



João Pedro Peça de Oliveira
Licenciado em Engenharia Civil

Betão em Massa Pré-Refrigeração e Pós-Refrigeração

Relatório nos Termos do Despacho 20/2010 para Obtenção do Grau de Mestre para Licenciados “Pré-Bolonha”

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Prof. Doutora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues
Vogal: Prof. Doutora Paulina Faria



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio 2015

Relatório nos Termos do Despacho 20/2010 para Obtenção do Grau de Mestre para Licenciados “Pré-Bolonha”

Copyright©João Pedro Peça de Oliveira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, pela sua disponibilidade, rapidez, orientação e amabilidade com que sempre respondeu a todas as questões e dúvidas. Não agradeço a sua amizade, pois essa não se agradece, retribui-se.

Ao Senhor Eng.º José da Franca, meu "mestre" em muitas matérias, que ao longo de mais de 20 anos me foi disponibilizando informação relevante do mundo das obras, agradeço todo o seu apoio.

À Senhora Dr.ª Maria José Sá da Bandeira o meu obrigado pelo apoio na organização da apresentação deste documento.

Por fim, mas não no fim, um agradecimento especial à Carla, minha mulher, por todo o apoio nos bons e maus momentos.

Resumo

Esta dissertação, na versão de relatório de actividade profissional, alicerça-se na experiência que o autor adquiriu, tanto em obra, como na definição das estratégias técnicas a implementar em fase de concurso.

A presente dissertação tem como principal objectivo a abordagem da problemática da refrigeração de betões, e os princípios a ter em conta na definição das respectivas composições, sempre que grandes volumes de betonagem estão em causa (betões em massa).

Dentro deste contexto, nos chamados betões em massa, são exigidas medidas que permitem controlar as temperaturas de colocação do betão (pré-refrigeração) e após betonagem (pós-refrigeração), situações que, se descontroladas, podem implicar problemas de durabilidade decorrentes de reacções expansivas internas e, ainda, fissuração generalizada provocada por elevados gradientes térmicos, decorrentes da diferença de temperatura entre o núcleo do volume betonado e a respectiva zona externa, que naturalmente está condicionada pela temperatura ambiente.

Por outro lado, sem recurso a estas metodologias, as injeções das juntas de contracção entre blocos de betonagem, quando necessárias, seriam fortemente condicionadas.

São apresentados exemplos onde se articulam as tomadas de decisões técnicas, decorrentes de diversos cenários, com diferentes necessidades de pré-refrigeração e pós-refrigeração, a partir dos quais se realiza uma análise crítica.

Palavras-chave: Betão em massa; Calor de hidratação; Pré-refrigeração; Pós-refrigeração

Abstract

This dissertation, presented as a professional activity report, is based on the experience acquired by the author, both in construction works and in the definition of technical strategies to be implemented during tendering phase.

The dissertation's main goal is to establish an approach to the problematics of concrete refrigeration and the principles to be taken into account for the definition of the respective mix proportioning, when large volumes of concrete are to be dealt with (mass concrete).

In this context, the so called mass concrete requires implementation of measures which allow control of fresh concrete temperatures (pre-cooling) and after concrete placement (post-cooling). Such situations, if uncontrolled, may result in problems of durability, resulting from internal expansive reactions, and also generalized cracking caused by high thermal gradient, resulting from temperature differences between the core of concrete block and its external area, which is obviously conditioned by the ambient temperature.

On the other hand, if these methodologies are not applied, the injections of the contraction joints between concrete blocks, when necessary, would be highly conditioned.

Examples are shown where technical decisions resulting from various scenarios are articulated with different pre-cooling and post-cooling requirements and, from those, a critical analysis is elaborated.

Keywords: Mass concrete; Heat of Hydration; Pre-cooling; Post-cooling

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	2
1.2	Objectivo e Metodologia	2
1.3	Organização do trabalho.....	3
2	Betão em massa	5
2.1	Enquadramento	5
2.2	Metodologia para prevenir reacções expansivas internas.....	6
2.2.1	Reacções álcalis sílica (RAS).....	8
2.2.2	Reacções sulfáticas internas	10
2.3	Gradientes térmicos e suas consequências	10
2.4	Abordagem para o controlo da fissuração	11
3	Princípio para a Definição das Composições dos Betões em Massa	13
3.1	Enquadramento	13
3.2	Resistências a longo Prazo	13
3.3	Composições de betões em massa	14
3.3.1	Ligante	14
3.3.2	Agregados	17
3.3.2.1	Agregados finos (areias).....	17
3.3.2.2	Agregados grossos	19
3.3.3	Relação água/ligante	21
3.3.4	Adjuvantes	22
3.3.4.1	Introdutor de ar	23
3.3.4.2	Plastificante (reductor de água).....	24
3.3.4.3	Retardador de presa.....	24
3.4	Verificação dos requisitos de durabilidade.....	25
4	Calor de Hidratação	27
4.1	Massa volúmica e calor específico.....	27
4.2	Condutibilidade térmica	27
4.3	Difusibilidade	28
4.4	Elevação adiabática da temperatura	29
4.5	Dissipação do Calor	30
4.6	Elevação da temperatura em grandes blocos de betonagem.....	30
4.7	Elevação da temperatura em grandes blocos de betonagem.....	31
5	Pré-Refrigeração	35
5.1	Enquadramento	35

5.2	Contexto Português	35
5.3	Estimativa e controlo das temperaturas do betão fresco.....	36
5.4	Técnica para medição da temperatura	39
5.5	Sistemas de arrefecimento de betões em massa.....	39
5.5.1	Central de arrefecimento de água	40
5.5.2	Depósito de água arrefecida	41
5.5.3	Central de produção de escamas de gelo.....	41
5.5.4	Depósitos de escamas de gelo	43
5.5.5	Sistema de entrega e pesagem de escamas de gelo.....	43
5.5.5.1	Sistema pneumático	43
5.5.5.2	Sistema transportador tipo parafuso sem fim	44
5.6	Sistemas de arrefecimento de agregados	44
5.6.1	Tapetes transportadores – agregados grossos (Inundação)	45
5.6.2	Silos de arrefecimento – agregados grossos (Inundação)	46
5.6.3	Sistemas de arrefecimento de agregados grossos com recurso a ar frio	47
5.6.4	Arrefecimento de areias	49
5.6.5	Sistemas combinados arrefecimento/aquecimento de agregados com recurso a ar	49
5.7	Cenários resultantes de diferentes sistemas de pré-refrigeração.....	51
5.8	Consumo de energia eléctrica.....	51
5.9	Síntese dos processos de arrefecimento de agregados	53
5.10	Exemplo prático.....	53
5.10.1	Pressupostos e determinação da temperatura de colocação do betão sem pré-refrigeração	53
5.10.2	Introdução de água refrigerada ou de escamas de gelo.....	55
5.10.3	Arrefecimento de agregados.....	55
5.10.4	Dimensionamento dos sistemas de arrefecimento de agregados grossos em silos de inundação e produção de escamas de gelo.....	56
5.10.5	Injecção de azoto líquido	61
6	Pós-Refrigeração.....	63
6.1	Enquadramento	63
6.2	Definição geral de um sistema de refrigeração artificial de uma barragem	65
6.3	Equipamentos	67
6.3.1	Centrais de refrigeração, depósitos, circulação e bombagem.....	67
6.3.2	Rede de Conduatas	70
6.3.2.1	Conduatas principais exteriores.....	71
6.3.2.2	Colunas montantes embebidas.....	73
6.3.2.3	Conduatas distribuidoras.....	74
6.3.2.4	Serpentinas de refrigeração e Chaminés interiores	75
6.3.3	Grupos distribuidores.....	78
6.3.4	Regulação do caudal e corte.....	80
6.3.5	Etiquetagem e identificação	82

6.4	Monitorização do processo de refrigeração - Instrumentação	82
6.4.1	Observação da água em circulação	82
6.4.1.1	Caudalímetros	83
6.4.1.2	Sondas termométricas	84
6.4.2	Observação do betão em massa da barragem	85
6.5	Exemplo prático	85
6.5.1	Cálculo da elevação da temperatura do betão em barragens (método de Schmidt)	85
6.5.2	Cálculo do arrefecimento do betão	89
6.5.2.1	Arrefecimento feito apenas com água arrefecida a 4°C	89
6.5.2.2	Arrefecimento em dois patamares (água do rio + água arrefecida)	90
6.5.3	Determinação do caudal necessário para se proceder à refrigeração	92
6.5.4	Definição da central de arrefecimento de água para uma barragem (operações de pós-refrigeração)	93
7	Síntese Final	97
7.1	Sumário	97
7.2	Pontos relevantes	97
7.3	Desenvolvimentos futuros	99
	Referências	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Betão em massa em blocos de barragem	5
Figura 2.2 - Betonagem de um bloco de barragem com recurso a tapete transportador	6
Figura 2.3 - Estrutura de barragem em betão em massa	6
Figura 2.4 – Faseamento construtivo, blocos de betonagem de uma grande barragem (SOMAGUE, 2004).....	7
Figura 2.5 – Restrição contínua ao longo da base de um bloco de betonagem (ACI, 2005b).....	10
Figura 2.6 - Grau de restrição às variações de comprimento em blocos de betão (ACI, 2007b).....	12
Figura 3.1 - Central industrial para produção de betão em massa	14
Figura 3.2 – Central de produção de betão (Barragem de Alqueva).....	17
Figura 3.3 - Pilhas de armazenamento de agregados	18
Figura 3.4 – Equipamento de britagem de agregados	19
Figura 3.5 - Relação $D_{máx}$ -quantidade de ligante para determinada tensão de compressão aos 90 dias (PCA, 1987)	20
Figura 3.6 – Stock de agregados, Barragem de Alqueva	21
Figura 3.7 - Equipamento para colocação, distribuição e compactação de betão em massa.....	26
Figura 3.8 – Boco de betonagem (subcamadas – faixa perimetral e núcleo central).....	26
Figura 4.1 - Perda de calor em corpos (ACI, 2005a)	31
Figura 4.2 - Variação da temperatura em profundidade (bloco de betão), resultante da troca de calor com o meio ambiente (ACI, 2005a).....	32
Figura 5.1 - Injecção de azoto líquido (GADJA e SUMODJO, 2012)	38
Figura 5.2 - Central de arrefecimento de água (KTI, 2011)	40
Figura 5.3 - Tanque de água com 150m ³ (KTI, 2011).....	41
Figura 5.4 - Central de produção de escamas de gelo na construção da Barragem de Alqueva.....	42
Figura 5.5 - Esquema de produção e entrega de escamas de gelo (NR KOELLING BV, 2012)	42
Figura 5.6 - Escamas de gelo (KTI, 2011)	43
Figura 5.7 - Sistema pneumático para transporte de escamas de gelo (KTI, 2011).....	44
Figura 5.8 – Transportador tipo parafuso e tremonha de pesagem (KTI, 2011)	44
Figura 5.9 - Tapete transportador para arrefecimento de agregados grossos (KTI, 2011).....	45
Figura 5.10 - Esquema de arrefecimento de agregados grossos – tapete transportador inundado (NR KOELLING BV, 2012).....	46
Figura 5.11 - Temperatura dos agregados, função da sua dimensão e do período de tempo de molhagem.....	46
Figura 5.12 - Silos de Inundação (KTI, 2011).....	47
Figura 5.13 - Esquema de arrefecimento de agregados grossos – silos de inundação (NR KOELLING BV, 2012)	47

