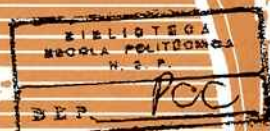




ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Construção Civil



boletim técnico - 07/86

MEDIDAS PREVENTIVAS DE CONTROLE DA TEMPERATURA QUE INDUZ FISSU- RAÇÃO NO CONCRETO MASSA

GEORGE INOUE
Mestre em Engenharia, EPUSP



Boletim patrocinado pela

COMPANHIA CIMENTO PORTLAND ITAÚ

MEDIDAS PREVENTIVAS DE CONTROLE DA TEMPERATURA QUE
INDUZ FISSURAÇÃO NO CONCRETO MASSA

George Inoue (*)

PALAVRAS CHAVE:

Agregados, barragens de concreto, cimentos, concreto massa, controle de temperatura, fissuração, propriedades térmicas, refrigeração.

RESUMO:

Este trabalho apresenta as causas e propriedades do concreto que influenciam a fissuração térmica do concreto massa, juntamente com as medidas usualmente empregadas para controlar a elevação da temperatura. Apresentam-se os resultados de ensaios realizados para as obras das barragens de Três Irmãos, Porto Primavera e os resultados das pesquisas realizadas para a construção da barragem de Boulder Canyon (Hoover Dam).

(*) George Inoue. Mestre em Engenharia - Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP. Professor, Engenharia Civil - UNESP.



Escola Politécnica - EPBC



31200052904

1. INTRODUÇÃO

O ACI Committee 207 (1) define concreto massa como "todo grande volume de concreto moldado in loco, com dimensões suficientemente grandes para que medidas sejam tomadas para combater a geração de calor e a consequente variação de volume, de modo a minimizar a fissuração". Portanto, a característica mais importante do concreto massa é o seu comportamento térmico.

Sendo as estruturas de concreto massa normalmente de grandes dimensões e o concreto possuindo características térmicas que possibilitam somente lentos movimentos de calor, ocorre que o calor desenvolvido pela hidratação do cimento tem dificuldade em fluir para o exterior.

As leis de transferência de calor demonstram que em sistemas com fonte interna de calor, este pode fluir de um corpo, inversamente ao quadrado de sua menor dimensão. Considerando algumas paredes feitas com concreto normal e expostas ao ar refrigerado em ambas as faces, temos que: para uma parede de 15 cm de espessura 95% do calor no concreto será perdido para o ar em 1h e 30min. Para uma parede de 1,5 m de espessura, esta mesma proporção de calor seria perdida em uma semana. Para uma parede de 15 m de espessura, que poderia representar a espessura de uma barragem tipo arco, levaria 2 anos para dissipar 95% do calor armazenado, enquanto que para uma barragem de 152 m de espessura levaria 200 anos. (1)

Este armazenamento de calor no interior de um bloco de concreto gera um gradiente de temperatura que, se o concreto não puder se movimentar livremente, ocasiona durante a queda da temperatura, tensões de tração que se ultrapassarem a resistência à tração do concreto, haverá fissuração, comprometendo a estanqueidade e durabilidade da estrutura.

As tendências à fissuração que ocorrem no concreto massa como consequência dos gradientes de temperatura podem ser reduzidas para níveis aceitáveis na maior parte das vezes. Isto pode ser feito pelo uso de medidas apropriadas de controle de temperatura. O tipo e o grau de controle de temperatura a serem empregados são determinados por estudos da estrutura, dos materiais utilizados, seu método construtivo e a temperatura ambiente. Um dos primeiros estudos a serem feitos deveria ser aquele que determina as prováveis temperaturas de exposição para o local, tanto durante o período de construção como no período subsequente de operação da estrutura. Estas temperaturas de exposição deveriam ser comparadas com as temperaturas do concreto esperadas durante os períodos de construção e operação. As variações de temperatura assim estabelecidas são então relacionadas aos pré-requisitos da estrutura, suas dimensões, as condições de elevação durante a construção e as tensões esperadas durante a operação (2).

Embora a temperatura de equilíbrio dependa das condições locais, pode ser efetuado um controle da temperatura de lançamento e/ou da elevação da temperatura após o lançamento do concreto.

O máximo gradiente de temperatura do concreto pode ser controlado através do uso de cimento de baixo calor de hidratação, redução do consumo de cimento para somente aquele necessário à resistência e durabilidade ou uma combinação destas medidas. Dentro de certos limites, a temperatura de lançamento pode ser controlada por pré - refrigeração de um ou mais componentes do concreto (3).

O controle da elevação da temperatura após o lançamento é conseguido pelo lançamento do concreto em camadas finas, fixação de um intervalo de tempo para lançamento de camadas sucessivas e escolha de um tipo adequado de formas. Pode ser utilizado também um sistema de tubos embutidos no concreto, por onde circula água fria.

2. CAUSAS DA FISSURAÇÃO POR TEMPERATURA

Em concreto massa, as tensões de tração são causadas principalmente por variações de temperatura. Porém, para uma dada variação de temperatura, a resultante tensão térmica de tração em diferentes casos não é sempre a mesma, sendo modificada pelas propriedades do concreto e pelo grau de restrição.

O grau de restrição é definido como a parcela da variação de comprimento potencial que é impedida de ocorrer. Quando ao concreto é permitido expandir ou contrair livremente, nenhuma tensão resulta de uma variação na temperatura, mas quando a expansão ou contração é impedida ou "restringida", parcial ou totalmente, ocorrem tensões no concreto. Por exemplo, se a temperatura se eleva de um grau e o coeficiente de expansão térmica é de $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, a variação de comprimento potencial é 5×10^{-6} . Se o concreto é permitido expandir somente 2×10^{-6} , o grau de restrição é 60%. (4)

Em uma peça maciça de concreto, o concreto interior e exterior variam de temperatura e teor de umidade a diferentes graus e velocidades. Ocorrendo isto, o concreto interior restringe o concreto exterior de retrair-se e se desenvolvem tensões de tração que podem causar a fissuração do concreto exterior. (5,6)

Na fissuração por temperatura é importante analisar não só o gradiente térmico, mas também a velocidade de variação da temperatura. Uma queda gradual é considerada aquela que ocorre vagarosamente por muitas semanas. Normalmente, o concreto suporta cerca de duas vezes mais uma queda de temperatura lenta do que uma variação brusca. A participação do módulo de elasticidade explica grande parte deste benefício devido à variação lenta e o restante é devido a uma participação mais geral do concreto e suas camadas adjacentes na variação da temperatura, reduzindo assim o grau de restrição.

As tensões térmicas são elevadas na junção entre concreto e fundação, por causa das grandes variações de temperatura que normalmente ocorrem nesta região, onde a restrição é alta.

Superfícies expostas submetidas às flutuações da temperatura atmosférica são fontes de fissuração e frequentemente estão sujeitas à retração por secagem, causando tensões superficiais e ajudando a iniciar as fissuras. O tipo de formas e o tem

po de sua remoção são fatores importantes que serão discutidos posteriormente.

2.1. Restrição externa contínua (7)

O principal tipo de restrição que ocorre em estruturas massivas de concreto é a restrição externa contínua. Esta restrição existe na superfície de contato do concreto e do material no qual o concreto foi lançado. O grau de restrição depende principalmente das dimensões relativas, resistência e módulo de elasticidade do concreto e do material restringente.

2.1.1. Distribuição de tensões

Por definição, a tensão em um ponto de uma peça de concreto não fissurada é proporcional ao esforço naquele ponto.

A tensão horizontal em uma peça continuamente restringida em sua base e sujeita a uma mudança de comprimento horizontal não uniforme, varia de ponto de acordo com a variação do grau de restrição de toda a peça. A distribuição da restrição varia com a razão comprimento/altura da peça.

O tamanho do bloco não afeta a tensão na equação normal para tensão devido a variação de temperatura

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

σ = unidade de tensão

E = módulo de elasticidade efetivo

α = coeficiente de expansão térmica

$(T_2 - T_1)$ = gradiente de temperatura

A equação acima é válida somente onde há uma absoluta restrição ao movimento, tal como existiria ao longo da superfície de contato rocha-concreto (3).

