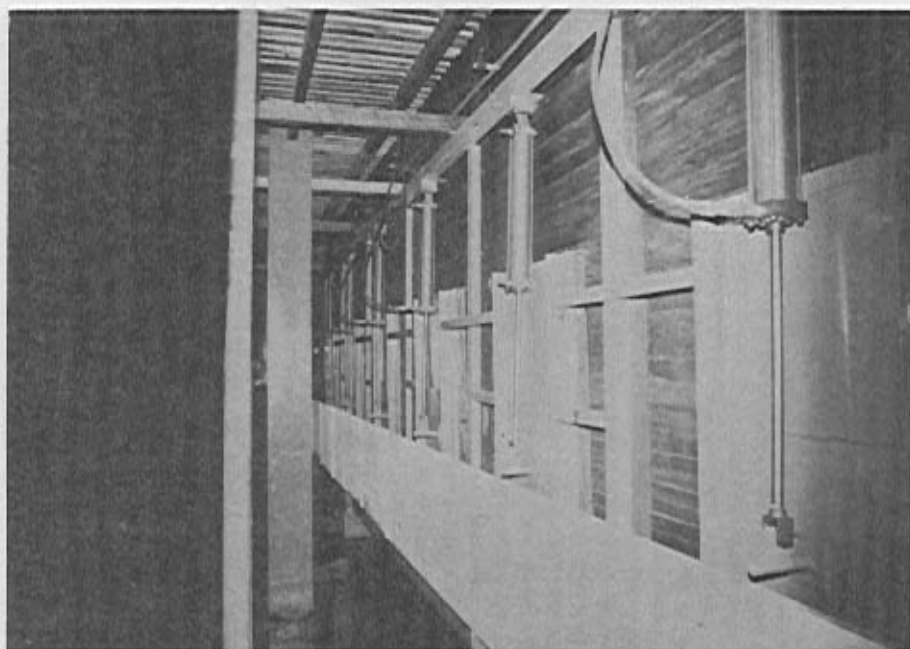


Figura 49 – Comportas de Descarga do Depósito de Gelo – Tipo Gravidade – UHE – Nova Avanhandava.

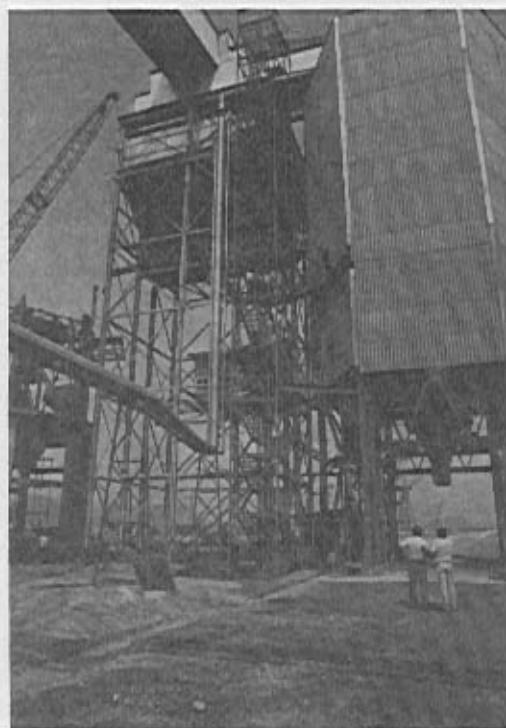


Figura 50 – Vista Geral – Durante Fase de Montagem – do Depósito de Gelo tipo Gravidade – UHE – Itaiparica.

O transporte de gelo, é outro problema, também, sendo difícil pelos mesmos motivos que dificultam o armazenamento.

O ponto de alimentação do gelo encontra-se, normalmente, ao redor 20 m. acima do nível do terreno, pois as balanças e dosadores de gelo ficam situados acima dos misturadores de concreto.

Existem duas opções:

- Transportar gelo para cima, gelo este produzido no nível do terreno ou;
- Localizar a fabricação de gelo e os depósitos na altura do ponto de utilização.

Pela lógica parece mais justo transportar água para cima e lá produzir gelo, em vez de transportar o gelo para cima. Esta solução é dominante no Brasil, apesar do custo das estruturas metálicas para condicionar a fábrica e depósitos de gelo no nível desejado.

Com esta solução se consegue alta confiabilidade de alimentação do gelo, fator considerado decisivo nas condições de trabalho na obra.

Em Ilha Solteira se instalou a fábrica e os depósitos no nível do terreno e gelo foi transportado pneumáticamente para cima. Porém, além das precauções e diversos recursos adicionais (sistema de duplicação de tubo e potentes resfriadores de ar insuflado) esta solução não traz segurança, principalmente pelo fato que as solicitações de fornecimento de gelo da central de concreto, pelo tipo de trabalho da central, não são contínuas e portanto o transporte não pode ser contínuo ficando de certo modo imprevisível. Isso aumenta as dificuldades, pois os tubos começam a esquentar e no início de transporte, após paralisações, o gelo começa a aderir.

Gelo é um material delicado e produzido por equipamentos caros e complicados e não merece um tratamento que o deteriore.

Dessa forma o transporte pneumático não é conveniente, e além disso a energia aplicada para transporte elimina uma parte do valor calórico do gelo.

Nas condições normais e com os equipamentos de transporte pneumático corretamente dimensionados, estas perdas representam aproximadamente 2,5%, o que não é uma bagatela. Nas condições práticas podem ser superiores.

Para transporte horizontal ou semi-horizontal com pequenas inclinações são usados dois tipos de transportadores:

- Helicoidais
- Correia

Não existe uma clara preferência justificando um ou outro tipo de transportador. Por exemplo, nos Estados Unidos dominam transportadores helicoidais, na Europa os de correia. No Brasil os transportadores helicoidais representam a maioria das soluções, principalmente para as grandes obras.

Em geral os transportadores de correia levam vantagem para distâncias superiores a 10 – 15 m.

Ambos os tipos têm problemas no caso de interrupções de transporte, cuja origem e natureza térmica é do próprio gelo.

Por esse motivo os transportadores, principalmente os de tipo helicoidal devem parar vazios, para minimizar as perdas por derretimento e facilitar a partida.

A dosagem, ou seja, a pesagem do gelo não é problemática, pois os volumes pesados são pequenos. O problema existe na alimentação, das balanças, feita na maioria dos casos mediante curto e ágil transportador helicoidal, a partir de um tanque intermediário ("day tank") com função de servir como volante.

Diversas tentativas para automatizar este tanque não deram resultados satisfatórios. Desta maneira existe ainda a necessidade de colocar um operador para controlar o nível de gelo.

A função desse operador é simples, porém de grande responsabilidade, pois da habilidade ou de erros dele depende a regularidade de dosagem de gelo para cada chamada de balança.

A Figura 1, fornece informações sobre os equipamentos de produção de gelo, nas diversas obras citadas.

A Figura 51 mostra esquematicamente um sistema de refrigeração junto às centrais de concreto.

As Figuras 52 a 54, mostram as instalações de refrigeração de algumas obras construídas no Brasil.