Figura 5.14 - Central de arrefecimento de agregados grossos – silos de arrefecimento por ar frio (KTI, 2011)	48
Figura 5.15 - Esquema de arrefecimento de agregados grossos – silos de arrefecimento por ar frio	48
Figura 5.16 - Temperatura do agregado, função da sua dimensão e do tempo de contacto com o ar frio	49
Figura 5.17 - Tambor rotativo para arrefecimento de areias (KTI, 2011).....	50
Figura 5.18 - Esquema de arrefecimento de areias – tambor rotativo com ar frio (NR KOELLING BV, 2012)	50
Figura 5.19 - Central combinada para arrefecimento/aquecimento de agregados (KTI, 2011).....	51
Figura 5.20 - Sistemas combinados de pré-arrefecimento (adaptado de KTI, 2011).....	52
Figura 5.21 - Sistema de pré-refrigeração (agregados grossos).....	56
Figura 5.22 - Determinação do tempo de arrefecimento para agregados grossos função de θ_0 e θ_m (adaptado de ACI, 2005a).....	57
Figura 5.23 - Disponibilidade de gelo no reservatório de armazenamento (kg) ao longo de uma semana de trabalho	60
Figura 6.1 - Evolução térmica durante a construção de uma barragem de betão com pós-refrigeração (adaptado de U.S. ARMY CORP of ENGINEERS, 1994).....	64
Figura 6.2 - Evolução térmica durante a construção de uma barragem de betão sem pós-refrigeração (adaptado de U.S. ARMY CORPS of ENGINEERS, 1994)	65
Figura 6.3 - Definição da pós-refrigeração de betões em barragens de betão (EDP, 2010).....	66
Figura 6.4 - Layout geral de um sistema tipo pós-refrigeração com recurso a duas centrais de refrigeração	67
Figura 6.5 - Exemplo de uma central para operações de pós-refrigeração de uma barragem	68
Figura 6.6 - Central de pós-refrigeração (margem direita, Barragem de Alqueva)	69
Figura 6.7 - Depósitos de água associados a uma central de pós-refrigeração.....	69
Figura 6.8 - Esquema de princípio de um sistema de pós-refrigeração	70
Figura 6.9 - Layout de um sistema de condutas principais exteriores	71
Figura 6.10 - Sistema de condutas principais exteriores, barragem de Alqueva	72
Figura 6.11 - Descida de encosta das condutas principais exteriores, barragem de Alqueva.....	72
Figura 6.12 - Definição das colunas montantes de um sistema de pós-refrigeração de uma barragem (corte transversal de um bloco de betonagem). (EDP, 2010)	73
Figura 6.13 - Localização prevista para as condutas montantes, (corte horizontal- barragem de Foz Tua).....	74
Figura 6.14 - Layout de um sistema de condutas distribuidoras ao nível de uma galeria de visita	74
Figura 6.15 - Chaminés interiores (Esquerda – corte transversal por um bloco de betonagem; Direita – corte tipo) (EDP, 2010)	75
Figura 6.16 - Pormenor da derivação de uma chaminé interior (planta) para um grupo distribuidor localizado numa galeria de visita (corte transversal) (EDP, 2010).....	76
Figura 6.17 - Serpentina de refrigeração e chaminé interior – preparação de bloco para betonagem.....	77
Figura 6.18 - Serpentina de refrigeração – preparação de bloco para betonagem	77
Figura 6.19 - Grupo distribuidor.....	79

Figura 6.20 - Exemplo de galeria de visita (corte longitudinal), inserção dos grupos distribuidores nas condutas de distribuição e inversor do sentido de circulação da água (EDP, 2010)	80
Figura 6.21 - Sistema de by-pass para caudalímetros unidirecionais (EDP, 2010)	81
Figura 6.22 - Ábaco para resolução do problema-alínea 6.5.2.1 (Determinação de h^2t/D^2 em função de θ_m/θ_0) (adaptado de ACI, 2005a)	90
Figura 6.23 - Ábaco para resolução do problema-alínea 6.5.2.2 (I) (Determinação de h^2t/D^2 em função de θ_m/θ_0) (adaptado de ACI, 2005a)	91
Figura 6.24 - Ábaco para resolução do problema-alínea 6.5.2.2 (II) (Determinação de h^2t/D^2 em função de θ_m/θ_0) (adaptado de ACI, 2005a)	92
Figura 6.25 - Esquema ilustrativo do conceito de pós-refrigeração (KTI, 1991)	93
Figura 6.26 - Salto térmico da água função do salto térmico do betão, tendo em conta o caudal, comprimento da serpentina, duração do processo e difusibilidade do betão (adaptado de ACI, 2005a)	94
Figura 6.27 - Salto térmico da água função do salto térmico do betão, tendo em conta o caudal, comprimento da serpentina, duração do processo e difusibilidade do betão (adaptado de ACI, 2005a)	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Categorias do risco das estruturas (APPLETON, 2013).....	9
Tabela 2.2 - Categorias ambientais dos betões (APPLETON, 2013)	9
Tabela 2.3 - Fixação do nível de prevenção (APPLETON, 2013)	9
Tabela 2.4 – Diferencial térmico máximo permitido em blocos de betão em massa (PCA, 1987)	11
Tabela 3.1 - Composição do clínquer (VARELA e VIEIRA, 2005)	15
Tabela 3.2 - Tipos de cimento produzidos em Portugal (Adaptado VARELA e VIEIRA, 2005)	15
Tabela 3.3 - Granulometria de agregados finos para betões em massa (PCA, 1987)	18
Tabela 3.4 - Granulometrias de agregados grossos para betões em massa (ACI, 2005a)	20
Tabela 3.5 – Percentagens aproximadas de cada classe granulométrica (agregados grossos), para realização de betões em massa (ACI, 2005a).....	21
Tabela 3.6 – Média de quantidade de água para slumps de 50mm em função de $D_{máx}$ e da quantidade de ligante (PCA, 1987).....	22
Tabela 3.7 – Valor A/L máximos recomendados para betões em massa (PCA, 1987).....	22
Tabela 3.8 – Recomendações gerais para incorporação de ar em betões em massa sujeitos a condições severa de exposição (PCA, 1987).....	23
Tabela 4.1 – Difusibilidade função do tipo de rocha (ACI, 2005a).....	28
Tabela 5.1 – Sistemas de pré-refrigeração – temperaturas finais (NR KOELLING BV, 2012)	52
Tabela 5.2 - Métodos de arrefecimento de agregados – Vantagens/Desvantagens	54
Tabela 5.3 - Composição de referência (betão em massa)	54
Tabela 6.1 - Características das condutas principais exteriores (EDP, 2010)	72
Tabela 6.2 – Características das condutas montantes embebidas (EDP, 2010).....	74
Tabela 6.3 – Características das condutas distribuidoras (EDP, 2010).....	75
Tabela 6.4 – Características das chaminés interiores (EDP, 2010).....	78
Tabela 6.5 – Características das serpentinas (EDP, 2010)	78
Tabela 6.6 – Método Schmidt para cálculo das temperaturas que se desenvolvem no betão	88

1 INTRODUÇÃO

O autor da presente dissertação iniciou a sua vida profissional no princípio do ano de 1988, após a conclusão da licenciatura em engenharia civil, ramo de estruturas, no final do ano de 1987 no Instituto Superior Técnico.

Aproximadamente nos primeiros três anos e meio da sua vida profissional, trabalhou como Projectista de estruturas metálicas e de betão armado, sendo que em parte desse período teve também contacto com a fiscalização de empreendimentos industriais, para uma multinacional de origem Finlandesa.

Em meados do ano de 1991 alterou o seu percurso profissional, até então mais vocacionado para projecto e fiscalização conforme já referenciado, entrando como colaborador de uma grande empresa de construção nacional, a Sociedade de Empreitadas Somague, que na altura estava basicamente vocacionada para grandes obras públicas, tais como barragens, obras portuárias, estradas, pontes, viadutos e obras industriais.

Começando como Director de obra, ao longo de vinte e dois anos de colaboração foi desenvolvendo diversas competências, em diversos tipos de obras, tais como:

- Portuárias;
- Industriais;
- Pontes e viadutos;
- Ferroviárias;
- Hidráulicas;
- Subterrâneas.

Nos últimos dez anos em que estive na empresa, deixou as funções directas em obra, passando a exercer funções como Director de Engenharia e Métodos, nas quais teve a possibilidade de sistematizar todo o conhecimento adquirido ao longo da permanência em obra, passando a apoiar todas as obras desenvolvidas no âmbito da empresa, assim como organizar todo o “conhecimento” técnico.

De meados do ano 2013 a Novembro 2014, abraçou um novo projecto profissional como Consultor técnico da empresa Prebuild, tendo desenvolvido a sua colaboração principalmente em projectos industriais na Colômbia e coordenação de projectos de construção no Kuwait e Argélia.

Desde Setembro de 2014 tem colaborado como Docente convidado da área da Construção do Departamento de Engenharia Civil da FCT UNL, leccionando as aulas teóricas de Planeamento da Construção e, em breve, de Organização e Gestão de Obras dos cursos de Mestrado Integrado e de Mestrados de 2º Ciclo em Engenharia Civil. Desde Novembro 2014 desenvolve a sua actividade profissional principal como Consultor por conta própria.

Durante a sua colaboração na obra da Barragem de Alqueva e mais tarde na Direcção de Engenharia e Métodos da Somague Engenharia, foi confrontado com a problemática do controlo das temperaturas

de betões em massa, assunto amplo e de grande interesse técnico, que pela sua exigência e algum desconhecimento dentro da empresa, se tornou tema de estudo da responsabilidade do autor desta dissertação. É sobre este tema decorrente da sua vida profissional, que incide o presente relatório, nos termos do despacho 20/2010 para obtenção do grau de Mestre, para licenciados “Pré-Bolonha”.

1.1 Enquadramento

Quando se procede à betonagem de grandes volumes, existem cuidados particulares a ter em conta no que concerne ao controlo da temperatura da massa de betão.

Esta problemática usualmente não é tida em conta, em betonagens ditas usuais, uma vez que ocorre uma dissipação rápida do calor de hidratação do ligante.

Quando a dissipação do calor de hidratação não pode ocorrer de forma rápida, a desvalorização desta problemática pode implicar graves problemas de durabilidade, decorrentes de reacções sulfáticas de origem interna e ainda de uma fissuração generalizada, condicionada pela diferença de temperatura entre o núcleo da betonagem e as zonas perimetrais externas, que se encontram em contacto com o meio ambiente.

Dentro deste contexto, pode-se então dizer que a necessidade de atender ao controlo das temperaturas é o que caracteriza os chamados betões em massa.

Quando é necessário prever a injeção de juntas de contração, torna-se igualmente relevante equacionar este tipo de problemas, por forma a permitir que estas injeções ocorram o mais cedo possível (durante o período da construção) e gerindo, da forma mais eficiente possível, eventuais necessidades de re-injeção.

A consulta de diversos artigos, em revistas técnicas sobre barragens de betão, permitiu ao autor desta dissertação alicerçar a opinião que, na maioria dos casos em que estas problemáticas são abordadas, o foco principal de atenção é a modelação estrutural e térmica (ARAÚJO et al., 1998; BOND et al., 2000a; BOND et al., 2000b; CHU et al., 2013; LIU et al., 2015; MATA et al., 2014; MINEMURA et al., 1998; QIAN e GAO, 2012; SUN, 2011; WANG e ZHANG, 2014; WANG et al., 2015; WU et al., 2012; YANG et al., 2012; ZHONG et al., 2011). Não foi, no entanto, possível encontrar informação relevante e sistematizada, que permita o dimensionamento das soluções de pré e pós refrigeração, razão que reforçou o interesse no presente trabalho de dissertação.