A equação para a tensão por temperatura em um grande bloco de concreto é melhor expressa como:

$$\sigma = K_R \cdot E \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

K_R = grau de restrição

O grau de restrição é uma função do comprimento do bloco e da altura acima da fundação.

O grau de restrição em uma seção central de um bloco lançado em única camada é mostrada no Gráfico 1 (3,7,8).

Utilizando o grau de restrição K_R obtido no Gráfico 1, a resultante da tensão de tração em qualquer ponto na linha central, devido à diminuição do comprimento

to , pode ser calculada por:

$$R_t = K_R \cdot \Delta_c \cdot E_c \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

Δ_c = contração se não há restrição

E_c = módulo de elasticidade mantido do concreto no momento quando Δ_c ocorreu e para a duração envolvida.

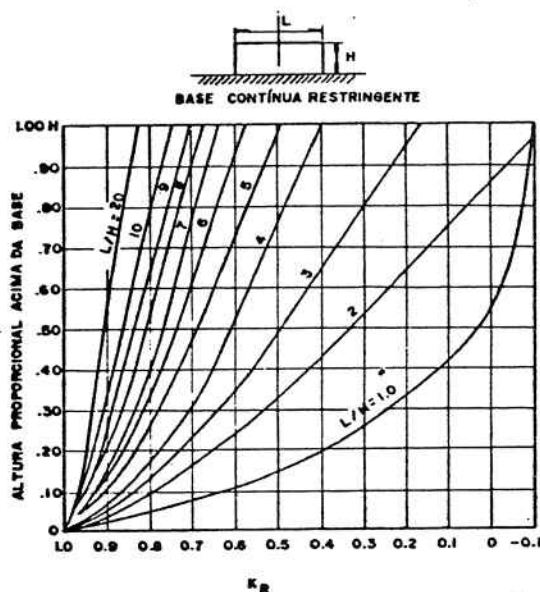


Gráfico 1 - Grau de restrição à tração em uma seção central de um bloco de concreto lançado em uma única camada (7).

As tensões no concreto devido à restrição decrescem na razão direta ao de crêscimo da rigidez do material da fundação restringente.

2.1.2. Forma de fissuração

A fissuração ocorrerá quando as tensões no concreto devido às variações de volume excederem a resistência à tração do concreto. Se uma peça de concreto tem uma tendência uniforme a contrair, mas é restringida em sua base ou em uma lateral, a fissuração iniciará na base ou lateral restringida onde a restrição é maior e progride para cima ou exterior até um ponto onde a tensão é insuficiente para continuar a fissura. Entretanto, se a peça é de altura limitada, a ocorrência da fissura a uma altura apreciável aumentará a tensão de tração acima do final da fissura, o que muito frequentemente causa a extensão da fissura através do bloco inteiro.

A razão para isto é que, depois da ocorrência da fissura, nenhuma tensão causada pela restrição é suportada na região da fissura, mas precisa ser suportada pelo concreto não fissurado.

Para a relação L/H maior do que 2,5, o Gráfico 1 indica que, se há suficiente tensão de tração para iniciar a fissura, ela se propagaria por toda a altura do bloco, por causa do aumento de tensão característico acima mencionado. Além disso, tem sido encontrado em muitos ensaios que, uma vez começada, a fissura continuará com a metade da tensão necessária para iniciá-la (1).

Conclui-se, portanto, que paredes ou lajes de concreto não armado, sujeitas a uma base restringente, apresentarão fissuras através de toda sua altura, espaçadas cerca de uma a duas vezes a altura da peça. Para cada fissura formada, sua propagação por toda a altura da peça causará a redistribuição da base restringente, de modo que cada porção de parede ou laje atue como uma seção individual entre as fissuras.

3. CONTROLE DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

A principal razão para justificar o controle da elevação da temperatura do concreto massa é reduzir a fissuração causada pelas tensões de expansão e contração térmicas.

Para uma determinada peça de concreto massa, as tensões térmicas de tração serão função do gradiente térmico, propriedades do concreto e grau de restrição.

As medidas usualmente utilizadas para controlar a elevação da temperatura em uma estrutura de concreto massa são as seguintes (2,3,4,9,10,11,12,13,14,15):

- a. escolha de um cimento com baixo calor de hidratação;
- b. redução do consumo de cimento para somente aquele necessário à resistência e durabilidade;
- c. limitação da altura das camadas de concretagem e fixação de um intervalo de tempo mínimo de concretagem;
- d. escolha de um tipo adequado de formas;
- e. sistemas de pré-refrigeração do concreto e
- f. sistemas de pós-refrigeração do concreto.

3.1. Escolha de um cimento com baixo calor de hidratação

O aglomerante recomendado para as construções de concreto massa é o cimento Portland de baixo calor de hidratação e/ou cimento Portland comum adicionado de materiais destinados a diminuir seu calor de hidratação.

A quantidade e/ou a velocidade da geração de calor é dependente da composição química, finura e consumo de cimento, quantidade e tipo de adições em substituição ao clínquer, aditivos e a temperatura do concreto durante o período inicial de hidratação.

O cimento Portland pode ser considerado como sendo composto por quatro principais componentes, dos quais derivam os compostos fundamentais que governam as

propriedades do cimento. A tabela 1 relaciona estes componentes, juntamente com seus símbolos normalmente utilizados na química do cimento.

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland (16)

COMPOSTO	CONSTITUIÇÃO	SÍMBOLO
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
$\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$		

Além dos compostos principais existem compostos secundários, tais como MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , Mn_2O_3 e P_2O_5 , que geralmente representam um percentual reduzido.

A hidratação dos compostos do cimento é uma reação exotérmica, chegando-se à liberação de até 500 J/g (120 cal/g). Como a condutibilidade do concreto é relativamente baixa (de 2,0 a 3,5 W/m. $^{\circ}\text{C}$), no interior de um grande volume de concreto, o calor liberado pela hidratação tem dificuldade em fluir para o exterior, podendo resultar em considerável aumento de temperatura.

A quantidade de calor gerado é influenciada pelo fator a/c. Um alto fator a/c tenderá a resultar em uma hidratação mais completa e maior calor desenvolvido. O efeito do fator a/c no calor de hidratação de diversos tipos de cimento é mostrado na Tabela 2. Foram utilizadas pastas curadas a 21 $^{\circ}\text{C}$, onde o calor de hidratação foi medido em várias idades.

Tabela 2 - Calor de hidratação de pastas de cimento em função do fator a/c (17).

CIMENTO (ASTM)	FATOR a/c	CALOR DE HIDRATAÇÃO (J/g)						
		3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	1 ano	6,5 anos	13 anos
I	0,40	255	331	400	434	454	489	494
	0,60	275	367	448	480	502	515	---
	0,80	277	374	467	500	511	523	---
II	0,40	196	255	333	369	399	412	421
	0,60	207	256	349	397	427	437	---
	0,80	206	269	354	415	447	444	---
III	0,40	317	379	425	447	478	504	504
	0,60	360	433	501	520	532	532	---
	0,80	363	439	506	528	544	546	---

Tabela 2 - Calor de hidratação de pastas de cimento em função do fator a/c (17).
Continuação...

CIMENTO (ASTM)	FATOR	CALOR DE HIDRATAÇÃO (J/g)						
	a/c	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	1 ano	6,5 anos	13 anos
IV	0,40	171	210	274	311	337	357	365
	0,60	181	224	279	329	378	387	---
	0,80	174	221	292	345	397	403	---

Os resultados mostram que um aumento no fator a/c de 0,40 para 0,80 acarreta uma elevação de aproximadamente 2% a 3 dias de idade para o cimento de baixo calor de hidratação - ASTM tipo IV e um aumento de 14% na mesma idade para o cimento de alta resistência inicial - ASTM tipo III. Após 1 ano, os acréscimos no calor de hidratação resultantes do aumento no fator a/c de 0,40 para 0,80 são da ordem de 12% para o cimento de moderado calor de hidratação - ASTM tipo II e 14% para o cimento de alta resistência inicial.

Para o cimento Portland Comum, cerca de 50% do calor total é liberado entre um e três dias, cerca de 75% em sete dias e 83 a 91% em seis meses (16). A Tabela 3 apresenta valores típicos do calor de hidratação de compostos puros do cimento Portland.