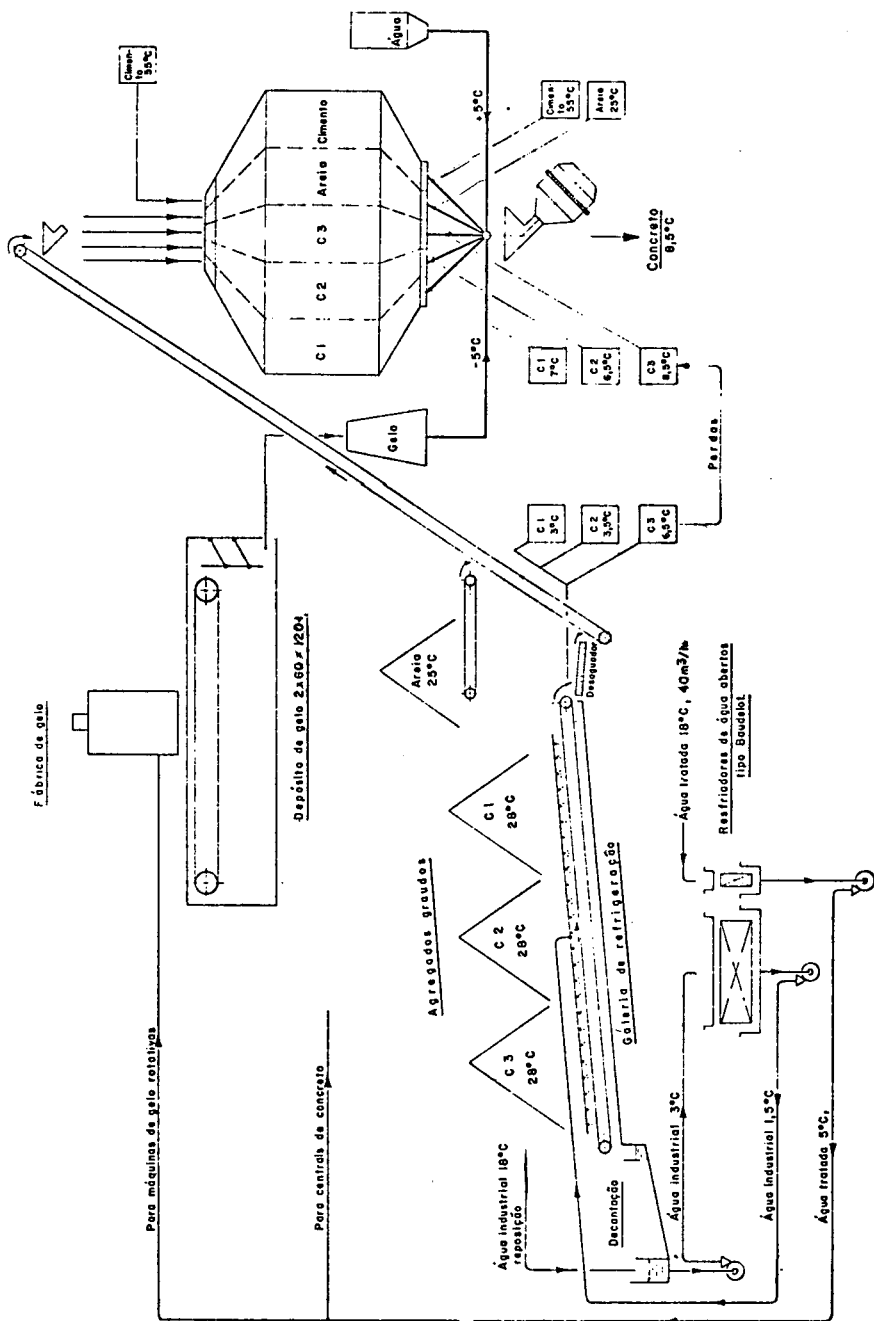


Figura 51 – Sistemas de Refrigeração atuando junto a Central de Concreto [18]



Figura 52 – Ilustrações da Refrigeração na Obra da Barragem de Ilha Solteira.



Figura 53 – Instalações de Refrigeração do Concreto na Obra de Tucuruí – Eletro-norte



Figura 54 – Instalações de Refrigeração de Concreto, na Margem Esquerda – Canteiro de Obras de Itaipu

7.6 COMPRESSORES DE AMONIA (NH₃)

Compressor é o equipamento que mantém a circulação de NH₃, representando por este motivo uma essencial importância na instalação frigorífica.

Os compressores rotativos anteriormente usados em primeiro estágio de compressão (chamado "booster"), – necessário para baixas temperaturas exigidas para fabricação de gelo em escamas – não estão sendo mais usados pelo alto custo de manutenção e reparos provocados pelos desgastes das palhetas e pelo baixo rendimento.

O compressor de pistão – multicilindro – tipo alternativo, mostrou sua superioridade e está sendo usado na faixa de potência de acionamento entre 40 e 350 HP., por unidade.

Os compressores de tipo parafuso, também estão sendo usados, para as potências de acionamento maiores, entre 500 e 900 HP.

O compressor de grande porte, de dois ou quatro cilindros verticais, de baixa rotação, de construção especial, com pistões secos, isentos a óleo, está sendo usado para as potências de acionamento entre 300 e 1300 HP.

A grande vantagem do compressor seco, além de um bom rendimento, é a instalação frigorífica que fica livre de óleo, simplificando manutenção e melhorando o rendimento dos aparelhos e intercambiadores, pela melhor transferência de calor.



Figura 55 – Fase de Montagem dos Compressores Multicilindro – UHE – Tucuruí



Figura 56 – Compressores Multicilindro – em funcionamento – na Sala de Compressores – UHE – Tucuruí



Figura 57 – Compressores Tipo Parafuso – UHE – Itaipu

Em compensação exige grandes bases de concreto, grandes e caros motores elétricos, o que torna a sua reutilização pouco viável.

Este último detalhe, está favorecendo o emprego dos compressores menores, de pistão – multicilindros – pois no caso de reutilização para uma ou outras obras é mais fácil adaptá-los às novas situações.

Este tipo de compressor está dominando no Brasil, e é uma máquina confiável.

A vida útil dos compressores é de aproximadamente, de 20 a 30 anos, enquanto a instalação de resfriamento de concreto funciona numa determinada obra entre 4 e 7 anos. Isto significa que os compressores passam (junto com os outros equipamentos) de uma obra para outra. Os compressores de Ilha Solteira, por exemplo, passaram a ser utilizados posteriormente em Água Vermelha.

Compressores de Água Vermelha passaram para Tucuruí e depois para Porto Primavera. Os de Angra I para Cachoeira Dourada, os de Capivara para Nova Avanhandava, os de São Simão para Rosana.

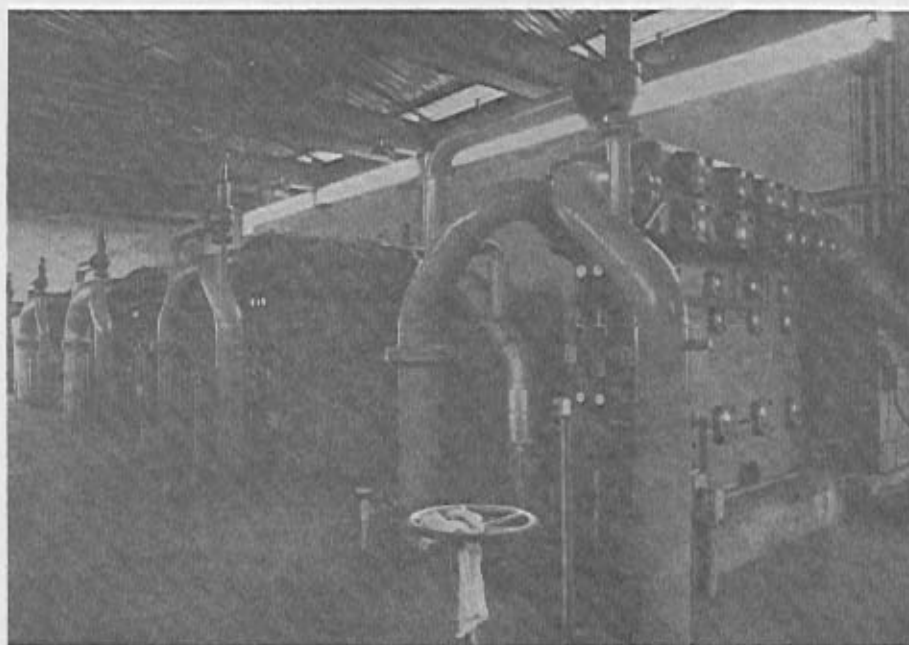


Figura 58 – Compressores de Grande Porte (Superior a 700 HP) – UHE-Itaipu

Este processo de reutilização deve continuar, ainda, por um bom tempo.