1.2 Objectivo e Metodologia

As estratégias que permitem gerir a problemática do controlo das temperaturas em grandes volumes de betonagem, podem ser agrupadas, grosso modo, nos seguintes termos:

- Intervenção na composição dos betões;
- Método/faseamento construtivo;

- Pré-refrigeração do betão;
- Pós-refrigeração do betão.

O objectivo desta dissertação é sistematizar as diversas intervenções possíveis, para o controlo das temperaturas de grandes massas de betão, com recurso a refrigeração artificial do betão.

A metodologia seguida foi, tendo presente as diversas estratégias disponíveis e já supra referenciadas, ir apresentando-as de forma articulada e interligada, finalizando sempre que possível com um exemplo prático, que permita a sistematização pretendida e o enquadramento prático da respectiva aplicação. Deste modo pretende-se contribuir para o diálogo activo entre os principais interlocutores interessados, ou seja: donos de obra, projectistas, fiscalizações, empreiteiros e fornecedores destas tecnologias.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, sendo o primeiro o presente capítulo introdutório.

O capítulo 2 que se segue tem como objectivo definir o conceito de betão em massa, apresentando as principais preocupações a ter em conta para este tipo de betão (reações expansivas internas e gradientes térmicos) e enumerar as respectivas metodologias de controlo e prevenção.

No capítulo 3 enquadram-se as principais características a ter em conta na definição das composições dos betões em massa (ligante, agregados, adjuvantes, etc.). Assinala-se igualmente a particularidade da definição das resistências à compressão, que nos betões em massa se determinam a uma idade mais alargada que nos betões ditos “usuais”, ou seja, nos betões estruturais.

O capítulo 4 aborda um assunto de grande importância nos betões em massa, ou seja, o calor de hidratação do ligante, do qual decorre a grande problemática deste tipo de betões, que é o controlo da temperatura e as suas implicações. Introduzem-se uma série de conceitos fundamentais, tais como: massa específica, calor específico, condutibilidade térmica, difusibilidade, elevação adiabática da temperatura e dissipação do calor. O capítulo termina explicando em que termos ocorre a elevação real da temperatura, em grandes blocos de betonagem.

No capítulo 5 apresenta-se a pré-refrigeração como uma das abordagens do controlo de temperatura em betões em massa, apresentando a formulação de cálculo e as diversas estratégias para lidar com a temperatura de colocação do betão. São igualmente descritas as principais tecnologias disponíveis, finalizando-se com um exemplo prático, onde se pretende sistematizar todas estas vertentes numa análise de um determinado cenário de obra.

O capítulo 6 baliza a pós-refrigeração como estratégia de controlo da subida da temperatura no seio da massa de betão, após betonagem, assim como; os princípios orientadores a ter em conta no dimensionamento de um sistema de pós-refrigeração. É dado relevo especial à definição de um

sistema típico para uma barragem de betão em massa (moldado). Finaliza-se o capítulo com um exemplo prático do cálculo da elevação da temperatura do betão de uma barragem (método Schmidt), e consequente definição dos períodos de tempo necessários ao arrefecimento artificial, para que se atinja determinado cenário de temperatura interna. Para o cenário em causa, dimensiona-se por fim a central de arrefecimento de água necessária.

No último capítulo apresenta-se uma síntese final, sendo também indicadas algumas propostas para o desenvolvimento futuro do tema desta dissertação.

2 BETÃO EM MASSA

2.1 Enquadramento

Betão em massa (ACI, 2005a; GADJA, 2006; PCA, 1987) é o termo que usualmente é aplicado a qualquer volume de betão, suficientemente grande (Fig. 2.1) para que, tendo presente a sua composição e condições de fronteira, seja exigido que se tomem medidas que permitam evitar subidas exageradas da sua temperatura interna, ou seja, que não se atinjam temperaturas superiores 65°C.

As subidas descontroladas da temperatura poderão condicionar fortemente a durabilidade da peça betonada, devido a reacções expansivas internas (APPLETON, 2013; LNEC, 2007a), assim como, o aparecimento de forte fissuração em consequência dos gradientes térmicos que surjam, entre o núcleo da betonagem e a respectiva zona perimetral em contacto com a temperatura ambiente (ACI, 2007b).



Figura 2.1 – Betão em massa em blocos de barragem

Historicamente o termo betão em massa é associado a grandes estruturas, tais como: barragens (Fig. 2.2 e Fig. 2.3), eclusas e certas fundações. Neste tipo de estruturas, com volumes muito elevados de betão, torna-se necessário planear detalhadamente o faseamento das betonagens, como se pode observar no exemplo da figura 2.4. No entanto, os prazos cada vez mais arrojados que hoje em dia são exigidos às mais variadas obras, associados a uma complexidade técnica que exige a utilização de betões de alta resistência (recurso a elevadas proporções de cimento Portland), trouxeram a problemática das temperaturas internas das massas betonadas, e respectivos gradientes térmicos, para estruturas de médio porte, com a finalidade de não comprometer a sua durabilidade e respectivos requisitos funcionais.



Figura 2.2 - Betonagem de um bloco de barragem com recurso a tapete transportador



Figura 2.3 - Estrutura de barragem em betão em massa

2.2 Metodologia para prevenir reacções expansivas internas

Apresentam-se em seguida uma breve descrição das reacções expansivas internas, assim como, as principais estratégias de mitigação, que passam basicamente por tentar controlar as temperaturas máximas atingidas, no caso das reacções sulfáticas internas (RSI), aproveitando esse facto para colateralmente auxiliar o controlo das reacções álcalis sílica (RSA).

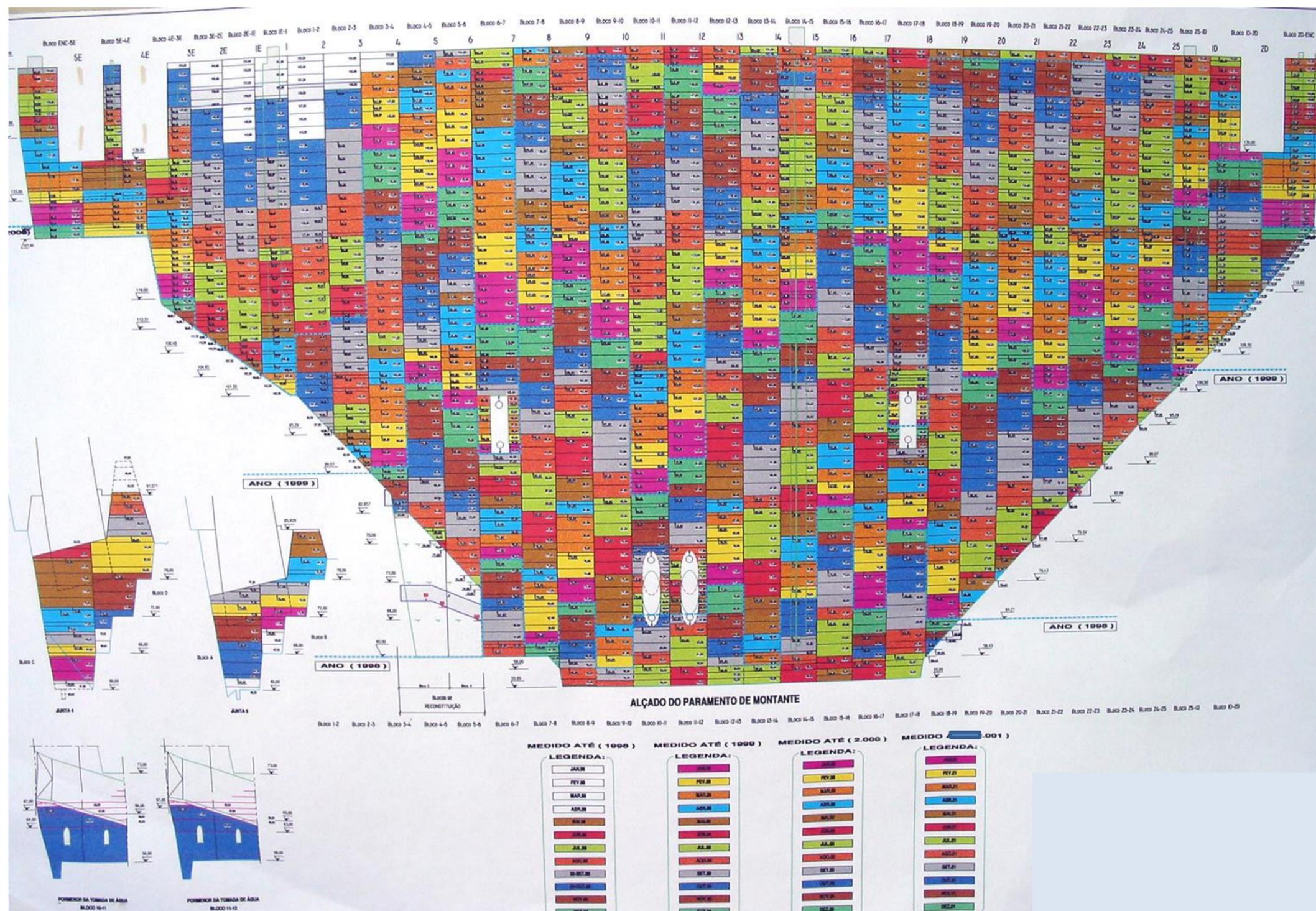


Figura 2.4 – Faseamento construtivo, blocos de betonagem de uma grande barragem (SOMAGUE, 2004)

2.2.1 Reacções álcalis sílica (RAS)

Os álcalis correspondem, em termos químicos, aos elementos constantes na primeira coluna da tabela periódica, no entanto, em termos da química do cimento, apenas o sódio e potássio são considerados como álcalis (SANTOS, 2008).

A reacção Álcalis – Agregado (ACI,1997), corresponde à reacção química entre o sódio e o potássio existente na pasta de cimento e certos constituintes de alguns agregados (formas de sílica amorfa ou minerais siliciosos).

Os agregados, com recurso à análise petrográfica e ensaio em barra de argamassa, podem ser classificados quanto à sua reactividade em três classes (LNEC, 2007a):

- Não reactivos (Classe I);
- Reactivos (Classe II e Classe III).

Para os agregados não reactivos (Classe I) não é necessário tomar nenhuma medida de prevenção.

Para os agregados reactivos (Classe II e Classe III) é necessário seguir a seguinte metodologia (LNEC, 2007a):

- Definir as categorias de risco R1, R2 e R3 (ver Tabela 2.1);
- Definir as categorias ambientais dos betões A1, A2 e A3 (ver Tabela 2.2);
- Definir o nível de prevenção em função do cruzamento da categoria de risco e ambiental P1, P2 e P3 (ver Tabela 2.3).

Em termos práticos e para obras críticas ou com um tempo de vida longo, onde se considera inaceitável o risco de degradação, tais como instalações nucleares, barragens, túneis, pontes ou viadutos importantes, estruturas contendo substâncias perigosas, o nível de prevenção deve ser sempre P3.

Para implementar o nível de prevenção P3 é necessário adoptar duas das seguintes medidas:

- Controlar a alcalinidade da solução dos poros do betão;
- Evitar a presença de um teor crítico da sílica reactiva no betão;
- Controlar a humidade e manter o betão num estado seco;
- Modificar as propriedades do gel formado por forma a não ser expansivo.

Em termos de aplicação prática as medidas mais eficazes são:

- Controlar a alcalinidade da solução dos poros do betão (através da adopção de adições do tipo II em substituição de parte do cimento);
- Evitar a presença de um teor crítico da sílica reactiva no betão.