Tabela 3 - Calor de hidratação dos compostos puros do cimento Portland (16).

COMPOSTO	CALOR DE HIDRATAÇÃO (média) J/g (cal/g)
C ₃ S	502 (120)
C ₂ S	260 (62)
C ₃ A	867 (207)
C ₄ AF	419 (100)

O calor desenvolvido pela hidratação do cimento é devido principalmente ao aluminato tricálcico - C₃A, seguido pelo silicato tricálcico - C₃S e ferroaluminato tetracálcico - C₄AF. O silicato dicálcico - C₂S libera pouco calor por ocasião da hidratação.

A influência dos teores de C₃A e C₃S pode ser avaliada pelos Gráficos 2 e 3.

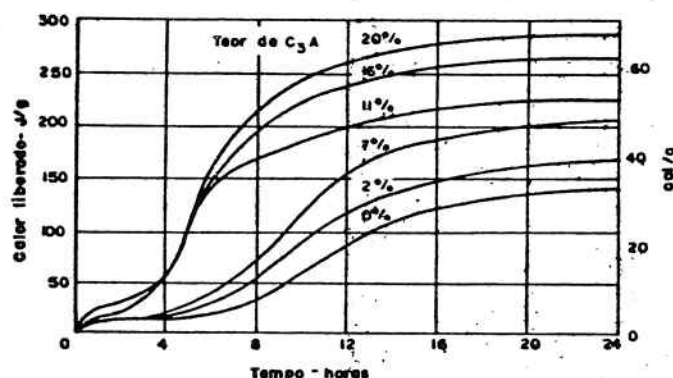


Gráfico 2 - Influência do teor de C_3A na liberação de calor do cimento Portland (teor de C_3S aproximadamente constante) (16).

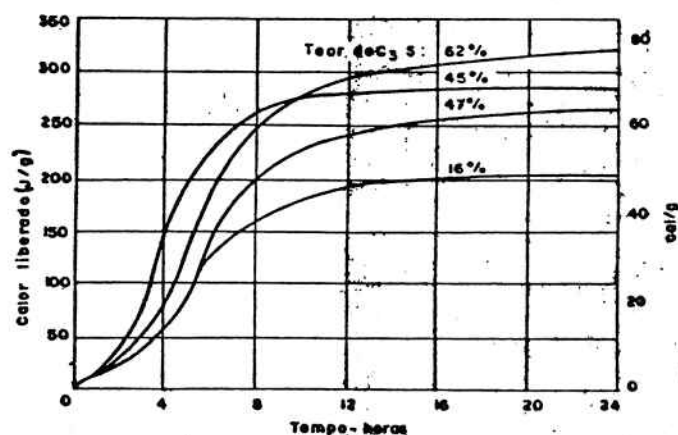


Gráfico 3 - Influência do teor de C_3S na liberação de calor do cimento Portland (teor de C_3A aproximadamente constante) (16).

A quantidade de produção de calor pode ser reduzida diminuindo-se as proporções dos compostos C_3A e C_3S , que hidratam mais rapidamente. Reduzindo-se em 10% o teor de C_3A , o calor liberado depois de 24 horas se reduz de aproximadamente 25%. Reduzindo-se o teor de C_3S em 15%, o calor liberado após 24 horas se reduz de aproximadamente 18%.

Na realidade, o calor total de hidratação não é o mais importante e sim a velocidade de desprendimento de calor.

A velocidade de produção de calor é influenciada pela finura do cimento e temperatura da pasta (18). O aumento da finura intensifica as reações de hidratação e consequentemente, a liberação de calor, mas a quantidade total de calor liberado não é afetada. O efeito da temperatura na velocidade de geração de calor de pastas de

cimento é mostrado no Gráfico 4. O calor de hidratação foi medido após 72 horas, a 4, 24, 32 e 41°C.

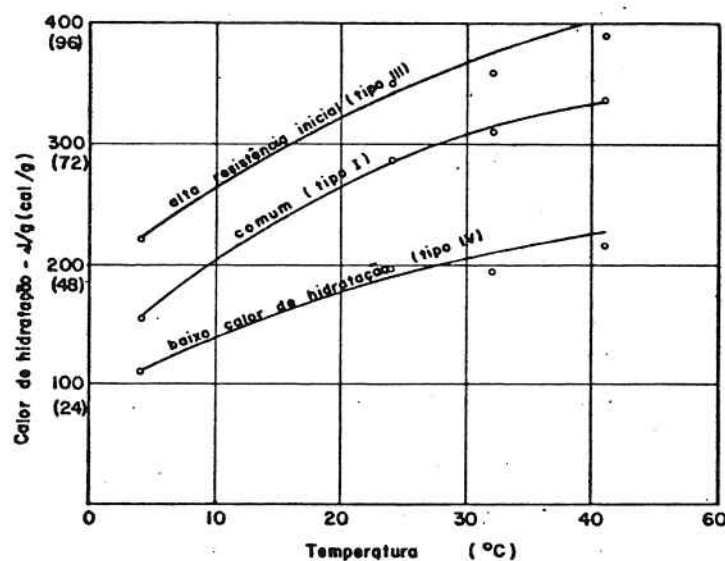


Gráfico 4 - Calor de hidratação de pastas em função da temperatura e tipo de cimento (16).

Elevando-se a temperatura de 4 para 41°C, houve um acréscimo no calor liberado de cerca de 120% para o cimento comum - ASTM tipo I, 75% para o cimento de alta resistência inicial - ASTM tipo III e 100% para o cimento de baixo calor de hidratação - ASTM tipo IV. Portanto, é grande a influência da temperatura no calor de hidratação das pastas de cimento.

As limitações da ASTM - C-150-81 para o cimento de moderada resistência aos sulfatos e moderado calor de hidratação (II) e baixo calor de hidratação (IV) estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Limites de teores de compostos dos cimentos especificados pela ASTM C-150 - 81 (16).

CIMENTO	C ₃ S % máxima	C ₂ S % mínima	C ₃ A % máxima	C ₃ S + C ₃ A % máxima
II	---	---	8	58
IV	35	40	7	---

Podem ser adicionados ao cimento materiais com a finalidade de diminuir o calor de hidratação. Os produtos mais comumente utilizados são as pozolanas e escórias de alto forno.

Pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que não tem nenhu-

ma qualidade cimentante intrínseca, mas finamente pulverizadas e na presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura normal formando produtos com capacidade aglomerante.

Os materiais pozolânicos mais comuns são: cinza vulcânica, calcedônias e opalas, terras diatomáceas e argilas calcinadas, cinzas volantes, etc.

O efeito do teor de pozolana na elevação da temperatura do concreto é mostrado no Gráfico 5. Foram utilizados concretos com mesmas proporções em volume, de aglomerante e agregados, mesmo tipo de cimento e de agregados e mesmo consumo de água. O teor de pozolana em substituição ao cimento foi a única variável.

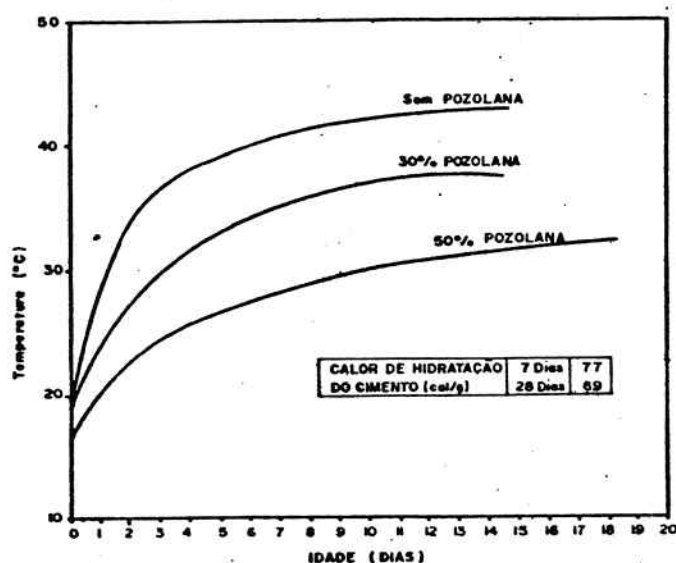


Gráfico 5 - Efeito do teor de pozolana em substituição ao cimento na elevação da temperatura do concreto (19).