Reutilização dos compressores grandes fica mais difícil, pois as capacidades necessárias para produzir gelo ou resfriar água ou ar, a cada obra, são diferentes. Uma máquina menor em maior quantidade oferece melhores condições de adaptação. O patrimônio das firmas proprietárias fica assim melhor aproveitado. Além disso em uma determinada instalação, um número menor de máquinas maiores não oferece muita segurança e flexibilidade, fator decisivo de uma instalação de resfriamento de concreto.

Em geral os reparos dos compressores parafusos ou isentos de óleo são mais caros, mais demorados, exigindo pessoal especializado, ao contrário dos compressores multicilindros de pistão, cuja construção é simples, sendo que as próprias oficinas de obra são aptas para dar manutenção e executar troca de peças.

Este argumento é importante pelo fato de que as obras, onde é necessário resfriamento de concreto, são executadas em lugares cada vez mais distantes, onde ao contrário de grandes centros urbanos ou industriais não existe apoio técnico e a obra deve ser autônoma.

7.7 CONDENSADORES DE AMONIA (NH₃)

Como condensadores de NH₃ entram em consideração dois tipos principais:

- . Condensadores verticais abertos
- . Condensadores horizontais, fechados (tipo “shell & tube”)

Os condensadores evaporativos, que unem além de condensação a função de torre de resfriamento, não estão sendo usados atualmente pelos seguintes motivos:

- O condensador tem vantagem onde há pouco espaço, pois é um equipamento compacto e leve (muitas vezes colocado acima dos prédios) o que obviamente não é o caso dos canteiros de obras.
- O canteiro de obras na maioria dos casos tem ambiente com bastante poeira, a qual se deposita nos tubos, os quais por sua construção compacta são de limpeza difícil.
- A reutilização deste tipo de condensador é difícil pois o trabalho em paralelo de diversos tipos de condensadores encontra dificuldades e requer recursos adicionais;
- A desmontagem, armazenamento e montagem, novamente, é problemática.

Sobre os dois tipos de condensadores mencionados no início, pode-se dizer que a primeira vista parece mais vantajoso usar condensadores verticais, que podem trabalhar com água suja, podem ser limpos durante o funcionamento, apesar de consumirem mais água.

A localização do canteiro de Usinas Hidrelétricas, obrigatoriamente feito na proximidade do rio favorece esta solução, usando água do rio, apropriada, sem nenhum tratamento para estes condensadores.

Outra vantagem reside no fato que a temperatura da água do rio é, aproximadamente, 30°C mais baixa que água recirculando entre condensador horizontal e a torre de resfriamento de água.

As primeiras obras usaram condensadores verticais.

Analisando, porém os problemas com maior profundidade, se chegou à conclusão que fica mais barato e mais prático usar condensadores horizontais com torres de resfriamento de água, localizadas próximas da sala dos compressores, em vez de bombear grandes quantidades de água do rio e retornar com esta água de novo para o rio.

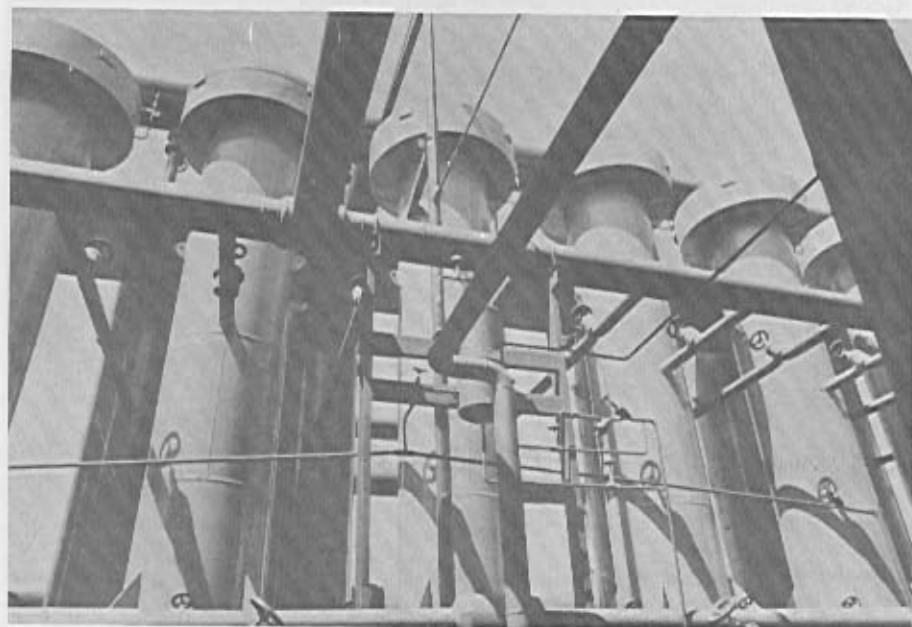


Figura 59 – Condensador Aberto – UHE – Porto Primavera



Figura 60 – Vazos Condensadores tipo Shell and Tube – UHE – Três Irmãos

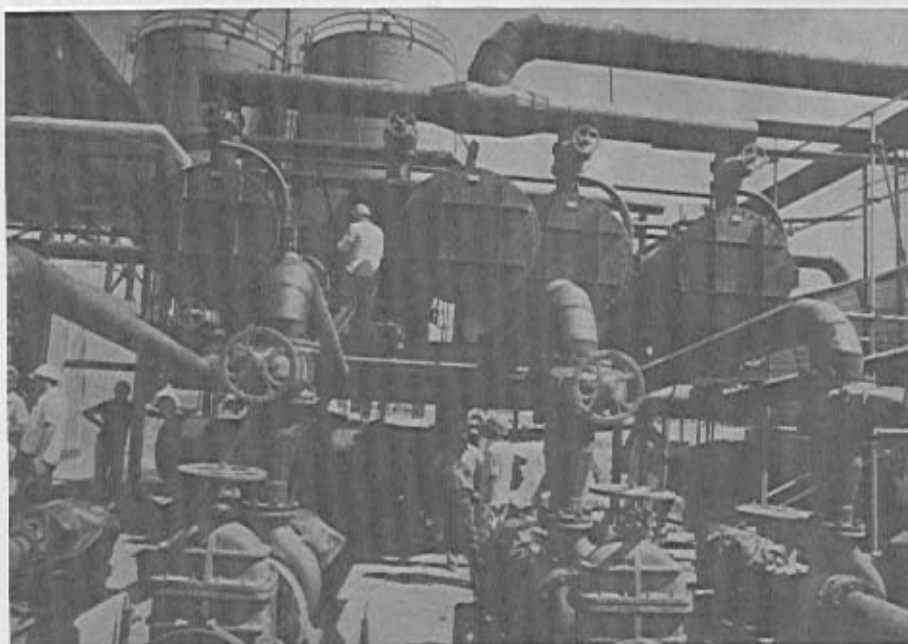


Figura 61 – Vasos Condensadores Tipo Shell and Tube, UHE – Itaipara.