Tabela 2.1 - Categorias do risco das estruturas (APPLETON, 2013)

Categorias	Exemplos de estruturas
R1 - risco baixo	Elementos não carregados no interior de edifícios
	Estruturas temporárias ou de curto período de vida
	Elementos facilmente substituíveis
R2 - risco normal	Maioria dos edifícios e das estruturas de engenharia civil
R3 - risco elevado	Estruturas críticas ou com tempo de vida longo, onde se considera inaceitável o risco de degradação

Tabela 2.2 - Categorias ambientais dos betões (APPLETON, 2013)

Categorias	Exemplos de estruturas
A1 Betão protegido da humidade exterior	→ Betão no interior de edifícios. → Betão no exterior protegido da atmosfera, por exemplo revestimentos.
A2 Betão exposto à humidade exterior	→ Betão no interior de edifícios onde a humidade é elevada, por exemplo lavandarias, tanques, piscinas. → Betão exposto à atmosfera ou em contacto com solo não agressivo.
A3 Exposição como A2 agravada; por ex, em gelo/degelo	→ Betão interior ou exterior exposto a sais descongelantes. → Betão exposto água do mar ou sais marinhos. → Betão exposto ao gelo/degelo quando húmido.

Tabela 2.3 - Fixação do nível de prevenção (APPLETON, 2013)

Categoria ambiental →	A1	A2	A3
Categoria de Risco ↓			
R1	P1	P1	P1
R2	P1	P2	P2
R3	P2*	P3	P3

(*) para betão em massa deve ser considerado o nível de prevenção P3

A adopção de adições tipo II (SOUSA-COUTINHO, 2006; LNEC, 2007a) deverá cumprir os seguintes critérios mínimos, para que, como substituição do cimento, estas tenham efeito no controlo da alcalinidade da solução dos poros do betão:

- Cinzas volantes $\geq 30\%$ da quantidade de ligante;
- Sílica de fumo $\geq 10\%$ da quantidade de ligante;
- Escórias de alto-forno $\geq 50\%$ da quantidade de ligante.

2.2.2 Reacções sulfáticas internas

Estas reacções estão relacionadas com a ocorrência de temperaturas elevadas, em idades jovens do betão, com a existência de teores críticos de álcalis na pasta de cimento, com a existência de água e de hidróxido de cálcio em quantidades suficientes na solução dos poros de betão (APPLETON, 2013).

A metodologia de prevenção é semelhante à preconizada para as reacções álcalis sílica, ou seja, deve-se classificar o risco e categorias ambientais e, em consequência, definir o nível de prevenção.

As possíveis medidas de mitigação do risco podem ser resumidas nos seguintes termos (LNEC, 2007a):

- Controlar a temperatura máxima no interior do betão, que não deverá ultrapassar os 65°C;
- Controlar a humidade e manter o betão num estado seco;
- Controlar o teor de álcalis, sulfatos e aluminatos do betão.

2.3 Gradientes térmicos e suas consequências

Grandes diferenças de temperatura podem ocorrer quando o núcleo do volume betonado está a uma temperatura elevada e a respectiva zona perimetral se encontra a uma temperatura significativamente mais baixa, condicionada pela temperatura ambiente (ACI, 2007b).

Estes gradientes térmicos causam dilatações/contracções, o que pode implicar fissuração significativa na peça betonada, sempre que existam restrições ao movimento livre, motivadas por elementos adjacentes ou pela própria fundação.

As medidas a implementar com a finalidade de controlar a fissuração, dependem em grande medida dos impactos económicos que a sua existência poderá implicar.

Diferentes níveis de fissuração no betão (abertura e espaçamento) significam impactos diferenciados na aparência, capacidade de serviço, funcionalidade ou capacidade resistente de uma estrutura. Se bem que os níveis de fissuração possam ser controlados para parâmetros aceitáveis, é necessário avaliar em termos económicos o que significa atingir esse objectivo.

Estudos em blocos experimentais (Fig. 2.5) demonstram que gradientes térmicos da ordem dos que são apresentados na Tabela 2.4 são aceitáveis e poderão ser utilizados como uma primeira aproximação numa fase inicial de projecto (PCA, 1987).

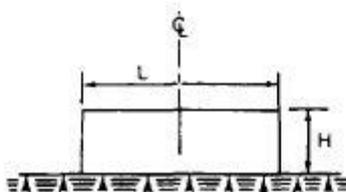


Figura 2.5 – Restrição contínua ao longo da base de um bloco de betonagem (ACI, 2005b)

Tabela 2.4 – Diferencial térmico máximo permitido em blocos de betão em massa (PCA, 1987)

Comprimento do Bloco L (m)	Gradiente térmico permitido para que não ocorra fissuração [°C]		
	H = 0,2L	H = 0,2L a 0,5L	Acima de 0,5L
46 - 61	14	19	22
37 - 46	17	22	25
28 - 37	19	25	Sem restrição
18 - 28	22	Sem restrição	Sem restrição
Até 18	25	Sem restrição	Sem restrição

H – Altura do bloco; L – Comprimento do bloco (Fig. 2.4)

As tensões/extensões de tracção, devidas às variações de comprimento ou volume, associadas aos gradientes térmicos, só ocorrerão se existir um impedimento real.

Esse impedimento em termos práticos é materializado no interface rocha-bloco ou bloco-bloco.

O grau da restrição é função da geometria da peça betonada e vai-se dissipando em altura, conforme se pode observar na figura 2.6, correspondendo ao quociente entre a tensão instalada devido à variação de volume e a tensão que resultaria caso a restrição fosse completa.

2.4 Abordagem para o controlo da fissuração

As mudanças de volume em grandes betonagens podem ser minimizadas recorrendo a composições de betão com reduzida quantidade de cimento, substituindo parte deste constituinte por materiais pozolânicos, nomeadamente cinzas volantes, e recorrendo a técnicas de pré-refrigeração e pós-refrigeração do betão (ACI, 2005a; ACI, 2007b; ACI, 2005b; PCA, 1987).

As restrições às mudanças de volume, condicionadas pelas respectivas condições de fronteira, podem ser geridas pelo correcto posicionamento de juntas e também pela velocidade com que as mudanças de volume ocorrem.

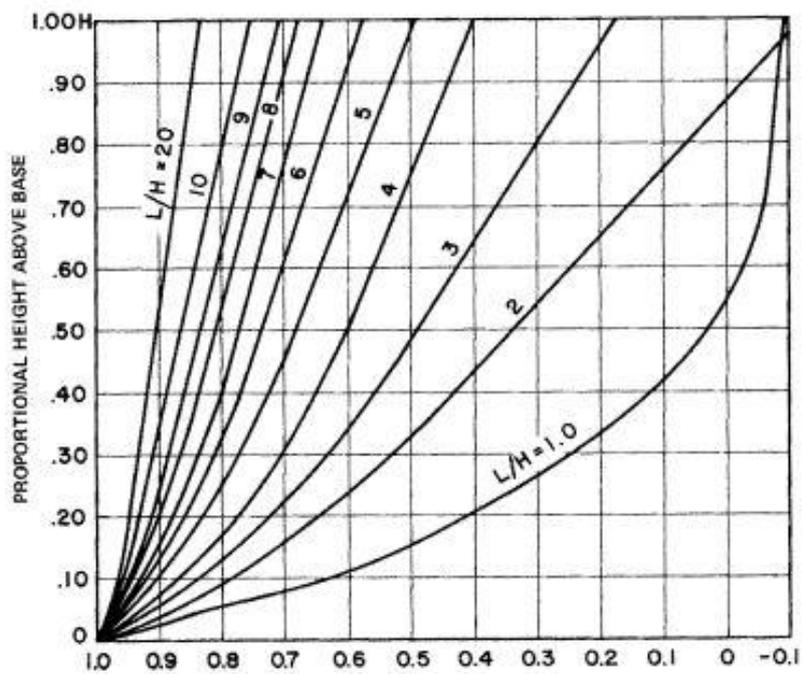


Figura 2.6 - Grau de restrição às variações de comprimento em blocos de betão (ACI, 2007b)

3 PRINCÍPIO PARA A DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DOS BETÕES EM MASSA

3.1 Enquadramento

Muitos dos princípios que enquadram, de forma lata, a definição das composições de betão são igualmente válidos no que concerne a betões para grandes volumes. Na definição de uma determinada composição, os princípios relacionados com a resistência, durabilidade, trabalhabilidade e economia são obrigatoriamente analisados, independentemente do volume em causa, se bem que se poderão chegar a estratégias diferentes consoante a aplicação.

Para grandes estruturas, contendo grandes volumes de betão, é imprescindível que se estude a disponibilidade do cimento apropriado, agregados, aditivos, adjuvantes e água, para que se tenha a certeza que podem ser utilizados para a produção do betão mais eficiente e económico.

Nas obras de grandes volumes é comum termos diversas composições de betão, com o objectivo de conferir diferentes resistências, durabilidades e trabalhabilidades, mesmo dentro da mesma betonagem. É o caso de um bloco de barragem, em que usualmente a zona perimetral, que contacta com a água ou com o meio ambiente, possui uma composição diferenciada do núcleo (mais ligante, diâmetro máximo do agregado $D_{\text{máx}}$ menor, razão água/ligante (A/L) menor).

O primeiro passo para a definição de uma composição de betão é, logicamente, a definição dos requisitos pretendidos, nomeadamente a resistência nas diversas idades e o comportamento desejado, função das condições de exposição ambiental.

3.2 Resistências a longo Prazo

Um dos desenvolvimentos ocorridos em meados do século passado, no que concerne à especificação das resistências para projecto de betões em massa, foi o abandono dos 28 dias de idade como prazo definidor da resistência pretendida.

Em obras como barragens, as máximas tensões induzidas nunca ocorrem em idades inferiores a um ano.

Nestes betões, em que o ligante é usualmente uma mistura de cimento e adições tipo II (com propriedades pozolânicas), o aumento da resistência entre os 28 dias e um ano poderá variar entre os 30% até valores superiores a 200%, dependendo da quantidade de ligante e da proporção cimento-adições tipo II, assim como do tipo de agregados utilizados (ACI, 2005a).

Assim, tornou-se prática corrente para muitos projectistas de barragens especificar para idades mais tardias, 90 dias ou mesmo um ano, as resistências pretendidas para os betões em massa (ACI, 2005a).

Chama-se ainda atenção, que usualmente para este tipo de betão, o controlo de qualidade em obra se faz com recurso a betão crivado, retirando todas as partículas superiores a 38 mm. Esta situação deve-se à necessidade de adequar os meios de ensaio normalmente disponíveis em obra, às dimensões dos provetes (agregados com diâmetro máximo da ordem dos 150mm, exigiriam provetes com dimensão mínima de 450 mm e prensas hidráulicas de grande capacidade, situação que dificilmente se adequa à realidade de obra). Há portanto a necessidade de obter, com recurso a laboratórios externos à obra, as correlações das resistências entre os betões integrais e os crivados.

3.3 Composições de betões em massa

A selecção dos diversos componentes, e respectivas proporções de uma determinada composição de betão em massa, assumem grande importância no desempenho que se lhes pretendem conferir.

Apresentam-se de seguida os principais componentes e respectivos factores que influenciam as respectivas selecções. As características próprias destes betões, nomeadamente a granulometrias dos inertes e volumes de betonagem associados, exigem centrais de betonagem de grande performance e capacidade (Fig. 3.1 e Fig. 3.2).