O concreto com 30% em volume de pozolana em substituição ao cimento apresentou um gradiente de temperatura cerca de 18% menor que o concreto sem pozolana. Com 50% de substituição, o concreto apresentou um gradiente de temperatura cerca de 31% menor que o concreto sem pozolana. A adição de pozolana, além de reduzir o gradiente de temperatura, provoca uma elevação de temperatura sensivelmente mais lenta.

Escória de alto forno é um resíduo obtido na fabricação do ferro gusa, constituindo-se de uma mistura de cal, sílica e alumina. A escória é resfriada muito rapidamente de modo a se solidificar, resultando em um material granular (18).

A escória granulada seca pode ser adicionada ao clínquer de cimento Portland em um moinho, obtendo-se o cimento Portland de alto forno ou moída e utilizada diretamente na mistura de concreto em substituição à parte do cimento.

O efeito da substituição do cimento Portland por escória de alto forno no calor de hidratação de pastas é mostrado no Gráfico 6. Foram utilizados 3 tipos de es

cória substituindo 30% do cimento e medido o calor de hidratação aos 7, 28 e 90 dias.

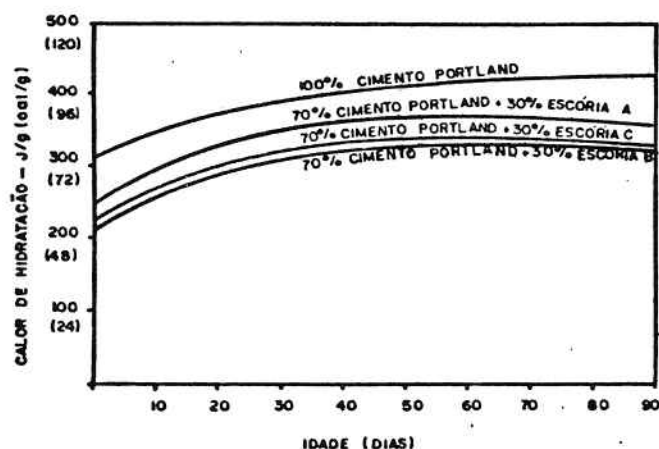


Gráfico 6 - Efeito da substituição do cimento Portland por escória de alto forno no calor de hidratação (17).

A substituição por escória de alto forno de 30% do cimento Portland provocou uma redução de 15% no calor de hidratação da mistura com a escória A, 24% com a escória B e 23% com a escória C.

3.2. Redução do consumo de cimento para somente aquele necessário à resistência e durabilidade.

O aumento de temperatura do concreto devido ao calor de hidratação do cimento pode ser considerado variar diretamente com o consumo de cimento.

O efeito do consumo de cimento na elevação da temperatura do concreto é mostrado no Gráfico 7.

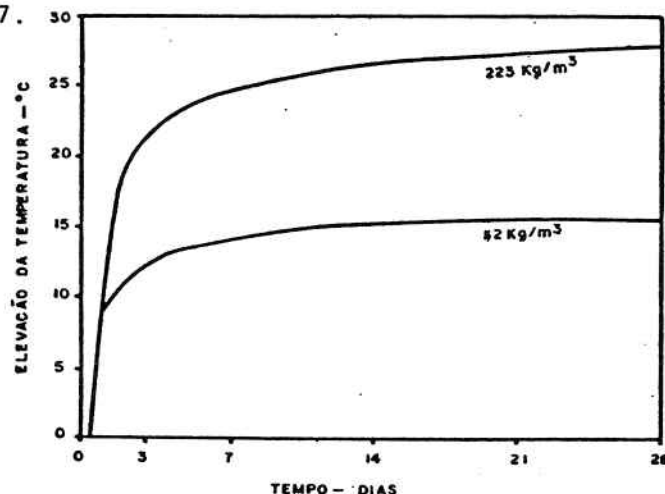


Gráfico 7 - Efeito do consumo de cimento na elevação da temperatura do concreto (10).

Reduzindo-se 50% o consumo de cimento, o gradiente de temperatura apresentou uma redução de aproximadamente 52% aos 28 dias. É conveniente, portanto, procurar a mistura que apresente o consumo de cimento mínimo necessário à resistência e durabilidade do concreto.

3.3. Limitação da altura das camadas de concretagem e/ou fixação de um intervalo de tempo mínimo de concretagem.

A altura das camadas de concretagem é função das propriedades do concreto, temperatura de lançamento, temperatura ambiente e intervalo de tempo entre os lançamentos.

O efeito da difusibilidade térmica do concreto e da espessura dos blocos no tempo necessário ao concreto atingir a temperatura de equilíbrio é mostrado na Tabela 5. Foram utilizados concretos de diferentes difusibilidades térmicas e verificado o tempo aproximado para ocorrer 90% da queda de temperatura, a diferentes espessuras, após cessar a geração de calor e ocorrer a temperatura máxima.

Tabela 5 - Tempo necessário para o concreto massa atingir 90% da queda de temperatura (10,20).

DIFUSIBILIDADE TÉRMICA (m^2/dia)	TEMPO NECESSÁRIO PARA 90% DO RESFRIAMENTO					
	3m	6m	15m	30m	60m	120m
0,06	41 dias	166 dias	2,8 anos	11 anos	45 anos	181 anos
0,08	32 dias	128 dias	2,2 anos	9 anos	35 anos	141 anos
0,12	22 dias	89 dias	1,5 ano	6 anos	24 anos	98 anos

Aumentando-se a espessura do concreto em 100% observa-se um aumento de cerca de 300% no tempo de resfriamento do concreto. Para um aumento de 100% na difusibilidade térmica do concreto há uma redução de aproximadamente 46% no tempo de resfriamento.

A influência do número de camadas e do intervalo de tempo entre seus lançamentos na elevação da temperatura do concreto é mostrada na Tabela 6. Para o cálculo de elevação da temperatura foram consideradas camadas com 2,50m de espessura, lançadas com intervalo de 3, 5, 7 e 15 dias. Foram admitidas as seguintes hipóteses: difusibilidade térmica da fundação igual a do concreto, dissipação do calor pela face superior das camadas e temperatura do concreto fresco igual à temperatura do contorno (ar e fundação). Os valores apresentados correspondem às temperaturas máximas observadas.

Tabela 6 - Influência do número de camadas e do intervalo de tempo entre seus lançamentos na elevação de temperatura do concreto (20).

NÚMERO DE CAMADAS	ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA - °C (valores máximos)			
	3	5	7	15
2	19,1	18,4	17,8	16,4
4	20,1	19,0	18,1	16,6
6	20,2	18,9	18,0	16,5
8	20,2	18,9	18,0	16,5
10	20,2	18,9	18,0	16,5

obs: elevação de temperatura para uma camada = 15,4°C

Aumentando-se o número de camadas observou-se um acréscimo de temperatura para até 6 camadas, função do intervalo de tempo entre seus lançamentos. Para 6 ou mais camadas, a elevação de temperatura do concreto lançado com intervalo de 15 dias entre camadas é cerca de 18% menor que a do concreto lançado com 3 dias de intervalo entre camadas.

O efeito da diferença entre a temperatura de lançamento do concreto e do contorno na elevação de temperatura do concreto é mostrado no Gráfico 8. Para o cálculo de elevação da temperatura foi considerada camada de 2,50 m de espessura e diferença entre a temperatura do contorno e do concreto fresco de 0, 5, 10, 15, 20 e 25°C. Os valores apresentados correspondem às temperaturas no meio da espessura da camada.

O aumento da diferença entre a temperatura do contorno e a do concreto fresco provoca um aumento na elevação da temperatura do concreto. Quando essa diferença ultrapassa 15°C as elevações de temperatura do concreto são superiores à elevação adiabática de temperatura. Com 10 dias de idade, a elevação de temperatura do concreto lançado 25°C menos que a temperatura ambiente é cerca de 77% maior que a do concreto lançado à temperatura ambiente.