A manutenção das bombas colocadas longe, nas margens do rio, também é ponderável.

Como de qualquer modo se requer água limpa, tratada para resfriamento dos cabeçotes dos cilindros dos compressores NH_3 , há uma preferência pela solução com torre, pelo motivo de pouco consumo de água visto que da ordem de apenas 1,5% de quantidade de água do rio, é necessária para o condensador vertical ficar, alimentado com água tratada.

Essa água em recirculação resolve problemas do resfriamento dos cabeçotes.

As torres de resfriamento de água são usadas com enchimento autolavável, de fácil acesso e limpeza, com menores transtornos para as condições na obra.

As vantagens de uso de torres se tornaram tão evidentes que se chegou a usar condensadores verticais, reaproveitados das outras obras, em conjunto com torre de resfriamento de água. Uma certa curiosidade técnica.

Essa solução estava obrigando a usar dois sistemas, de bombeamento, invertidos de água em circulação, pois nos condensadores verticais abertos, onde a água desce por gravidade a circulação era interrompida.

7.8 SALA DOS COMPRESSORES

O caracter temporário das instalações, como já citado, influi no tipo de construção desses recintos.

Construção de alvenaria ou mista de concreto, representa portanto uma excessão.

A construção típica e absolutamente dominante é estrutura metálica. Cada empresa tem padrões diferentes de largura e altura. O comprimento fica sempre modulado.

Altura considerada mínima é de 3,5 m e na maioria dos casos 4,0 m livre, no ponto mais baixo.

Os cabos elétricos e tubulações de água para resfriamento dos cabeçotes são colocados nas canaletas feitas no piso, cobertos com grelhas de aço. Com isso as salas ganham um aspecto de boa visibilidade e adequada segurança. Essas salas pelo tipo de estrutura se caracterizam pela boa ventilação natural.

Alojam, além dos próprios compressores e painel elétrico geral de controle e segurança os:

- Resfriadores intermediários;
- Separadores de óleo;
- Separadores de líquido;
- E algumas vezes, bombas de NH_3

Na maioria dos casos os condensadores e reservatórios de NH_3 são colocados fora das salas dos compressores, ao ar livre.

Por motivo de segurança, além de óbvio argumento funcional, a sala dos compressores NH_3 somente aloja equipamentos da própria instalação frigorífica.

A parte elétrica, como os quadros elétricos de distribuição e proteção de baixa tensão, as respectivas chaves elétricas de partida, na maioria dos casos são colocados fora, em um outro prédio, junto ou separados da cabine de força de alta tensão, a qual, de qualquer maneira, é separada.

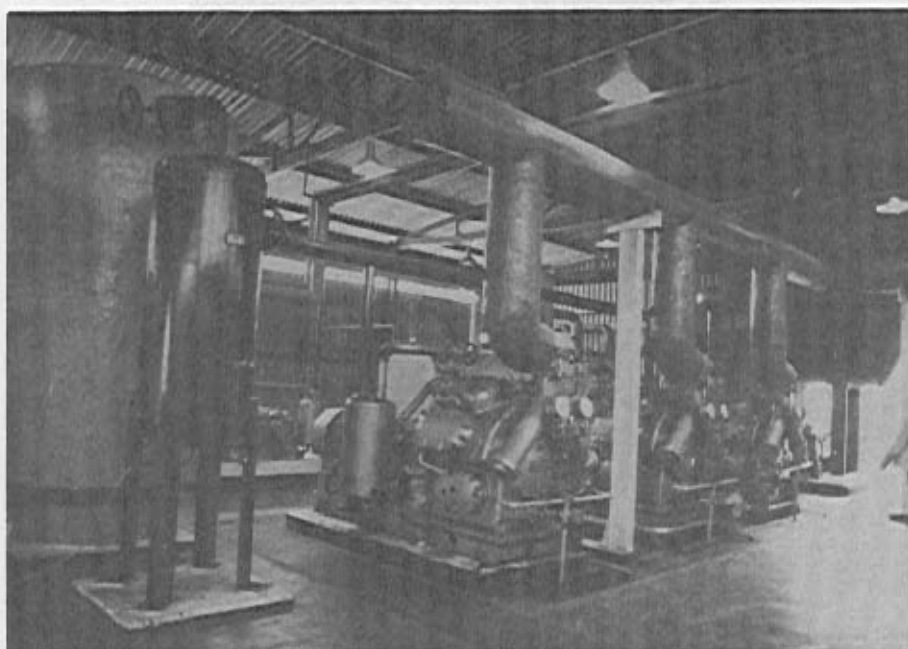


Figura 62 – Vista da Sala de Compressores – UHE-Três Irmãos, visualizando as canaletas dos tubos de água para os cabeçotes dos compressores, e dos cabos elétricos.



Figura 63 – Vista Geral da Sala dos Compressores – UHE Itaparica

7.9 ESTRUTURA METÁLICA DE SUPORTE

Estruturas metálicas apresentam um elemento muito importante na instalação frigorífica para resfriamento de concreto.

Além da mencionada estrutura para sala dos compressores existem diversas outras, para:

- Galeria de resfriamento dos agregados dentro das quais há as correias transportadoras e peneiras desaguadoras;
- Salas dos resfriadores de água, Baudelot, e sala de bombas de água gelada;
- Os tanques de água gelada, no caso dos resfriadores inundados;
- Os tanques de decantação;
- Fábrica de gelo, depósitos e compartimentos dos resfriadores de ar com equipamentos auxiliares.

As primeiras quatro estruturas são horizontais, pois a altura delas ficam entre 4 e 10 m aproximadamente e são extensas.

O último tipo de estrutura metálica, para fábrica de gelo é de tipo claramente vertical pois com as dimensões da base ao redor de 10 m X 10 m tem uma altura chegando a 35 m correspondente a um prédio de 10 andares.

Todas estas estruturas ficam isoladas termicamente com painéis pré-fabricados.

A estrutura da fábrica de gelo tem no nível superior as máquinas de gelo. Abaixo delas, o depósito de gelo.

Abaixo dele fica localizado o compartimento do resfriador de ar (se existe). Em seguida, abaixo dele, ficam localizadas (às vezes) as bombas de NH_3 com respectivos separadores de líquido (equipamento este servindo para resfriador de ar ou para máquinas de gelo, conforme solução adotada). As vezes ficam neste nível escritórios ou até laboratórios de concreto (Itaipu por exemplo).

Nível do terreno às vezes fica aproveitado para oficinas ou garagem.