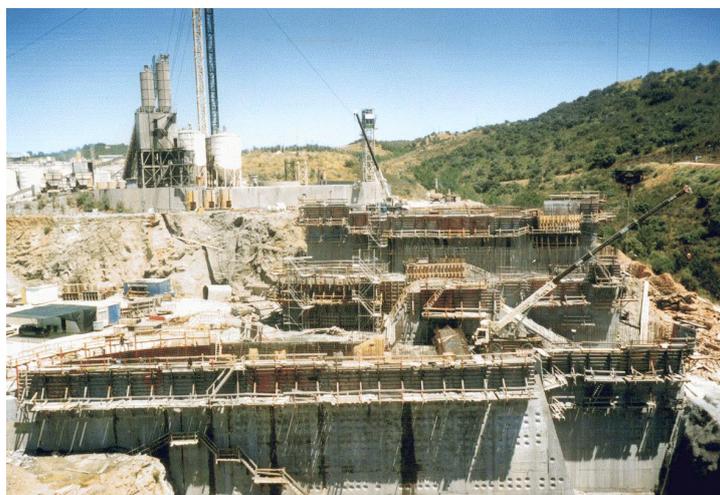


Figura 3.1 - Central industrial para produção de betão em massa

3.3.1 Ligante

O cimento é um ligante hidráulico constituído por pós finos que, quando amassados com água, formam uma pasta, pasta essa que endurece devido apenas à reacção química entre o pó e a água. O termo ligante surge devido à propriedade de poder aglomerar uma quantidade elevada de materiais agregados, tais como areia, gados, pedra britada, conferindo ao conjunto coesão e resistência, que permitem a sua utilização na construção como betões. Considera-se hidráulico porque além de endurecer ao ar, também endurece debaixo de água, adquirindo alta resistência (SOUSA-COUTINHO, 2006).

O cimento resulta da moagem fina de vários componentes, sendo o componente maioritário o clínquer (Tab. 3.1), juntando-se gesso e outros aditivos, como por exemplo, cinzas volantes e escórias de alto-forno.

Segundo a Norma NP EN 197-1 (IPQ, 2012a), que tem como objectivo definir as especificações dos cimentos correntes, os seus constituintes, composições e critérios de conformidade, os 27 produtos da família dos cimentos estão organizados em 5 tipos principais, estando definidas 6 classes de resistência. Os tipos de cimento usualmente produzidos em Portugal são os constantes da tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Composição do clínquer (VARELA e VIEIRA, 2005)

Constituintes	Composição (%)	Contribuição ao nível do comportamento do clínquer
Silicato Tricálcio - C3S	50 – 70	→Resistência mecânica a idades jovens. →Moderada resistência química. →Desenvolvimento de calor de hidratação.
Silicato Bicálcio - C2S	15 – 25	→Resistência mecânica a longo prazo. →Superior resistência química. →Baixo calor de hidratação.
Aluminato Tricálcio - C3A	0 – 17	→Fracas resistências mecânicas. →Alto calor de hidratação. →Muito fraca resistência química.
Aluminoferrato Tetracálcio C4AF	5 – 15	→Baixa resistência mecânica. →Elevada resistência química. →Baixo calor de hidratação.
Cal Livre – CaO	0,5 - 1,5	→Baixa resistência mecânica. →Alta expansibilidade.

Tabela 3.2 - Tipos de cimento produzidos em Portugal (Adaptado VARELA e VIEIRA, 2005)

Tipos Principais	Tipos de Cimento correntes em Portugal	Constituintes Principais (%)			Constituintes Adicionais (%)	
		Clínquer K	Calcário L	Cinzas Volantes V	-	
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95 - 100	x	x	0 - 5
CEM II	Cimento Portland de Calcário	CEM II/A-L	80 - 94	6 - 20	x	0 - 5
		CEM II/B-L	79 - 65	21 - 35	x	0 - 5
CEM IV	Cimento Pozolânico	CEM IV/A	65 - 89	x	11 - 35	0 - 5
		CEM IV/B	64 - 45	x	36 - 55	0 - 5

Tendo em conta que uma das estratégias para lidar com os problemas de durabilidade, decorrentes das RAS, passa por incorporar percentagens de cinzas volantes superiores a 30% da quantidade total da massa do ligante, e que as quantidades de cinzas volantes de um cimento CEM IV/B, incorporam valores entre os 36% e os 55%, a primeira conclusão que se pode tirar é que este tipo de cimento é o apropriado para a realização de betões em massa. Por outro lado, e ainda em termos de reacções internas expansivas, mas agora no que concerne à mitigação dos riscos derivados das reacções sulfáticas, há que impedir que a temperatura do betão atinga os 65°C. Uma das formas é limitar o calor de hidratação do ligante, o que passa por reduzir a quantidade de clínquer, reforçando a percentagem das cinzas volantes.

É usual que betões para núcleos de grandes blocos de betonagem, nomeadamente em barragens, possuam valores da ordem dos 50% de cinzas volantes, em relação à quantidade total da massa do ligante.

No entanto e na prática, tem-se demonstrado difícil negociar com as cimenteiras a produção de um cimento CEM IV B em que o valor de incorporação de cinzas volantes esteja fixo, dentro de um valor único pertencente ao intervalo permitido pela norma NP EN 197-1 (IPQ, 2012a), evitando deste modo a chegada à obra de cimentos com alguma variabilidade de incorporação de cinzas volantes. Esta variabilidade é desaconselhada na definição das composições de betões, em que se pretende o mínimo de ajustes possíveis ao longo do período da obra. Assim, a estratégia mais usual em Portugal, tem sido utilizar uma mistura de cimento Portland CEM I com cinzas volantes no momento da amassadura do betão, considerando-se para tal a especificação LNEC E464 (LNEC, 2007b). As cinzas volantes são assim um dos constituintes presentes na central de betão (Fig. 3.2).

As cinzas volantes são um subproduto resultante da combustão de fornos de centrais termoeléctricas, alimentados com carvão pulverizado. De uma forma geral são constituídas por matéria amorfa de silicatos de cálcio, alumínio e álcalis; no entanto, nem todos os tipos de cinzas são apropriados ao fabrico de betões, uma vez que, segundo a norma NP EN 450-1 (IPQ, 2012b), existem cinzas conformes e não conformes. Os tipos apropriados contêm predominantemente dióxido de silício (SiO_2), e trióxido de alumina (Al_2O_3). Por outro lado, a maior ou menor quantidade de óxido de cálcio CaO (fronteira em torno dos 10%), confere basicamente propriedades pozolânicas (<10% - cinza volante siliciosa) ou propriedades pozolânicas / hidráulicas latentes (>10% - cinza volante calcária), respectivamente (SOUSA-COUTINHO, 2006).

Assim, as cinzas volantes nos betões em massa podem ser usadas para reduzir a quantidade de cimento Portland, funcionando como um factor de optimização económico, mas também para baixar o calor de hidratação, para melhorar a trabalhabilidade e ainda, como já indicado anteriormente, minimizar os riscos das reacções expansivas internas.

Comparando com o cimento Portland, cimentos com quantidades elevadas de cinzas volantes conferem menor resistência ao betão nas idades mais jovens mas não afectam a resistência final nas

idades mais tardias, situação que não condiciona a sua aplicabilidade para o tipo de obras a que usualmente se destinam, conforme já explanado (PCA, 1987).

Para análises preliminares pode considerar-se que o calor de hidratação proveniente das cinzas volantes é, em termos gerais, cerca de 40% a 50% do gerado pelo cimento Portland (PCA, 1987; ANDRIOLO e SGABOZA, 1993).



Figura 3.2 – Central de produção de betão (Barragem de Alqueva)

3.3.2 Agregados

Os agregados são o constituinte presente no betão em maior quantidade, representando entre 70% a 85% da massa total. Assim, as suas propriedades afectam de forma significativa a qualidade do betão. O tamanho, a forma e a respectiva granulometria, são três dos factores principais que condicionam a quantidade de água necessária para a obtenção de um betão com um determinado abaixamento (*slump*).

3.3.2.1 Agregados finos (areias)

Consideram-se como agregados finos a fracção que, quando peneirada, passa praticamente toda no peneiro nº 4 - #4,75mm (ACI, 2005a; ACI, 2007a; PCA, 1987).

Esta fracção pode ser constituída por grãos naturais ou, em alternativa, obtida por britagem de rocha, ou ainda, uma mistura das duas. É relativamente frequente usar uma areia fina natural, misturada com uma areia grossa britada.

A granulometria destes agregados influencia fortemente a trabalhabilidade dos betões. A granulometria recomendada para betões em massa é a constante da tabela 3.3.

Uma vez fixada a granulometria da areia a utilizar, esta deve manter-se razoavelmente constante, com a finalidade de se evitar variações significativas da trabalhabilidade do betão.

Tabela 3.3 - Granulometria de agregados finos para betões em massa (PCA, 1987)

Peneiro nº	#	% em massa retida num determinado peneiro	% em massa acumulada num determinado peneiro
3/8 in.	93,5 mm	0	0
Nº 4	4,75 mm	0 – 8	0 – 8
Nº 8	2,36 mm	5 – 20	10 – 25
Nº 16	1,18 mm	10 – 25	30 – 50
Nº 30	600 µm	10 – 30	50 – 65
Nº 50	300 µm	15 – 30	70 – 83
Nº 100	150 µm	12 – 20	90 – 97
"Pan Fraction"		3 – 10	100

Areias naturais com uma boa granulometria permitem realizar betões com menos água para um mesmo *slump*, logo com menos ligante e, conseqüentemente, menor calor de hidratação, e ainda melhor desempenho em termos de durabilidade.

No entanto este cenário ideal pode deitar por terra a exequibilidade económica de uma determinada obra, caso seja necessário transportar as areias de grandes distâncias.

Areias britadas tornam-se então a solução, implicando no entanto mais água, mais ligante, maior calor de hidratação, maior necessidade de controlo e gestão dos efeitos das temperaturas.

Na figura 3.3, pode-se observar as pilhas de armazenamento de diversos agregados de uma grande instalação industrial de britagem (Barragem de Alqueva).



Figura 3.3 - Pilhas de armazenamento de agregados

3.3.2.2 Agregados grossos

Como definição geral, pode considerar-se que os agregados grossos são aqueles que são retidos no peneiro nº 4 - #4,75 mm, e as maiores dimensões são inferiores a 150 mm, podendo ter origens naturais ou ser resultado da britagem de rochas (Fig. 3.4) e respectiva crivagem (ACI, 2005a; ACI, 2007a; PCA, 1987)

Do ponto vista económico, estabelecer o maior tamanho de agregado a ser utilizado num determinado betão em massa representa uma das decisões mais importantes a ser tomadas.

Enquanto no passado, agregados com $D_{\text{máx}} \geq 150$ mm eram usados, passou a ser aceite que o maior tamanho a ser utilizado não deve ultrapassar os 150 mm, tendo em conta os condicionamentos económicos decorrentes do manuseamento/transporte, amassadura, colocação e vibração do betão (ACI, 2005a; PCA, 1987).

Recentemente começa a surgir uma tendência entre os projetistas para que o $D_{\text{máx}}$ preconizado seja 75 mm ou 100 mm, eliminando desta forma uma das pilhas de armazenamento e a respectiva infraestrutura de manuseamento.



Figura 3.4 – Equipamento de britagem de agregados

Teoricamente, para um determinado volume de betão, o aumento do $D_{\text{máx}}$ do agregado significa a diminuição da quantidade de ligante necessária para a obtenção da mesma qualidade.

Esta teoria tem como base o facto de, para um bom fuso granulométrico, o espaço entre partículas decresce quando o tamanho máximo do agregado utilizado aumenta.

No entanto, a melhor eficiência no uso do ligante, para obtenção de uma resistência com recurso a um determinado agregado, deve estar associado a um $D_{\text{máx}}$ definido (Fig. 3.5).