A influência do intervalo de tempo de lançamento entre camadas e da diferença entre a temperatura de lançamento do concreto e do contorno na elevação da temperatura do concreto é mostrada no Gráfico 9. Para o cálculo da elevação da temperatura foram consideradas 6 ou mais camadas de 2,50 m de espessura, lançadas com intervalo de 3, 5, 7 e 15 dias. Os valores apresentados correspondem às máximas temperaturas observadas.

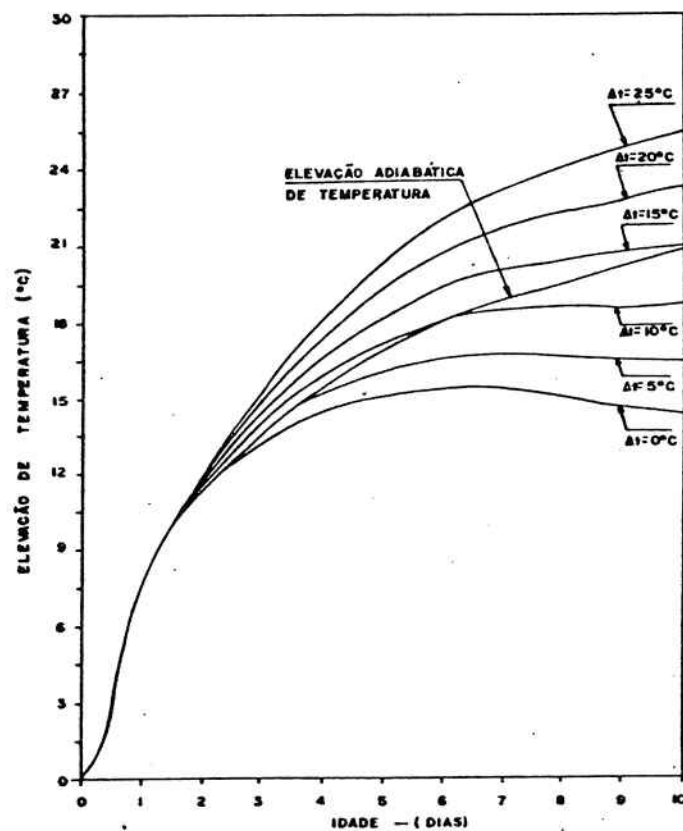


Gráfico 8 - Efeito da diferença entre a temperatura de lançamento do concreto e do contorno na elevação da temperatura do concreto (20).

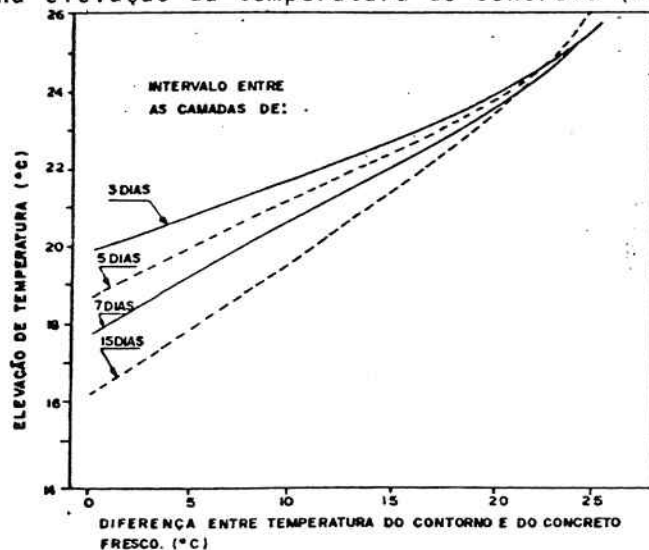


Gráfico 9 - Influência do intervalo do tempo de lançamento entre camadas e da diferença entre a temperatura de lançamento do concreto e do contorno na elevação da temperatura do concreto (20).

À medida que aumenta o intervalo de tempo entre os lançamentos, há uma redução na elevação da temperatura do concreto para uma mesma diferença entre as temperaturas de lançamento do concreto e do contorno. Para concreto lançado à temperatura ambiente, a elevação da temperatura do concreto com intervalo de 15 dias entre camadas é cerca de 18% menor que a do concreto lançado com 3 dias de intervalo. Porém, para uma diferença de 25°C , é praticamente nula a diferença entre a elevação da temperatura do concreto com 3 ou 15 dias de intervalo entre lançamento de camadas.

3.4. Escolha de um tipo adequado de formas.

Para que a temperatura do concreto não alcance valores excessivos recomenda-se o uso de formas metálicas que não retardariam a perda de calor pela superfície do concreto ou a remoção das formas de madeira o mais cedo possível. Isto diminuiria o gradiente de temperatura do concreto, reduzindo a tendência à fissuração.

3.5. Sistemas de pré-refrigeração do concreto

Um dos meios mais efetivos de se evitar a fissuração térmica é controlar a temperatura de lançamento do concreto. Em estruturas massivas, cada 6°C de rebaixamento da temperatura de lançamento do concreto, abaixo da temperatura média do ar, resultará em uma diminuição de aproximadamente 3°C na temperatura máxima do concreto (11).

Uma temperatura de lançamento do concreto pode ser escolhida tal que a tensão de tração resultante do declínio da temperatura não exceda a capacidade de deformação do concreto.

Uma vantagem adicional da pré-refrigeração do concreto é o aumento da plasticidade, podendo-se reduzir a água e o consumo de cimento. Também, em temperaturas menores, o cimento hidrata mais vagarosamente, havendo menos tensões térmicas devidas a diferenças de temperatura dentro de cada camada. Quando a liberação de calor é mais lenta, a base de concreto ou fundação participa mais na variação da temperatura e assim a restrição à deformação é reduzida (21).

A temperatura do concreto é influenciada por todos os componentes, sendo o grau de influência dependente da temperatura individual dos componentes, do calor específico e das proporções da mistura. Como os agregados constituem a maior parte de uma mistura de concreto massa, uma variação em suas temperaturas efetuará a maior variação na temperatura do concreto, exceto quando se utiliza gelo em substituição à parte da água de amassamento. Visto que a quantidade de cimento em uma mistura de concreto massa normalmente é relativamente pequena, sua refrigeração pode não ser significativa para o controle da temperatura.

Por conveniência, o concreto e seus componentes podem ser considerados em termos de "equivalentes em água" ou o peso de água que possui a mesma capacidade

calorífica. Um exemplo de uma mistura de 1 m³ de concreto e seu equivalente em água é dado na Tabela 7.

Tabela 7 - Cálculo do equivalente em água de uma mistura de concreto (11).

COMPONENTE	PESO (kg)	CALOR ESPECÍFICO (kj/kg.°C)	QUANTIDADE DE CALOR (kj/°C)	EQUIVALENTE EM ÁGUA (kg)
Agr. graúdo	1483	0,75	1112	266
1% de umidade	15	4,18	63	15
Agr. miúdo	653	0,75	490	117
5% de umidade	33	4,18	138	33
Cimento	139	0,88	122	29
Água de amassamento	65	4,18	272	65
	2388		2197	525

Portanto, 1 m³ deste concreto necessitaria para variar sua temperatura em 1°C a mesma quantidade de refrigeração que 525 kg de água.

Os componentes do concreto podem ser pré-refrigerados de muitas maneiras. A água de amassamento pode ser refrigerada ou substituída, em parte ou totalmente, por gelo. Os agregados podem ser protegidos do sol. Os agregados miúdos podem ser processados em um classificador utilizando água fria.

Os métodos de refrigeração dos agregados graúdos podem variar da aspersão de água nos depósitos, pulverização de água fria nas correias transportadoras, imersão em tanques de água fria, insuflação de ar frio na caçamba da betoneira, até a refrigeração por evaporação forçada por vácuo.

A partir das temperaturas dos componentes do concreto pode-se calcular a refrigeração necessária para reduzir a temperatura da mistura para um determinado valor. Utilizando a mesma mistura de concreto, a Tabela 8 apresenta o cálculo da refrigeração necessária, por m³, para reduzir a temperatura a 10°C.

Para diminuir a temperatura do concreto a 10°C seria necessário remover 33702 kJ do sistema.