Dessa forma essa estrutura vertical fica, as vezes, totalmente aproveitada. Por exemplo na obra de Usina Nuclear Angra III, na estrutura da fábrica de gelo, abaixo do depósito de gelo foram localizados os condensadores NH_3 e no nível do terreno a sala dos compressores, com todos os outros aparelhos,

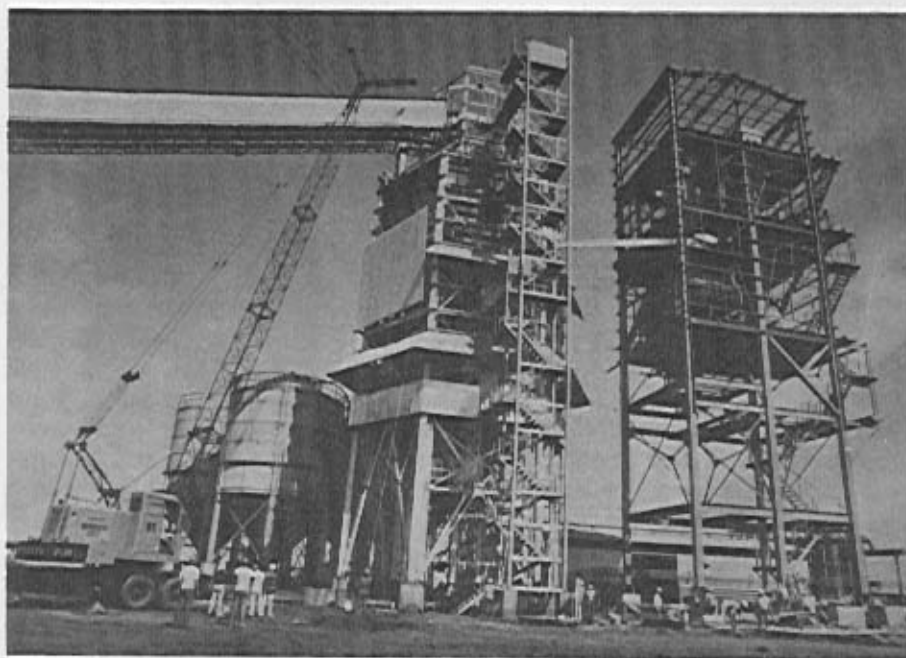


Figura 64 – Fase de montagem das Estruturas Metálicas da Central de Concreto (à esquerda) e Fábrica de Gelo (à direita), UHE – Porto Primavera.

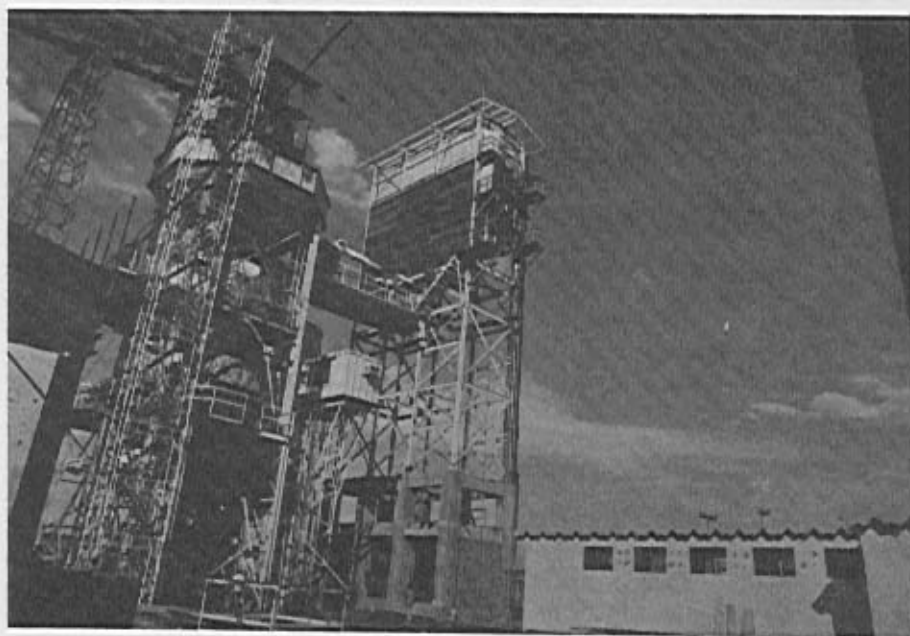


Figura 65 – Estrutura Metálica para Fábrica de Gelo. Na parte Superior a sala para Máquinas de Gelo e à Esquerda a Central de Concreto – UHE – Cachoeira Dourada.

de maneira que, unicamente, a torre de resfriamento de água ficou localizada fora da estrutura.

Caso o canteiro tenha mais que uma central de concreto a estrutura da fábrica de gelo pode ser dupla, alojando duas fábricas de gelo separadas, dois depósitos de gelo separados e se fôr o caso dois compartimentos separados dos resfriadores de ar.

Para exemplificar, na Figura 1 são citadas as estruturas metálicas, suportes usadas nas obras.

Estruturas metálicas duplas das obras de Três Irmãos e Porto Primavera ao contrário das outras duplas, são executadas como unidades gêmeas, porém autônomas, colocadas sobre bases separadas, podendo ser assim reaproveitadas, no futuro, para Centrais de Concreto separadas, colocadas nos lugares ou obras diferentes.

Por este motivo estas estruturas tem duas escadas independentes, uma em cada parte.

7.10 ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico faz parte, indispensável e de grande importância, da instalação frigorífica e pode ser dividida em:

- isolamento dos compartimentos frios, compostos em geral de superfícies retas e;
- isolamento das tubulações, aparelhos frios e dutos de ar, cujas superfícies são cilíndricas ou curvas.

São vários os compartimentos a serem isolados:

- depósitos de gelo;
- salas das máquinas de gelo;
- compartimento dos resfriadores de ar;
- compartimento dos resfriadores de água Baudelot;
- sala de bombas de água gelada;
- tanques de decantação;



Figura 66 – Estrutura Metálica para Fábrica de Gelo. Na parte Superior a sala das Máquinas e Depósito de Gelo. Ao nível do Terreno a Sala dos Compressores, condensadores. Os resfriadores de Água estão no Nível Intermediário. U.N. Angra III.



Figura 67 – Fase de Montagem das Estruturas Metálicas da Fábrica de Gelo e Central de Concreto – U.H.E. – Três Irmãos.

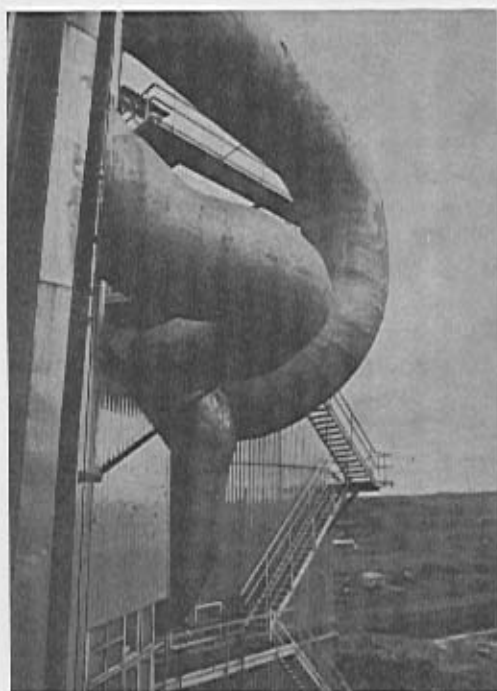


Figura 68 – Estruturas já Montadas e Isolamento dos Dutos de Ar, também executados – U.H.E.-Três-Ir-mãos.

- tanques de água em geral;
- estruturas das galerias de resfriamento dos agregados;
- compartimentos dos desaguadores;
- estruturas de alimentação com agregados resfriados das Centrais de Concreto e finalmente;
- as próprias Centrais de Concreto, e os seus silos de agregados;

Há muito tempo, somente se usou isolamento chamado convencional, composto de placas de poliestyreno expandido (Styropor, Isopor etc) colocado manualmente no lugar da aplicação. Este isolamento está cedendo, gradativamente, o lugar para os painéis pré-fabricados, apenas montados e ajustados no lugar, os quais acompanhando o desenvolvimento geral da técnica de isolamento térmico, estão ultimamente dominando o campo de utilização.

O isolamento convencional está, ainda, continuando a ser aplicado nos tanques de decantação ou outros tanques de água gelada em geral e

nos depósitos de gelo tipo gravidade. Nestes dois casos os painéis não são justificados tecnicamente e também economicamente.