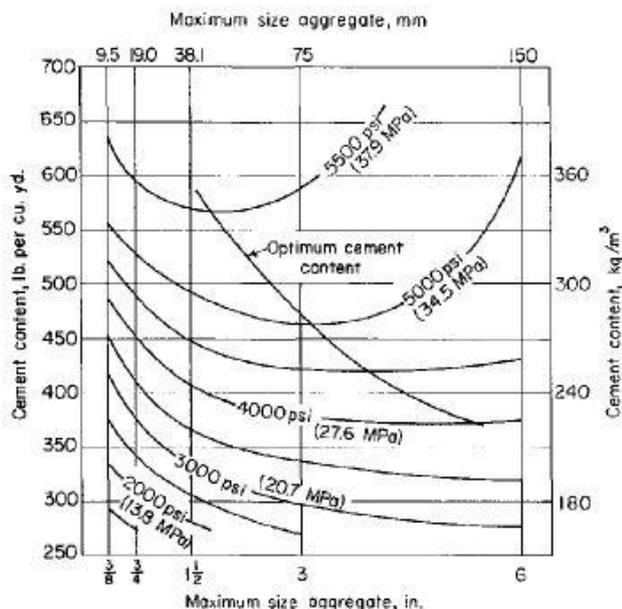


Figura 3.5 - Relação $D_{máx}$ -quantidade de ligante para determinada tensão de compressão aos 90 dias (PCA, 1987)

Conforme se pode concluir da análise da figura 3.5, para resistências à compressão da ordem dos 20,7 MPa ou 27,6 MPa, a quantidade de ligante associada não varia significativamente com $D_{máx}=75$ mm ou 150 mm.

No entanto, pequenas variações na quantidade de ligante podem assumir, no cômputo total da obra, grandes impactos económicos, devido aos volumes normalmente envolvidos quando se utilizam betões em massa.

Claro que nos betões em massa em que se utilizam armaduras existem outras condicionantes à definição do $D_{máx}$, decorrentes dos recobrimentos e espaçamentos entre armaduras.

As principais classes granulométricas de agregados grossos que se costumam utilizar neste tipo de betão são (ACI, 2005a):

[4,75 - 9,5] mm; [9,5 - 19] mm; [19 - 37,5] mm; [37,5 - 75] mm; [75 - 150] mm.

A definição das granulometrias destas classes e respectivas percentagens, função do $D_{máx}$, seleccionado, para a realização de betões em massa são apresentadas nas tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 - Granulometrias de agregados grossos para betões em massa (ACI, 2005a)

Peneiro # [mm]	% em massa que passa no peneiro de malha #			
	[75 - 150] mm	[37,5 - 75] mm	[19 - 37,5] mm	[4,75 - 19] mm
175	100			
150	90 - 100			
100	20 - 45	100		
75	0 - 15	90 - 100		
50	0 - 5	20 - 55	100	
37,5		0 - 10	90 - 100	
25		0 - 5	20 - 45	100
19			1 - 10	90 - 100
9,5			0 - 5	30 - 55
4,75				0 - 5

Tabela 3.5 – Percentagens aproximadas de cada classe granulométrica (agregados grossos), para realização de betões em massa (ACI, 2005a)

D _{máx.} [mm]	Classe Granulométrica				
	[75-150]mm	[37,5-75]mm	[19-37,5]mm	[9,5-19]mm	[4,75-9,5]mm
19				55 - 73	27 - 45
38			40 - 45	30 - 35	15 - 25
75		20 - 40	20 - 40	15 - 25	0 - 15
150	20 - 35	20 - 32	20 - 30	12 - 20	8 - 15

A determinação da quantidade óptima de ligante dependerá fortemente da granulometria seleccionada, mas também da forma das partículas, mas as conclusões finais só serão possíveis de obter em estaleiro, com a produção real de agregados (Fig. 3.6).

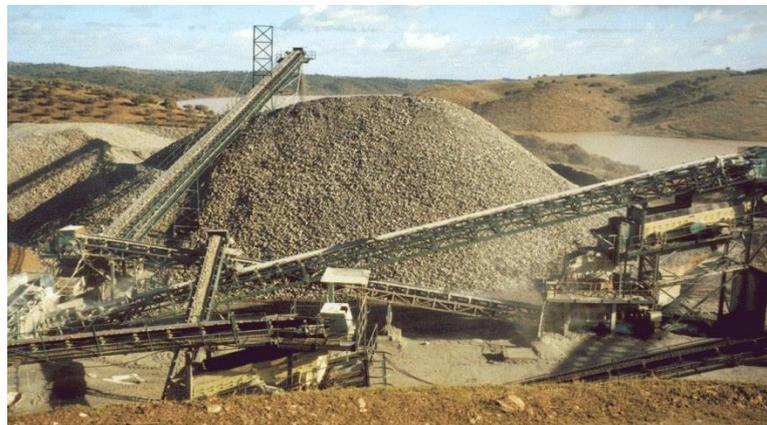


Figura 3.6 – Stock de agregados, Barragem de Alqueva

3.3.3 Relação água/ligante

A resistência de um betão em massa, tal como na generalidade dos betões, é condicionada em primeiro lugar pela quantidade/qualidade do ligante e em segundo pela qualidade dos agregados.

A qualidade da pasta do ligante depende em grande parte da quantidade relativa de água e ligante usada (A/L).

Baixas relações A/L para uma determinada resistência pretendida, permitem um melhor desempenho do betão, tanto em termos de quantidade de ligante utilizado, como também no que se refere à respectiva durabilidade e impermeabilidade do betão, implicando naturalmente um menor aumento de temperatura, fruto de um menor calor de hidratação.

Em função da figura 3.5, apresentam-se na tabela 3.6 alguns valores usuais da quantidade de água e de ligante, necessários à realização deste tipo de betão.

Em ensaios de *slump*, com utilização de agregados com D_{máx.}=150 mm e introdutor de ar incorporado, é comum a utilização de quantidades de água entre os 70 e os 90 kg/m³, quando os agregados são

naturais. Para agregados britados, poder-se-á falar em valores entre os 80 e os 113 kg/m³ (ACI, 2005a.).

Se o D_{máx} seleccionado for 75 mm, a quantidade de água tende a aumentar cerca de 20%.

No entanto, quando se pretendem tensões superiores a 27,8 MPa num prazo de um ano, um D_{máx} de 75 mm pode ser mais eficiente (ACI, 2005a).

Tabela 3.6 – Média de quantidade de água para slumps de 50mm em função de D_{máx} e da quantidade de ligante (PCA, 1987)

Quantidade de ligante [kg/m ³]	Média de quantidade de água (l) para Slumps de 50mm em função de diversos D _{máx}				
	10 mm	19 mm	38 mm	75 mm	150 mm
167	183	171	152	136	110
223	181	166	148	132	112
279	179	162	144	129	114
335	171	163	141	129	121
390	176	168	155	141	129

Na tabela 3.7 apresentam-se relação A/L para estruturas realizadas em betão em massa.

Tabela 3.7 – Valor A/L máximos recomendados para betões em massa (PCA, 1987)

Betão no interior de grandes blocos em zonas não expostas	Clima Severo	Clima Temperado
Estruturas expostas - linha de água em estruturas hidráulicas ou frente de água onde os ciclos alternados de saturação são possíveis	0,5	0,55
Betão para betonagens submersas	0,45	0,45
Betão permanentemente submerso	0,55	0,55
Betão sujeito a grandes velocidades de água (12m/s) ou exposto a ataque de sulfatos, líquidos corrosivos, sais ou água do mar	0,45	0,45

3.3.4 Adjuvantes

Consideram-se adjuvantes todos os materiais adicionados ao betão (com excepção da água, agregados, ligante, adições e fibras de reforço), com a finalidade de modificar as propriedades deste, sendo usualmente adicionados na misturadora da central de betão (ACI, 2012).

Os principais adjuvantes que são utilizados no betão em massa são:

- Introdutor de ar;

- Plastificante (reductor de água);
- Retardador de presa.

Cada um deles pode ter efeitos benéficos no betão, otimizando algumas propriedades ou resolvendo problemas particulares.

Nenhum adjuvante deve ser utilizado na produção de betão sem que se realizem ensaios de prova com os restantes constituintes seleccionados, que atestem os resultados pretendidos.

3.3.4.1 *Introdutor de ar*

O comportamento do betão às acções de gelo e degelo, assim como a ciclos de humificação e secagem, pode ser fortemente melhorado com recurso a um introdutor de ar (ACI, 2012; PCA 1987). Esta situação é bastante comum em estruturas hidráulicas.

O espaço inicialmente ocupado pela água da mistura, raramente será na sua totalidade ocupado pelos produtos resultantes da reacção do ligante, após o endurecimento do betão.

Os espaços livres que se mantêm são geralmente poros de capilaridade. Em condições de saturação, estas cavidades são preenchidas com água. Se esta água congela, o seu aumento de volume (cerca de 9%) provoca uma enorme pressão interna. Esta pressão interna é muito superior à capacidade resistente de tracção do betão, daí resultando uma forte fissuração.

Os vazios resultantes do introdutor de ar provocam descontinuidades nos poros de capilaridade, por serem muito superiores em dimensão, funcionam como reservatórios de segurança, permitindo acomodar o aumento do volume da água por acção do gelo.

O importante não é só a quantidade do ar introduzido mas também, o tamanho e a respectiva distribuição das pequenas bolhas de ar.

A existência das referidas bolhas de ar permite reduzir a segregação e exsudação do betão, melhorando assim a trabalhabilidade do betão fresco, particularmente quando na presença de betões com baixa quantidade de ligante, situação frequente nos betões em massa.

Na tabela 3.8 apresentam-se as recomendações gerais para a incorporação de ar em betões em massa.

Tabela 3.8 – Recomendações gerais para incorporação de ar em betões em massa sujeitos a condições severa de exposição (PCA, 1987)

D_{máx} [mm]	% de ar incorporado
150	4,0
75	4,5
40	5,5
20	6,0
10	7,7

Taxas de incorporação de introdutor de ar de 15 a 130 ml por 100 kg de ligante são usuais em betões (ACI, 2012; SIKA, 2007).

3.3.4.2 Plastificante (reductor de água)

Este tipo de adjuvante é usualmente incorporado na misturadora da central de betão e tem como principais finalidades aumentar a trabalhabilidade, melhorar a durabilidade, facilitar a colocação em obra, controlar o tempo de presa, permitindo a produção de betões com melhor acabamento e menor segregação (ACI, 2012; SIKA, 2007).

Melhora igualmente as propriedades do betão que contém agregados ásperos, com deficientes granulometrias, ou ambas as situações em simultâneo.

Estes comportamentos melhorados são adquiridos enquanto se permite a redução do total de água, possibilitando o controlo dos tempos de presa em diversos estaleiros, com diferentes condições climáticas.

A melhoria da resistência de um betão, resultante da aplicação de um plastificante, é em primeiro lugar fruto da redução do coeficiente da relação A/L, o que permite um aumento da eficiência da pasta cimentícia, ou dito de outra forma, para uma determinada quantidade de ar incorporado, a resistência de um betão é inversamente proporcional à relação A/L.

O fornecedor do adjuvante deve estar habilitado a fornecer informações sobre dosagens habituais, tempos de presa e previsão de ganhos de resistência.

Tipicamente os plastificantes permitem reduções da quantidade de água entre 5% a 12%, dependendo da composição, dosagem e dos restantes componentes do betão (ACI, 2012).

Valores de dosagem de 130 a 390 ml por 100 kg de cimento são usuais. Valores superiores podem ter impacto no tempo de presa (ACI, 2012; SIKA, 2007).