Se este concreto fosse misturado sob as condições iniciais de temperatura, apresentaria a seguinte temperatura:

$$10^{\circ}\text{C} + \frac{33702 \text{ kJ}}{525 \text{ kg} \times 4,18 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}} = 10^{\circ}\text{C} + 15^{\circ}\text{C} = 25^{\circ}\text{C}$$

Tabela 8 - Cálculo da refrigeração necessária para reduzir a temperatura de uma mistura de concreto a 10°C (11).

COMPONENTE	TEMPERATURA INICIAL (°C)	Δt PARA 10°C (°C)	EQUIVALENTE EM ÁGUA	KJ PARA 10°C (KJ)
Agr. grão úmido	24	14	281	16444
Agr. miúdo úmido	23	13	150	8151
Cimento	49	39	29	4728
Água de amassamento	21	11	65	2989
Calor da mistura (estimado)			525	1390
				33702

Obs: KJ para 10°C = (Δt para 10°C). (Equiv. em água). (4,18)

Uma outra forma de se estimar a temperatura da mistura de concreto fresco é dada pelas Equações 4 e 5 (21,22).

Sem gelo:

$$T = \frac{0,22.(T_1P_1 + T_2P_2) + T_3P_3 + T_{31}P_{31}}{0,22.(P_1 + P_2) + P_{31}} \quad (\text{Eq.4})$$

Com gelo:

$$T = \frac{0,22.(T_1P_1 + T_2P_2) + T_3.(P_3 - P_4) + T_1P_{31} - 79,6 P_4}{0,22.(P_1 + P_2) + P_3 + P_4 + P_{31}} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

T = temperatura da mistura de concreto fresco (°C)

T₁ = temperatura do agregado (°C)

T₂ = Temperatura do cimento (°C)

T₃ = temperatura da água de amassamento adicionada (°C)

T₃₁ = temperatura da água livre no agregado (°C)

P₁ = peso do agregado (kg)

P₂ = peso do cimento (kg)

P₃ = peso da água de amassamento adicionada (kg)

P₃₁ = peso da água livre no agregado (kg)

P₄ = peso do gelo (kg)

Com estas Equações podemos estimar a influência da temperatura dos compo

mentos cimento, agregados e água na temperatura do concreto. Para temperaturas do agregado de 16, 21, 27 e 32°C, o Gráfico 10 apresenta a influência da temperatura do cimento na temperatura do concreto, em quatro situações: água de amassamento à temperatura do agregado (curva 1); água de amassamento à 10°C (curva 2); água de amassamento à temperatura do agregado, com 25% em peso de água substituídos por gelo (curva 3) e água de amassamento à temperatura do agregado, com 50% em peso de água substituídos por gelo (curva 4).

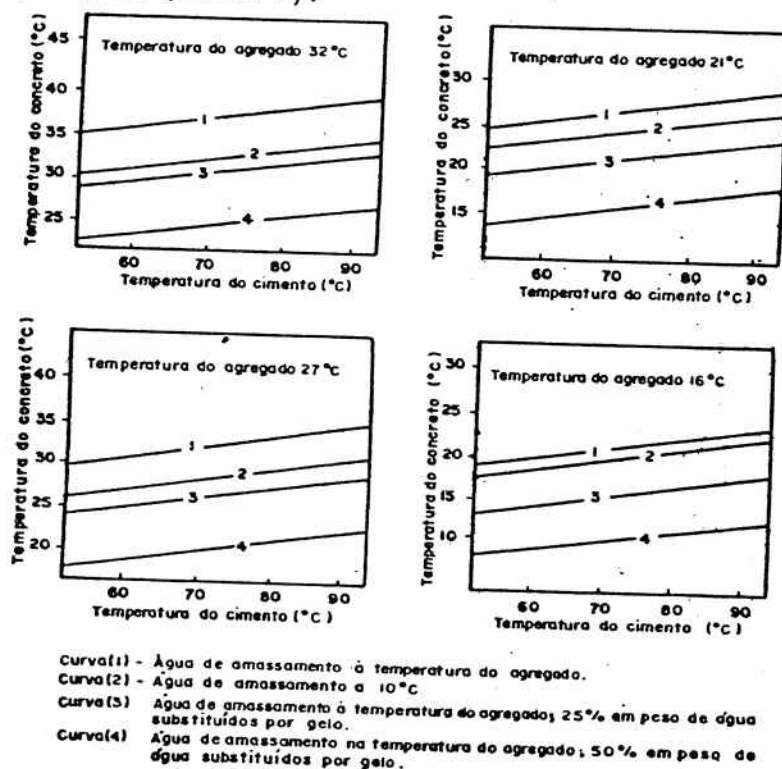


Gráfico 10 - Influência da temperatura dos componentes na temperatura do concreto(20).

Uma redução de 1°C na temperatura do concreto requer uma redução de aproximadamente 8°C na temperatura do cimento, 4°C na temperatura da água de amassamento e 2°C na temperatura do agregado.

Um kg de água absorve 4,18 kJ quando sua temperatura é aumentada de 1°C. Para um mesmo peso, uma variação unitária na temperatura da água de amassamento tem aproximadamente cinco vezes o efeito na temperatura do concreto que uma variação unitária na temperatura do cimento ou agregado (21). O Gráfico 11 mostra o efeito da temperatura da água de amassamento na temperatura do concreto. As temperaturas são normais com agregados naturais. A quantidade de água refrigerada não pode exceder a necessidade de água do concreto, que dependerá do teor de umidade do agregado e das proporções da mistura.

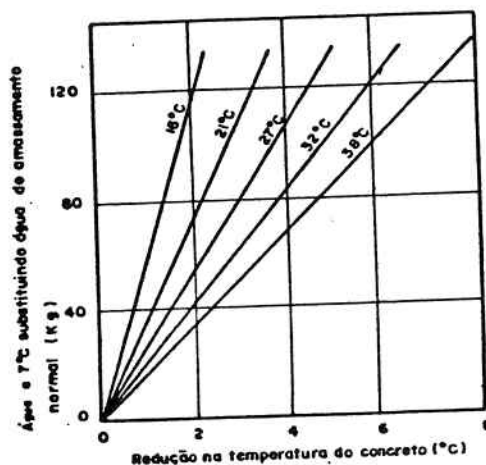


Gráfico 11 - Influência da água de amassamento refrigerada na temperatura do concreto (27).

Uma substituição de 80 kg de água a 27° por água a 7°C reduzirá a temperatura do concreto de aproximadamente 3°C.

Para a mistura dada na Tabela 7, refrigerando os 65 kg de água de amassamento, de 21°C para 2°C, a temperatura do concreto reduzirá cerca de 2,5°C. Isto pode ser calculado multiplicando-se o peso da água pela diferença de temperatura a reduzir e dividir o total pelo equivalente em água do concreto:

$$\frac{65 \text{ (kg)} \cdot (21^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C})}{525 \text{ equiv. em água}} = 2,4^{\circ}\text{C}$$

O uso de gelo como parte da água de amassamento é altamente efetivo na redução da temperatura do concreto, pois na fusão ele absorve calor a uma razão de 334 kJ/kg (80 cal/g). Para ser mais eficiente, o gelo deve ser adicionado diretamente no misturador, como parte ou todo, da água de amassamento.

O gelo deve ser utilizado em flocos, raspado de um tambor refrigerado que gira através de uma fonte de água, ou em pequenos pedaços em forma de biscoito, extrudado de tubos refrigerados.

Para a homogeneidade do concreto é importante que todo o gelo derreta antes do término da mistura do concreto. Onde os agregados são processados secos isto pode significar adição de não mais que 3/4 da água de amassamento como gelo. Onde os agregados são processados úmidos, pode haver umidade suficiente para permitir que toda a água de amassamento seja substituída por gelo. O Gráfico 12 ilustra possíveis reduções na temperatura do concreto pela substituição da água de amassamento por gelo.

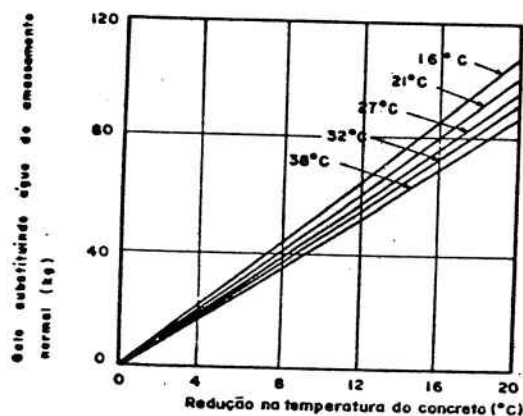


Gráfico 12 - Efeito do gelo em substituição à água de amassamento na temperatura do concreto (21).