O isolamento em painéis leva grande vantagem para isolamento das grandes superfícies livres formadas pelas estruturas metálicas, tanto pela rapidez e simplicidade de colocação como também para reaproveitamento futuro.

O revestimento desses painéis foi feito inicialmente de madeira compensada, sendo que hoje é feito de chapa de aço pré-pintada. O núcleo desses painéis inicialmente feito de poliestireno expandido, hoje são feitos de poliuretano, material melhor, apesar de ser mais caro.

A lã de vidro foi muito pouco usada e com resultados não satisfatórios, por motivo da composição aberta deste material fibroso, ao contrário de outros materiais mencionados, que se caracterizam pela estrutura celular rígida e fechada. Portanto estes materiais são isentos de absorção e migração de umidade, fenômenos que acompanhando fisicamente uma queda de temperatura dentro do próprio isolamento.

A lã de vidro, por estas desvantagens, não está sendo utilizada, com raras exceções, como isolamento do frio. Uma destas exceções é o caso do isolamento dos silos de agregados nas Centrais de Concreto, cujas superfícies são irregulares e cheias de vigamento. Estas superfícies são isoladas com mantas de lã de vidro e impermeabilizadas na parte externa. Um certo compromisso feito para evitar outras maneiras de isolamento mais caras.

Dois tipos dos compartimentos cujo isolamento parece não ser justificado, mas leva certas vantagens, merecem ser mencionados:

— Salas das Máquinas de Gelo

Nessas salas existem aberturas no piso, as quais na prática, nem sempre são fechadas e conduzem ar quente de cima para baixo, o que fica fortalecido por saídas de ar frio mais pesado, por aberturas de saída de gelo no piso do depósito qualquer que seja o tipo dele. Forma-se assim um fluxo vertical, podendo ser chamado como “efeito invertido de chaminé”. O isolamento das salas de máquinas minimiza com muita eficiência este fenômeno. A entrada de ar quente no depósito de gelo, aumenta não somente a temperatura, mas provoca empedramento do gelo, pela condensação e congelamento da umidade de ar sobre a superfície de gelo.

As observações práticas mostraram que o isolamento das salas de máquinas de gelo é plenamente justificada.

– Sala de Bombas de Água Gelada

Trata-se de salas relativamente pequenas. A prática mostrou que fica mais interessante e não muito mais caro isolar ambientes em vez de isolar as tubulações, com coletores, válvulas etc., do sistema de água gelada. Ganha-se um aspecto de fácil acesso para revisões e reparos, melhor visibilidade, eliminando necessidade de recolocação de isolamento retirado, com mais um argumento de boa reutilização dos painéis no futuro.

O isolamento das tubulações, aparelhos de dutos de ar é feito ainda com técnica convencional usando calhas e segmentos de poliestireno expandido. Sistema laborioso, demorado, caro e perturbando a obra pela sujeira inevitável pelo uso de asfalto necessário para aplicação.

Aplicação de poliuretano, isolamento melhor e cada vez mais usado nas instalações frigoríficas em geral, não é justificado pelo carácter temporário das instalações de pré-resfriamento de concreto, pois trata-se de material mais caro.

7.11 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Não há especiais particularidades nessa parte, sendo que instalações elétricas obedecem padrões e normas usuais.

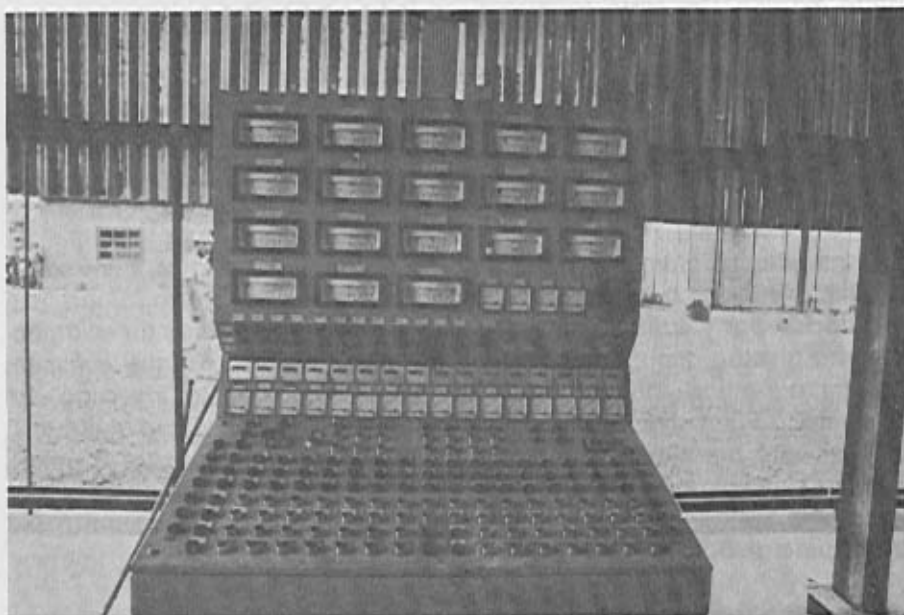


Figura 69 – Mesa de Controle do Sistema de Refrigeração – UHE Tucuruí

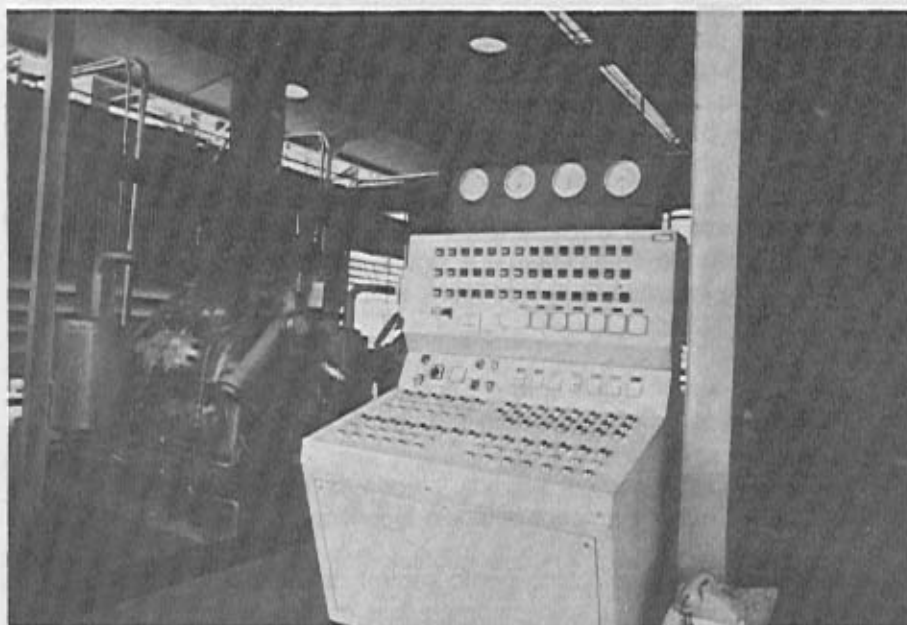


Figura 70 – Mesa de Controle do Sistema de Refrigeração, na Sala dos Compressores – U.H.E.-Porto Primavera.