3.3.4.3 Retardador de presa

Os retardadores de presa são utilizados usualmente para lidar com os efeitos indesejados da temperatura ambiente alta, tais como: aceleração do tempo de presa e redução da resistência à compressão.

Os benefícios da utilização podem ser resumidos nos seguintes termos (PCA, 1987):

- Permitir grande flexibilidade ao aumentar o tempo de presa (1 a 3,5 horas), prevenindo desta forma o aparecimento de juntas frias;
- Facilitar o acabamento das superfícies em tempo quente;
- Permitir que as cofragens deformem na sua totalidade, antes do início da presa do betão.

As respectivas dosagens são função da quantidade de ligante e o aumento do tempo de presa depende de vários factores, tais como: concentração de adjuvante, dosagem, composição do betão, temperaturas do betão e temperatura ambiente.

Diferentes tipos de cimento, ou diferentes lotes, podem requerer diferentes quantidades de adjuvante, por forma a obter o efeito desejado, devido a variações químicas do cimento, finura ou ambas.

O comportamento deste tipo de adjuvante parece estar relacionado, em primeiro lugar, com a quantidade de aluminato tricálcico e com os álcalis contidos no cimento. Em segundo lugar, com o momento da introdução deste adjuvante no betão. Se for permitido introduzi-lo com o cimento totalmente húmido, e os outros componentes igualmente colocados e misturados, o resultado pode ser um aumento do tempo de presa e um maior *slump*.

3.4 Verificação dos requisitos de durabilidade

Nas estruturas em que usualmente se recorre à utilização de betão em massa, a estratégia mais comum para o projecto de durabilidade consiste em seleccionar os materiais e ter presente uma concepção estrutural que possa resistir à deterioração durante o período de vida.

Os requisitos de durabilidade constantes das especificações e normas LNEC E464 (LNEC, 2007b) e NP EN 206-1 (IPQ, 2013), estabelecem a seguinte classificação da agressividade ambiental para estruturas de betão armado:

- X0 – Exposição sem risco de corrosão;
- XC – Exposição com risco de corrosão induzida pela carbonatação;
- XD – Exposição com risco de corrosão induzida por cloretos;
- XS – Exposição com risco de corrosão induzida por cloretos da água do mar;
- XF – Exposição com risco de ataque do gelo e do degelo;
- XA – Exposição com risco de ataque químico do betão.

A corrosão não é normalmente um problema para as estruturas realizadas com betão em massa, pelo simples facto de não se recorrer, na maioria dos casos, à incorporação de armaduras.

Os restantes requisitos mínimos para a qualidade do betão, função do uso pretendido, reflectem-se na definição de relações A/L máximas, dosagem mínima de ligante e na definição de classes mínimas de resistência.

As relações A/L aconselhadas para estes tipos de betões, e já referenciadas em 3.3.3, não costumam ser condicionadas pelos requisitos da durabilidade, uma vez que estes betões são muito secos, exigindo tecnologias apropriadas de colocação, espalhamento e compactação, conforme pode ser observado na figura 3.7.

No entanto, a classe mínima de resistência e a quantidade mínima de cimento podem constituir condicionantes a serem tidas em conta na qualidade do betão, uma vez que nas estruturas realizadas

com betões em massa não são necessárias grandes resistências à compressão e a quantidade de ligante convém ser minimizada, por forma a controlar o calor de hidratação.

A forma mais usual para ultrapassar os condicionamentos acima apresentados, sem se reflectir na quantidade total do betão da estrutura, consiste em utilizar numa faixa perimetral junto aos paramentos de montante e jusante dos blocos de betonagem (nas barragens essa faixa costuma ter um metro), betões que cumpram as exigências decorrentes das normas vigentes, sendo que a parte mais significativa do volume de betão (o chamado núcleo do bloco de betonagem) fica deste modo livre dos requisitos impostos pelas classes ambientais, cumprindo apenas as exigências necessárias ao controlo do calor de hidratação e minimização das reacções expansivas internas (Fig. 3.8).



Figura 3.7 - Equipamento para colocação, distribuição e compactação de betão em massa

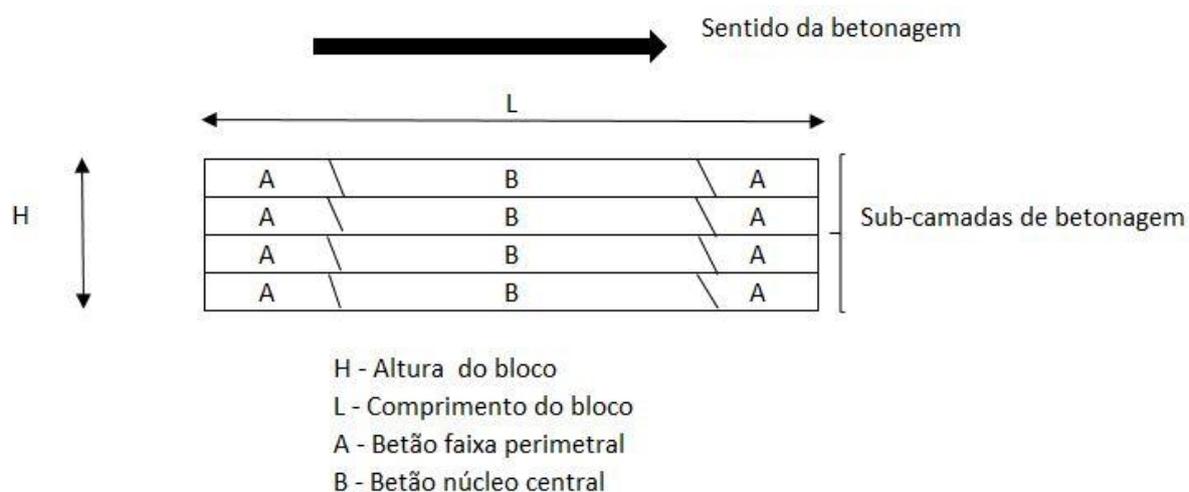


Figura 3.8 – Boco de betonagem (subcamadas – faixa perimetral e núcleo central)

4 CALOR DE HIDRATAÇÃO

Um dos principais problemas em construções com recurso a betão em massa é, tal como já referido anteriormente, a necessidade de controlar a temperatura interna que se gera, devido à reacção exotérmica de hidratação do cimento (ACI, 2005a; SILVEIRA, 1961).

Neste capítulo irão ser introduzidas as principais propriedades térmicas do betão, e as formulações que permitem estimar o nível de controlo de temperatura a implementar para determinada aplicação. Exemplos práticos serão apresentados em capítulos posteriores.

4.1 Massa volúmica e calor específico

A massa volúmica de uma substância corresponde ao quociente entre a massa de uma determinada quantidade e o correspondente volume. Usualmente para o betão é definido um intervalo de 20 a 24 kN/m³ para o peso do betão, sendo habitual adoptar um valor da ordem dos 24 kN/m³ (BRAZÃO-FARINHA, e REIS, 1996), a que corresponde uma massa volúmica da 2.447,3 kg/m³.

O calor específico de um determinado material é definido como sendo a quantidade de calor que é necessário fornecer para elevar, numa unidade de temperatura, uma unidade de massa desse material.

O método para determinação do calor específico de um betão (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993), consiste basicamente em fornecer uma determinada quantidade de calor a um bloco de betão de massa conhecida, mantido isolado termicamente, medindo nessas condições a variação de temperatura em consequência do calor fornecido.

O calor específico de um betão é influenciado pelo tipo e quantidade dos elementos que o compõem, particularmente os agregados, e pela temperatura a que está sujeita o corpo da amostra, aquando da sua determinação. No entanto, o grau de saturação é o factor que mais influi nas variações desta propriedade (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993). Para estruturas maciças de betão este valor deverá ser considerado constante (USACE, 1997).

4.2 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica é a propriedade que mede a facilidade de um material conduzir calor, sendo definida como a razão do fluxo de calor para um gradiente de temperatura. Será medida em joules por unidade de tempo, quando há uma diferença de temperatura de 1°C numa espessura de 1m de material; pode assim ser expressa em J/(m.hr.°C) ou simplificada por W/(m.°C) (SANTOS e MATIAS, 2006).

A condutibilidade térmica dos betões é grandemente influenciada pelas características mineralógicas e quantidades dos agregados que o compõem, assim como, pelo seu grau de saturação. A massa

volúmica de um betão tem pouca influência na sua condutibilidade térmica (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993). Com efeito, no ITE 50 do LNEC (SANTOS e MATIAS, 2006) a condutibilidade térmica do betão com massa volúmica 2.300-2.600 kg/m³ pode considerar-se 2,0 W/(m.°C) .

4.3 Difusibilidade

A partir do conhecimento do valor da condutibilidade térmica, calor específico e massa volúmica de um betão, obtém-se a sua difusibilidade térmica (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993), que é definida nos seguintes termos:

$$h^2 = \frac{K}{C \cdot \gamma} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde

h^2 – difusibilidade (m²/h)

K – condutibilidade (kJ/(m.hr.°c))

C – calor específico (kJ/(kg.°c))

γ – massa volúmica (kg/m³)

A difusibilidade é fortemente condicionada pelo tipo de rocha a partir da qual são produzidos os agregados incorporados (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993; ACI, 2005a).

Na tabela 4.1, apresentam-se os valores da difusibilidade do betão em função do tipo de rocha dos agregados.

Se o tipo de rocha não for conhecido, em estudos preliminares poder-se-á optar por um valor médio de 0,093m²/dia, ou seja, 3,9*10⁻³ m²/hr (ACI, 2005a).

No entanto a análise deste valor médio, comparativamente com os valores constantes na tabela 4.1, revela que os valores reais da difusibilidade poderão variar significativamente em relação a este valor.

Tabela 4.1 – Difusibilidade função do tipo de rocha (ACI, 2005a)

Agregados	Difusibilidade do betão	
	(m ² /dia)	(m ² /h)*10 ⁻³
Quartzito	0,129	5,40
Calcário	0,113	4,70
Dolomite	0,111	4,60
Granito	0,096	4,00
Riolito	0,078	3,20
Basalto	0,072	3,00

Uma massa de betão é afectada pela dissipação e pela absorção de calor em relação ao meio ambiente. Se a variação da temperatura ambiente for expressa por uma curva sinusoidal, e se o bloco de betão for suficientemente grande, para que as variações internas da temperatura sejam desprezáveis quando

comparadas com as das faces expostas, o alcance da variação da temperatura em relação às superfícies pode ser contabilizado nos seguintes (ACI, 2005a):

$$\frac{R_o}{R_x} = e^{-x\sqrt{\pi/(h^2*\gamma)}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde

R_x – temperatura a uma distância x da superfície;

R_o – temperatura na superfície ($x=0$);

e – constante = 2,718;

x – distância à superfície;

h^2 – difusibilidade;

r – massa volúmica.

4.4 Elevação adiabática da temperatura

Um corpo é considerado em condições adiabáticas quando não há trocas de calor entre ele e o meio ambiente. A hidratação do cimento, sendo uma reacção química exotérmica, provoca libertação de calor. Dentro deste contexto, a elevação adiabática do betão é a diferença entre a temperatura máxima que o betão atinge e a temperatura da mistura dos vários elementos, diferença que é provocada unicamente pela hidratação do ligante, sem trocas com o meio ambiente (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

A elevação adiabática do betão é directamente proporcional ao calor de hidratação do ligante e inversamente proporcional ao calor específico do betão, tal como apresentado na equação 4.3, que permite determinar uma estimativa da elevação em causa (PCA, 1987; INTECSA, 1998):

$$T = \frac{C*Q}{S*E} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

onde

T – estimativa da subida adiabática da temperatura (°C);

Q – calor de hidratação do ligante (J/kg);

S – calor específico do betão (J/(kg°C));

C – correcção para ter em conta a percentagem de cinzas;
(kg de cimento + 0,5 * kg de cinzas) / kg de ligante

E – quociente do massa total dos constituintes do betão pela massa do ligante.