Para uma substituição de 80 kg de água a 27°C por gelo a 0°C encontramos uma redução na temperatura do concreto de aproximadamente 17°C. Isto é, cerca de 6 vezes mais eficiente que a substituição por água a 7°C.

Para a mistura dada na Tabela 7, substituindo os 65 kg de água por gelo, a temperatura do concreto seria reduzida para aproximadamente 10°C:

$$\frac{65 \text{ (kg)} \cdot 334 \text{ (kJ/kg)}}{525 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}} = 9,9^\circ\text{C}$$

Um método alternativo para refrigeração da água de amassamento e fabricação de uma mistura gelo/água emprega nitrogênio líquido, um fluido criogênico inerte com temperatura de - 196°C. Dos tanques de depósito o nitrogênio é injetado no tanque de armazenamento, levando a temperatura da água abaixo de 1°C. Para se conseguir maior refrigeração do concreto, o nitrogênio é injetado na água em um misturador especialmente projetado, imediatamente antes da água ser adicionada ao concreto, causando o congelamento de uma parte da água. A quantidade de gelo produzida pode ser variada para satisfazer as diferentes necessidades de temperatura.

Os agregados constituem a maior proporção de uma mistura de concreto mas a sua temperatura tem a maior influência na temperatura do concreto.

O meio mais eficiente de refrigerar o agregado miúdo é usar água fria em sua classificação final. A água efluente do classificador é dirigida a um tanque de decantação para retirar o excesso de finos e, refrigerada novamente, volta ao classificador. O agregado miúdo é facilmente refrigerado por este método, pois ganha calor vagarosamente por causa da umidade transportada e possibilidade de evaporação. Deste modo o agregado miúdo pode ser produzido a temperatura entre 4 e 7°C (21).

Para a mistura dada na Tabela 7, se todos os 686 kg de agregado miúdo, incluindo a umidade, fossem reduzidos a 7°C o resultado seria um rebaixamento da temperatura do concreto de aproximadamente 4,5°C:

$$\frac{150 \text{ equiv. em água de agr. miúdo (kg)} \cdot (23^{\circ}\text{C} - 7^{\circ}\text{C})}{525 \text{ equiv. em água de concreto (kg)}} = 4,6^{\circ}\text{C}$$

A aspersão de água nos depósitos de agregado graúdo é um meio barato, mas limitado, de reduzir a temperatura do agregado graúdo. Depende do efeito refrigerante da evaporação natural que, por outro lado, depende das condições de temperatura ambiente, vento e umidade relativa.

Um dos meios mais efetivos de refrigerar os agregados graúdos é a imersão em tanques com água fria. Os tanques são abertos no topo e tem fundo cônico com uma comporta para descarga do agregado. O ciclo de refrigeração consiste no enchimento do tanque com água fria, carregamento do agregado, circulação da água fria através do agregado, drenagem da água e descarga do agregado pela comporta de fundo. O agregado é descarregado em um transportador de correia e lançado em um peneirador vibratório para remover o excesso de umidade. Com este método, utilizando água a 2°C , mesmo os agregados de diâmetro máximo 152 mm podem ser refrigerados para cerca de 3°C com um tempo de circulação de 45 min. Contudo, o ciclo completo, incluindo enchimento e descarregamento, seria de aproximadamente 2 horas (21).

Para a mistura dada na Tabela 7, se todos os 1498 kg de agregado graúdo, incluindo a umidade, fossem refrigerados para 3°C , resultaria em um abaixamento da temperatura do concreto de aproximadamente 11°C :

$$\frac{275 \text{ equiv. em água de agr. graúdo (kg)} \cdot (24^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C})}{525 \text{ equiv. em água de concreto (kg)}} = 11,0^{\circ}\text{C}$$

Para suplementar o uso de gelo na água de amassamento pode-se pulverizar água a 4°C nos agregados graúdos durante o transporte pelas correias transportadoras. Por razões práticas, a duração da pulverização é limitada a uns 5 min., resultando em remoção de calor somente de perto das superfícies das partículas do agregado. É essencial um sistema para remoção do excesso de água antes da descarga na betoneira. Insuflação de ar frio através do agregado úmido e na betoneira facilitarão o resfriamento de sua temperatura, mas é necessário um cuidadoso controle para evitar o congelamento da água livre (21).

Os agregados miúdos e graúdos podem ser refrigerados por evaporação forçada por vácuo. Os agregados precisam ser processados úmidos ou conter água suficiente para absorver a quantidade de calor que é necessária extrair. Silos ou depósitos metálicos com capacidade de 100 a 300 toneladas de agregado exposto a uma pressão de 6 mmHg normalmente fornecerão uma redução das temperaturas iniciais de 43°C para aproximadamente 10°C em um ciclo de operações de 45 min. (21)

Para a mistura dada na Tabela 7, se 1% da umidade superficial dos agregados graúdos for evaporada, a temperatura dos agregados graúdos será diminuída de aproximadamente 31°C , ou seja, reduzida para cerca de -7°C :

$$\frac{15 \text{ (kg)} \times 2420 \text{ (kJ/kg)}}{275 \text{ equiv. em água de agreg. graúdo (kg)} \times 4,18 \text{ (kJ/kg.}^{\circ}\text{C)}} = 31^{\circ}\text{C}$$

Como resultado desta refrigeração do agregado grão, a temperatura do concreto seria diminuída de aproximadamente 16°C:

$$\frac{15 \text{ (kg)} \times 2420 \text{ (kJ/kg)}}{525 \text{ equiv. em água (kg)} \times 4,18 \text{ (kJ/kg. } ^\circ\text{C)}} = 16,5^\circ\text{C}$$

Os aglomerantes usados em concreto são materiais hidráulicos, portanto, o controle de suas qualidades requer que sejam manuseados e misturados secos. Se a temperatura do cimento é reduzida abaixo do ponto de orvalho da atmosfera, a umidade pode condensar e afetar sua qualidade. Como regra geral, o balanço de calor da mistura de concreto não requer a refrigeração do cimento de modo a atender a temperatura de lançamento especificada, desde que seja imposto um limite máximo de 66°C para a temperatura do cimento. As atividades normais de descarregamento e transporte por bombas de ar já resultam em alguma refrigeração do cimento.

O controle da temperatura de lançamento do concreto deve levar em consideração os ganhos ou perdas de calor do concreto ou de seus componentes durante a estocagem, mistura, transporte e adensamento do concreto. Os depósitos podem proteger os componentes do concreto contra ganho de calor por meios simples, tais como isolamento térmico, paredes refletoras, ar condicionado ou circulação de ar frio através dos agregados grãos. A energia necessária para a mistura do concreto transmite cerca de 1390 kJ de calor por m³ de concreto. Onde o canteiro de obra é convenientemente localizado para permitir um rápido transporte e lançamento haveria um insignificante ganho de temperatura entre a mistura e o lançamento do concreto. Entretanto, levando em conta os atrasos e imprevistos de lançamento, pode ser interessante incluir no cálculo uma pequena quantidade de ganho de calor entre a mistura e o lançamento.

A capacidade de uma central de refrigeração, expressa em toneladas de refrigeração, é dada pela relação:

$$\frac{\text{Máx. veloc. lanc. do concr. (m}^3\text{/h)} \times \text{calor a ser remov. (kJ/m}^3\text{)}}{12661 \text{ kJ/h}}$$

Como a temperatura dos agregados geralmente acompanha o ciclo anual da temperatura ambiente, a capacidade de uma central de refrigeração precisa ser determinada para determinados segmentos de tempo, tais como uma semana ou um mês. A central de refrigeração pode ser projetada para colocar toda a refrigeração em um material, como produção de gelo ou pode ser dividida em vários sistemas de refrigeração para produção de gelo, água fria e/ou ar frio, de acordo com as necessidades.