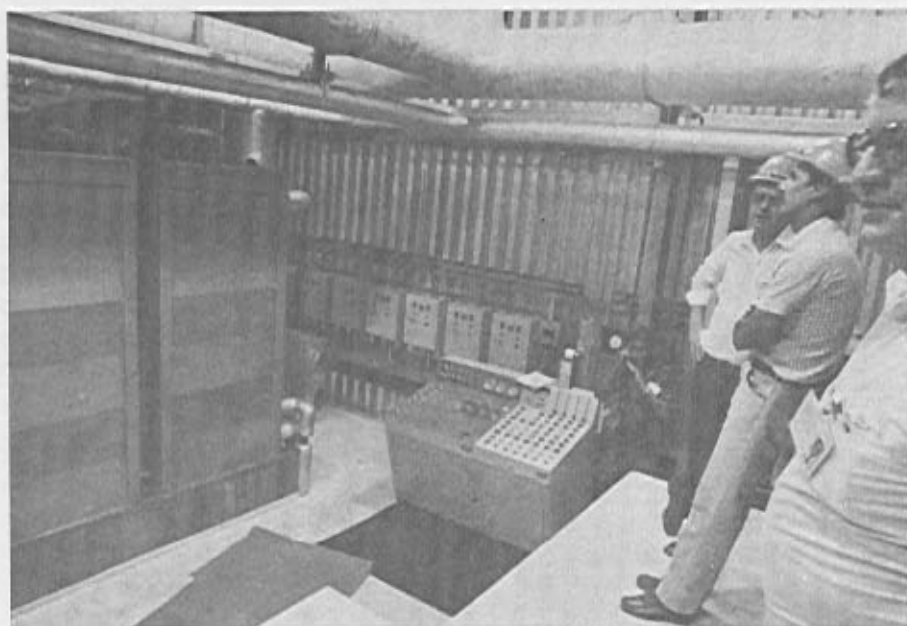


Figura 71 – Mesa de Controle do Sistema de Refrigeração na sala das Máquinas de Gelo – U.H.E.-Porto Primavera.

As chaves de partida para motores dos compressores, antigamente colocados individualmente perto de cada compressor, no decorrer do tempo estão cedendo lugar para solução centralizada – onde todas as chaves, inclusive respectiva proteção, para todos os outros motores (por exemplo bombas, ventiladores etc.) ficam juntas num quadro principal localizado na maioria dos casos, num compartimento separado.

Na sala dos compressores é colocado apenas um painel central, em forma de uma semimesa onde além de sinalização de funcionamento de todos os motores e causas de irregularidade e alguns alarmes, tem indicadores dos instrumentos de medição de temperatura a distância, de todos os importantes pontos de instalação.

Essa sala tem comunicação com a Central de Concreto devendo obedecer as solicitações desta Central a respeito de fornecimento de gelo e ar frio.

A sala dos compressores, em seguida, atende as solicitações da fábrica de gelo fornecendo maior ou menor potência frigorífica.

A sala dos compressores como ponto central da instalação frigorífica tem comunicação fônica com a sala das máquinas de gelo, também de vital importância.

8 PERSPECTIVAS DE USO

A construção de obras massivas, em curtos espaços de tempo, a aplicação de concretos bombeados a grandes distâncias e alturas, a execução de túneis, cada vez mais se faz necessário para possibilitar o desenvolvimento das Nações e o conforto da População.

O processo de resfriamento do concreto, é uma técnica disponível nesse conjunto, devendo ser avaliada economicamente em cada caso.

Sob o ponto de vista das hidroelétricas, sabe-se que o Brasil tem grandes bacias fluviais resultando em enorme potencial hidrelétrico estimado hoje em mais de 250.000 MW entre usinas existentes, planejadas para os próximos anos, e inventariadas.

E ainda, que são excluídos desse valor várias reservas hidroelétricas da bacia amazônica e miniusinas na faixa de geração entre 10 e 50 MW.

Desse potencial se aproveitou durante os últimos 20 anos aproximadamente 25%, restando um potencial superior a 150.000 MW.

Admitindo que apenas 50% sejam usinas grandes, requerendo concreto de massa, a utilização de resfriamento de concreto em termos de potência total dos compressores de refrigeração pode ser estimada em 170.000 HP e a produção de gelo em escamas em 700 toneladas/hora, ou seja aproximadamente 12 vezes a potência dos compressores de refrigeração e da produção de gelo na obra de UHE Itaipu, considerada a maior obra do gênero do mundo.

9 ÍNDICES E CUSTOS

Alguns coeficientes podem ser citados, em decorrência das várias informações obtidas no transcorrer dessas duas décadas de aplicação da técnica do pré-resfriamento do concreto.

Assim é que:

- * A capacidade frigorífica instalada, observada nas várias obras esteve no intervalo – 15200 Kcal/m³ (+1,97; – 1,52 Kcal/m³)
- * A potência dos Compressores de Amonia (NH₃) esteve no intervalo – 12 HP/m³/hora (+ 3,6; – 4,8 HP/m³/hora)
- * O volume de deslocamento dos compressores de Amônia (NH₃) esteve no intervalo – 4,9 m³/h (+ 1,6; – 1,3 m³/h) para cada “HP” dos motores desses compressores
- * O custo das instalações esteve ao redor de 550 US\$ ou seja – $550 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3/\text{h } ^\circ\text{C}}$ para cada 1 °C de abaixamento da temperatura do concreto, a uma determinada produção (m³/h) de concreto.

Esse dados referem-se à instalações com capacidades de produção de concreto na faixa de 100 m³/h a 300 m³/h.

Para ilustrar as vantagens do emprego do resfriamento do concreto é apresentado um exemplo com as seguintes premissas:

- Custo da instalação – $550 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3/\text{h } ^\circ\text{C}}$
- Depreciação – 100% na obra
- Custo operacional das instalações = $0,8 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$ [24]
- Custo do cimento (posto obra) = 90 US\$/t

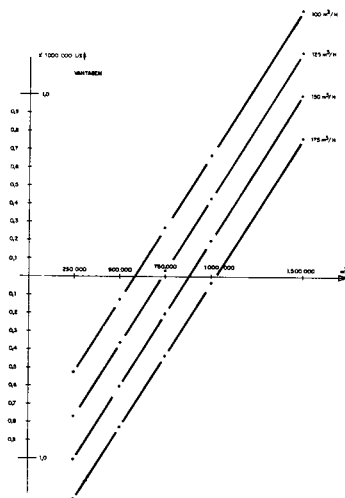


Figura 72 – Exemplo das vantagens econômicas do emprego do resfriamento do concreto.

- Custo de aditivo retardador – Plastificante (Posto obra) = $1,0 \frac{\text{US\$}}{\text{kg}}$
- Redução do consumo de cimento (devido à redução da temperatura) [10]
[11] = $\frac{0,3\%}{^{\circ}\text{C}}$
- Consumo de cimento = 200 kg/m^3
- Consumo de aditivo = $1,5 \text{ kg/m}^3$
- Resfriamento do concreto de 24°C para 7°C

Através desses valores chega-se as curvas da Figura 72, onde se observa que para instalações com capacidade de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, para volumes de concreto (na obra) a partir de aproximadamente 600.000 m^3 , pode-se ter vantagens econômicas, com o emprego do pré-resfriamento.

Para capacidade maiores que $100 \text{ m}^3/\text{h}$, as vantagens se demonstram para maiores volumes de concreto.

Nota-se que foi considerada uma depreciação de 100% do custo da instalação, na respectiva obra. Entretanto, como se citou no item 7, tem havido, no Brasil, a reutilização dos componentes das instalações de refrigeração, o que evidentemente reduz o percentual de depreciação dos equipamentos, na referida obra, e consequentemente, desloca as curvas da Figura 72, para a esquerda, trazendo mais vantagens.

10

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) – "Concrete Manufacture Handling and Control" Bulletin nº 4 – Part. IV
– Design and Construction
Boulder Canyon Project – Final Reports
Bureau of Reclamation – 1947
- (2) – William R. Wang – James A. Rhodes
"Control of Cracking in Concrete Gravity – Dams"
Journal of the Power Division – A.S.C.E – 1959
- (3) – "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures"
A.C.I. – Committee – 207
- (4) – "Medidas de temperatura dos blocos 122 – PA-E-Jupia"
Relatório CESP – C-24/67
- (5) – Aurélio Buarque – Novo dicionário
- (6) – "Hot Weather Concreting A.C.I. – Committee 305
- (7) – Rede Geral das Estações Meteorológicas no Brasil 1944 – Ministério da Agricultura.
- (8) – Carlson, Roy; Houghton, Donald; Polivka, Milos "Causes and Control of Cracking in Reinforced Mass Concrete"
A.C.I. Journal – July 1969
- (9) – Houghton, Donald – "Concretes Strain Capacity Test – Their Economic Implication – Proceeding Engineering Foundation – Research Conference on Economic Construction of Concrete Dams – Asilomar Conference Grounds – Asilomar – California – May 1974.
- (10) – Andriolo – Francisco Rodrigues – "Construções de Concreto – Manual de Práticas para Controle e Inspeção" – Editora Pini – 1984.
- (11) – Andriolo – Francisco Rodrigues; Scanduzzi – Luércio – "Concreto e seus materiais – propriedades e ensaios" – Editora Pini – 1986.

- (12) – Jerome M. Raphael – “The Nature of Mass Concrete in Dams” – SP-55-6-A.C.I. – Douglas Mc Henry International Symposium on Concrete and Concrete Structures.
- (13) – Houghton, Donald – “Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete” – A.C.I. Journal – 75/58 – December – 1976.
- (14) – “Control of Cracking in Mass Concrete Structures” – Bureau of Reclamation – U.S. Department of the Interior.
- (15) – “Artificial Cooling By Water Flowing in Embedded Pipes” – Boulder Canyon Project – Final Reports – Part VII – Cement and Concrete Investigations – Bulletin 3 – Cooling of Concrete Dams.
- (16) – “Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete” – A.C.I. – Committee 207 – Concrete International/May – 1980.
- (17) – Andriolo – Francisco Rodrigues; Sgarboza – Bento Carlos – “Concretos para a obra de Água Vermelha” – CESP – 1974.
- (18) – Planejamento Executivo do Canteiro – Água Vermelha – Relatório AV-02-CESP. 1972.
- (19) – “Controle de Temperatura na Produção de Concretos – Relatório Tuc-40.6156-RE Tucuruí – Eletronorte – Outubro/1980.
- (20) – E. Casanova “Betonkuehlung beim Staudammbau fuer das groesste Wasserkraftwerk der Welt”
Die Kaelte und Klimatechnik 1979, Numero 4,5 e 6.
- (21) – T.M. Skwarczynski “Neus Wege in der Staudamm – Beton – Kuehlung” Ki Klima-Kaelte-Heizung 1988, Número 2.
- (22) – T.M. Skwarczynski “Nova tendência sobre resfriamento de concreto em barragens” 1988 Boletim de Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON).
- (23) – Elges, H.F.W.K; Druyts, F.H.W.M – “Hot Weather Concreting at Inanda Dam” – XVI = Icold – S. Francisco – E.U.A.
- (24) – Marcello A – Eusepi G. – Proverbio G. – Babbini – M – “Some Aspects of the Thermal Behaviour of Concrete in Dam Construction” XVI – Icold – S. Francisco – EUA – 1988.

11 AGRADECIMENTOS E PALAVRAS FINAIS

Cheguei ao Brasil no início de 1960.

São 28 anos de trabalho, muitas vezes sacrificando a família, que merece minhas desculpas neste momento.

Cheguei no navio "Andrea C" e, no porão, entre minha bagagem havia algumas anotações e dados sobre a técnica do pré-resfriamento de concreto.

Não poderia imaginar, que nesse material havia um valor tão grande e que isso fosse determinar os rumos da minha vida profissional.

Neste momento, tenho também que expressar meu agradecimento ao Eng^o Paulo Hubacher que, naquela época era Diretor Presidente da Indústria Elétrica Brown Boveri no Brasil, sendo quem insistiu para a minha transferência da filial Alemã, para a de Osasco em São Paulo, mediante uma contratação de quatro anos.

Ele me apoiou sempre até mesmo, às vezes, contra as diretrizes da matriz suíça. Proporcionou a realização da primeira máquina nacional, de gelo em escamas, rotativa, que projetei. Diversas máquinas desse tipo foram fabricadas e trabalham ainda hoje. A primeira máquina foi exposta, em funcionamento, na V Feira Mecânica no ano de 1964.

Com uma dessas máquinas foi construída também a primeira fábrica de gelo instalada para fazer as experiências na obra de UHE Jupia, marcando assim o início da aplicação do pré-resfriamento de concreto em massa, no Brasil.

Essa máquina entretanto parou de ser produzida e também desapareceram diversas firmas de porte, com marcante contribuição técnica para as instalações de pré-resfriamento de concreto.

Para citar tem-se: Fábrica Nacional de Compressores (SP), a que forneceu a primeira fábrica de gelo para Jupia; Tecfril (SP) que forneceu a primeira

grande Central de Refrigeração para obra de UHE Iha Solteira e depois para UHE Capivara; Danbras (Belo Horizonte), que forneceu as Centrais de Refrigeração para as usinas de Volta Grande, Itumbiara e Sobradinho; e finalmente Friotec (Porto Alegre) fornecendo equipamentos, pesados e de vulto para as diversas obras pesadas no Brasil.

Falando sobre desaparecidos, não se esquece do verdadeiro pioneiro do pré-resfriamento de concreto no Brasil, o estimado Eng^o Fausto Guimarães, falecido tragicamente em acidente aéreo, quem me incentivou desde o início e com quem passei muitas horas conversando sobre o assunto.

Merecem agradecimentos também os colegas da CESP, Logós, Itaipu e Eletronorte e das empreiteiras: Camargo Corrêa, CBPO, Norberto Odebrecht, Mendes Júnior, Andrade Gutierrez e Construtora Xingó - cuja indicação por nomes iria ultrapassar os limites deste livro, pois foram muitos, durante estes longos anos e que me apoiaram depositando confiança em meus trabalhos.

Analisando o passado sinto-me hoje profissionalmente realizado, vendo com satisfação, que os frutos do meu trabalho ajudaram a acompanhar o desenvolvimento do Brasil, o país que se tornou minha Pátria deixando para os engenheiros de outra geração aperfeiçoamento desta técnica de promissor futuro.

Tadeusz M. Skwarczynski

A elaboração deste texto objetivou registrar parte da experiência da Técnica da Refrigeração do Concreto que se desenvolveu no Brasil, a partir de 1966.

Esse registro, entretanto, não podia deixar de fazer referência à pessoas, equipes e empresas – citadas pelo Eng^o Tadeusz – que participaram desse desenvolvimento. Algumas dessas pessoas participam como convidados para comentários que prefaciam este texto.

No período de fechamento e revisão deste texto, paralelamente, estudava os trabalhos divulgados nos anuais do XVI^o Icold – realizado em Junho/1988 – San Francisco – California – E.U.A.

Pode ser observado, através de alguns trabalhos publicados, que a utilização do pré-resfriamento é considerada como novidade e vantagens técnicas ainda, em várias aplicações.

Os processos adotados, e citados nessas publicações assemelham-se aqueles empregados na década de 70, nas obras brasileiras.

Dessa forma o texto que se desenvolveu, relatando a experiência adquirida e aplicada no Brasil de forma contemporânea, poderá servir para reciclar informações e conhecimentos.

Francisco Rodrigues Andriolo