3.6. Sistemas de pós-refrigeração do concreto

O controle das temperaturas do concreto pode ser acompanhado pela circulação de um líquido frio, normalmente água, através de tubos de paredes finas embuti

dos no concreto. O calor removido durante os primeiros 2 ou 3 dias seguintes ao lançamento reduzirá o pico da temperatura, mas o principal objetivo do sistema é acelerar a posterior remoção de calor e acompanhamento do decréscimo de volume durante as primeiras idades, quando o módulo de elasticidade está relativamente baixo (21).

As isotermas radiais de temperatura desenvolvidas em torno de cada tubo de refrigeração criam um modelo térmico complexo, irregular e variável. Sob condições de rápida e intensa refrigeração, isto poderia resultar em fissuras localizadas, radiais ou circulares.

Após a idade em que ocorre a máxima temperatura no concreto, não é necessária nenhuma restrição à velocidade de refrigeração. Depois de ocorrido o pico de temperatura do concreto, a refrigeração é prosseguida até que a primeira destas condições ocorra:

- a. a refrigeração do concreto alcance a taxa de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{dia}$;
- b. a temperatura do concreto decresça a 17°C abaixo do valor máximo. Este é um valor experimentalmente obtido dos ensaios de capacidade de deformação sob carregamento lento e
- c. o concreto foi refrigerado até sua temperatura de equilíbrio.

4. CONCLUSÕES

Para um bloco de concreto lançado em única camada, com relação comprimento/altura maior do que 2,5, se houver suficiente tensão de tração para iniciar a fissura, ela se propagará por toda a altura do bloco, pois após a ocorrência da fissura, nenhuma tensão causada pela restrição é suportada na região da fissura.

O concreto que possui baixa resistência à tração, alto módulo de elasticidade, alto coeficiente de expansão térmica e é completamente restringido, pode fissurar quando ocorre uma queda brusca de temperatura de somente 3°C .

O agregado é o principal constituinte que influencia as características térmicas do concreto massa. Concretos com agregados de diferentes procedências ou composições mineralógicas apresentam propriedades térmicas significativamente diferentes.

As medidas preventivas de controle da temperatura que induz fissuração no concreto massa são:

- a. escolha de um aglomerante de baixo calor de hidratação pode reduzir o calor de hidratação do concreto em cerca de 30%.
- b. a redução do calor de hidratação é diretamente proporcional ao consumo de cimento;
- c. o aumento da espessura de um bloco de concreto em 100% acarreta um aumento de cerca de 300% no tempo de resfriamento do concreto. A elevação da temperatura do concreto lançado com intervalo de 15 dias é cerca de 18% menor do que a do concreto lançado com 3 dias de intervalo entre camadas;
- d. o uso de formas metálicas ou a remoção das formas de madeira o mais cedo possível diminui o gradiente de temperatura do concreto;

e. para cada 6°C de rebaixamento da temperatura de lançamento do concreto, abaixo da temperatura média do ar, há uma redução de aproximadamente 3°C na temperatura máxima do concreto.

O tipo e o grau de controle da temperatura a serem empregados devem ser determinados por estudos da estrutura, dos materiais utilizados, método construtivo e temperatura ambiente.

5. SUGESTÕES DE NOVAS PESQUISAS

Nossos laboratórios possuem um número elevado de ensaios realizados por ocasião da construção de várias barragens e obras de grande porte. Entretanto, estes ensaios são realizados segundo métodos de ensaio próprios de cada laboratório, adaptados de especificações internacionais, tais como ASTM, Bureau of Reclamation, etc. Isto torna difícil a comparação de resultados de ensaios realizados em diferentes laboratórios. É necessária, portanto, a implantação de uma metodologia nacional de ensaios para determinação das propriedades e características do concreto massa.

Sugere-se, também, a realização de um programa de ensaios, com materiais nacionais, onde cada fator influente seja isoladamente analisado, com o objetivo de dar condições para melhor especificar a construção de nossas futuras obras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI COMMITTEE 207. Mass concrete for dams and other massive structures. ACI Journal, Proceedings 67(4):273-309, april 1980.
2. TOWNSEND, C.L. Control of temperature cracking in mass concrete. In: ACI Publication SP-20, Causes, mechanism, and control of cracking in concrete, 1968, pp. 67-72.
3. Control of cracking in mass concrete structures. Engineering Monograph nº 34, Bureau of Reclamation 1965.
4. RAWHOUSER, C. Cracking and temperature control of mass concrete. ACI Journal, Proceedings 41(4):305-348, feb. 1945.
5. ACI COMMITTEE 224. Control of cracking in concrete structures. Report nº 224R-80. Concrete International, oct. 1980, pp. 35-76.
6. HUGHES, B.P. Controlling shrinkage and thermal cracking. Concrete, may 1972, pp. 39-42.
7. ACI COMMITTEE 207. Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of massive concrete. ACI Journal, Proceedings 70(7):445-470, july 1973.
8. MEASUREMENTS of the structural behavior of Norris and Hiwassee dams. Technical Monograph nº 67. Knoxville. Tennessee Valley Authority, Aug. 1950, p. 420.
9. LARUE, H.A. Modulus of elasticity of aggregates and its effect on concrete. ASTM. Proceedings V. 46, p. 1298, 1946.

10. CARLSON, R.W. et alii. Causes and control of cracking in unreinforced mass concrete. ACI Journal, july 1979, pp. 821-837.
11. ACI COMMITTEE 207. Cooling and usulating systems for mass concrete. Concrete International, 2(5):45-64, may 1980.
12. ROBERTS, H.H. Cooling materials for mass concrete. ACI Journal, Proceedings 47(10): 821-832, june 1951.
13. CAMARGO, W.M. et alii. Estruturas delgadas também exigem a tecnologia do concreto massa. In: Colóquio sobre concreto massa. IBRACON, 1981.
14. WAUGH, W.R. & RHODES, J.A. Control of cracking in concrete gravit dams. ASCE, Proceedings 85(5): 1-20, oct. 1959.
15. CARLSON, R.W. Temperatures and strees in mass concrete. ACI Journal, Proceedings 34(4):497-515, mar.apr. 1938.
16. NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. Trad. Giammusso, S.E. Ed. Pini, 1982.
17. LEA, F.M. The chemistry of cement and concrete. London, Ed. Arnols, 1970.
18. TAYLOR, H.F.W. La quimica de los cementos. Espanã. Ed. Urmo, 1964.
19. SAAD, M.N.A. et alii. Fluência, coeficiente de dilatação térmica e elevação adia bática de temperatura de concretos. In: Colóquio sobre concreto massa. IBRACON, 1981.
20. CESP. Companhia Energética de São Paulo. Estudo sobre a temperatura do concreto massa da barragem. Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava. Projeto Execu-tivo. Relatório nº NA 301 C09 C007 (SYH-10.479), 1980.
21. ACI COMMITTEE 305. Hot weather concreting. ACI Journal, Proceedings, aug. 1977, pp. 317-332.
22. HOT weather concreting. Concrete Information Sheets, IS 14 02T, Portland Cement Association, Chicago, 1966, 5pp.

BOLETIM TÉCNICO - textos publicados

BT 01/86 - Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado	FRANCISCO R. LANDI
BT 02/86 - Argamassas de Assentamento para paredes de alvenaria resistente	FERNANDO H. SABBATINI
BT 03/86 - Controle de qualidade do concreto	PAULO R. L. HELENE
BT 04/86 - Fibras vegetais para construção civil - fibra de coco	HOLMER SAVASTANO JR.
BT 05/86 - As obras públicas de engenharia e a sua função na estruturação da cidade de São Paulo	WITOLD ZMITROWICZ
BT 06/86 - Patologia das construções. Procedimentos para diagnóstico e recuperação.	NORBERTO B. LICHTENSTEIN
BT 07/86 - Medidas preventivas de controle da temperatura que induz fissuração no concreto massa	GEORGE INOUE

O BOLETIM TÉCNICO é uma publicação do Departamento de Engenharia de construção Civil da Escola Politécnica da USP, fruto de pesquisas realizadas nesta Universidade.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA EPUSP

Cidade Universitária - São Paulo / S.P
Caixa Postal 61548 / Telex 011.32237
Fone 815.9322 / ramais 234 e 359