Os elementos condicionantes na elevação adiabática da temperatura são, em termos práticos, o tipo e a quantidade de ligante.

Os compostos principais do cimento Portland (clínquer) - C3S, C2S, C4AF e C3A, libertam quantidades diferentes de calor durante as reacções químicas de hidratação. Pode assim concluir-se que a elevação adiabática da temperatura está intimamente ligada à composição química do cimento (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993). A finura do cimento tem influência apenas na velocidade de

desenvolvimento das reacções e não na quantidade de calor gerado (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993).

Conforme já abordado, o uso de materiais pozolânicos tem uma influência vincada no desenvolvimento da curva de evolução adiabática do betão e também no seu valor final. Estes comportamentos são explicados, em primeiro lugar, porque os materiais pozolânicos reagem com um subproduto da hidratação do cimento (hidróxido de cálcio) em idades mais avançadas e, em segundo lugar, porque o calor gerado pelas reacções dos materiais pozolânicos com o hidróxido de cálcio é da ordem dos 50% do que é gerado pelo equivalente em cimento (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993).

Aditivos, tais como retardadores e aceleradores de presa, têm influência principal nas velocidades de reacção, nas primeiras idades (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993).

A temperatura da colocação do betão, além de contribuir directamente para a temperatura final, contribui igualmente para a velocidade das reacções químicas do ligante, já que temperaturas baixas provocam um retardamento das reacções e, à medida que a temperatura de colocação do betão aumenta, as velocidades também aumentam (ANDRIOLO e SGABOZA, 1993).

4.5 Dissipação do Calor

A análise da dissipação do calor em corpos de betão em massa pode ser avaliada com recurso a gráficos, cálculos manuais ou com recurso a uma abordagem com elementos finitos.

Se o corpo que se pretende analisar puder ser aproximado, em termos de forma geométrica, a um dos gráficos existentes para a determinação das perdas de calor, rapidamente se poderá obter soluções para diversos problemas tais como: arrefecimento artificial de betão em massa, arrefecimento de agregados, arrefecimento de blocos de betão (perda de calor).

As situações supra referenciadas podem ser resolvidas com recurso a gráficos do tipo constante da figura 4.1.

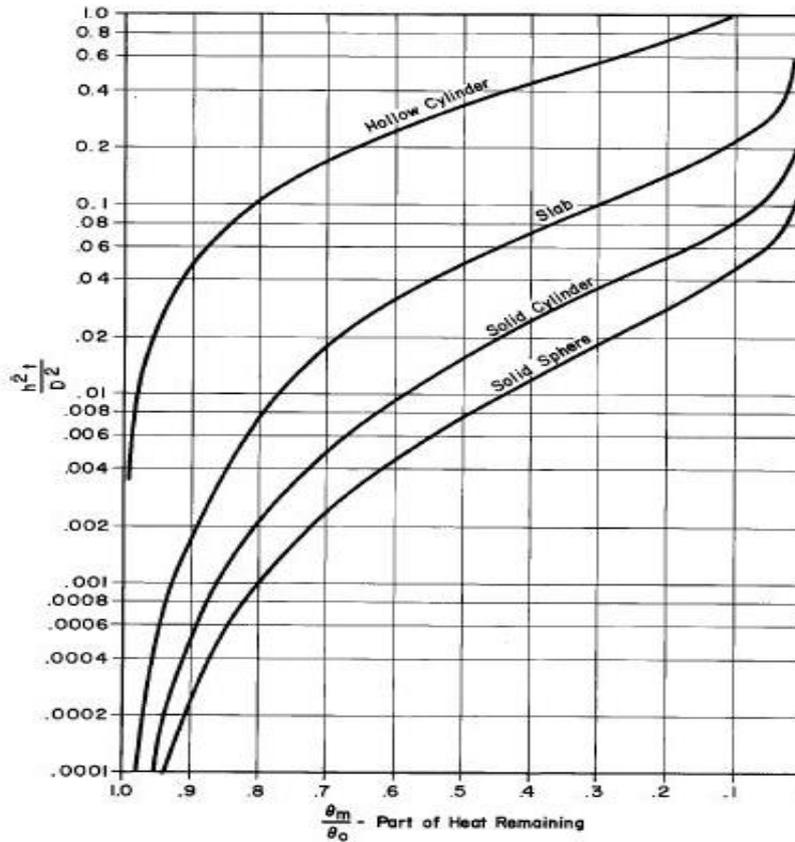
4.6 Elevação da temperatura em grandes blocos de betonagem

Em betonagens de grandes dimensões, a problemática das temperaturas aproxima-se do enquadramento apresentado aquando da explanação do conceito de elevação adiabática da temperatura.

Assim, a temperatura máxima atingida no núcleo de um bloco de betão em massa será a temperatura a que o betão é colocado, acrescida da sua subsequente subida devida às reacções exotérmicas de hidratação do cimento, conforme já referido (PCA, 1987).

Na realidade existem trocas de calor com o meio ambiente, mas se as dimensões do bloco de betão forem suficientemente grandes, os seus efeitos serão fortemente atenuados em profundidade, conforme

apresentado no item em que se introduziu o conceito de difusibilidade (4.3) e traduzido nos termos constantes da figura 4.2.



t - duração em dias;
 h^2 - difusibilidade (m^2/dia);
 D - espessura da secção em estudo (m);
 θ_0 - diferença de temperatura inicial entre corpo e a temperatura ambiente ($^{\circ}C$);
 θ_m - diferença de temperatura final entre corpo e a temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

Figura 4.1 - Perda de calor em corpos (ACI, 2005a)

4.7 Elevação da temperatura em grandes blocos de betonagem

Em betonagens de grandes dimensões, a problemática das temperaturas aproxima-se do enquadramento apresentado aquando da explanação do conceito de elevação adiabática da temperatura.

Assim, a temperatura máxima atingida no núcleo de um bloco de betão em massa será a temperatura a que o betão é colocado, acrescida da sua subsequente subida devida às reacções exotérmicas de hidratação do cimento, conforme já referido (PCA, 1987).

Na realidade existem trocas de calor com o meio ambiente, mas se as dimensões do bloco de betão forem suficientemente grandes, os seus efeitos serão fortemente atenuados em profundidade, conforme apresentado no item em que se introduziu o conceito de difusibilidade (4.3) e traduzido nos termos constantes da figura 4.2. Em betonagens de grandes dimensões, a problemática das temperaturas aproxima-se do enquadramento apresentado aquando da explanação do conceito de elevação adiabática da temperatura.

Assim, a temperatura máxima atingida no núcleo de um bloco de betão em massa será a temperatura a que o betão é colocado, acrescida da sua subsequente subida devida às reacções exotérmicas de hidratação do cimento, conforme já referido (PCA, 1987).

Na realidade existem trocas de calor com o meio ambiente, mas se as dimensões do bloco de betão forem suficientemente grandes, os seus efeitos serão fortemente atenuados em profundidade, conforme apresentado no item em que se introduziu o conceito de difusibilidade (4.3) e traduzido nos termos constantes da figura 4.2.

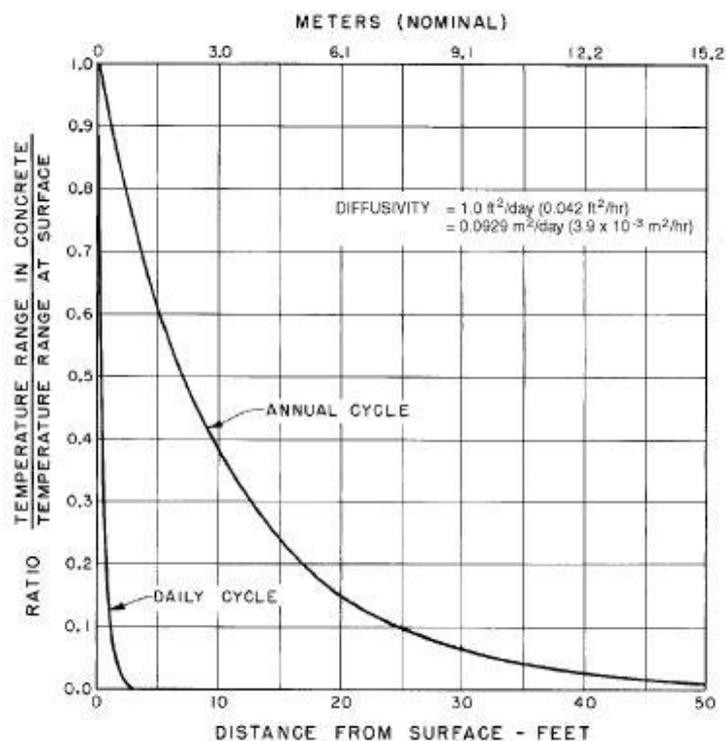


Figura 4.2 - Variação da temperatura em profundidade (bloco de betão), resultante da troca de calor com o meio ambiente (ACI, 2005a)

Nos blocos das barragens construídos lado a lado e sobrepostos, as trocas de calor laterais com o meio ambiente são desprezáveis, devido a estar-se a falar usualmente de comprimentos da ordem de mais de uma dezena de metros.

No entanto, verticalmente, e para permitir a troca de calor com o meio ambiente, os blocos costumam ter alturas da ordem dos 2 metros.

Para existir alguma contribuição efectiva de troca de calor com o meio ambiente, é usual o projectista impor datas mínimas de sobreposição de blocos na ordem dos 3 a 4 dias.

Assim e de forma resumida, os faseamentos/métodos construtivos que mais condicionam a problemática das temperaturas são: espaçamento das juntas de contração (definem o comprimento do bloco), altura dos blocos, ritmos de betonagem, tipo de cofragem e respectivos prazos de desmoldagem.

Deste enquadramento conclui-se que a problemática do controlo das temperaturas em obras com recurso a betões em massa se pode fazer em quatro vertentes:

- Optimização das composições de betão;
- Optimização da geometria e sequência/métodos construtivos;
- Controlo da temperatura de colocação do betão (pré-refrigeração);
- Medidas de controlo de temperatura dos blocos de betão após betonagem (pós-refrigeração)

5 PRÉ-REFRIGERAÇÃO

5.1 Enquadramento

Fornecer betão em massa a temperaturas controladas para grandes obras, tais como barragens e grandes fundações, é por todo o mundo um factor importante a ter em conta, e condicionante da temperatura final que o betão vai atingir, conforme já explanado.

O calor de hidratação do ligante poderá fazer subir a temperatura, nestes tipos de betões, em cerca de 25°C (GADJA e ALSAMSAM, 2006) o que significa que em climas quentes, e se a temperatura de colocação não for controlada, facilmente se possa chegar a valores críticos de temperatura, tanto em termos de química do betão, como em termos de gradientes térmicos.

Assim, usualmente o projectista define uma temperatura máxima de colocação, embora esse limite possa variar fortemente de obra para obra, de país para país, de região para região, sendo comum definir valores de temperatura entre os 7°C e os 30°C.

A pré-refrigeração, que em termos gerais consiste em refrigerar as temperaturas dos vários componentes do betão, surgiu no início dos anos 40 do século passado (ACI, 2005a) e os sistemas que o permitem fazer podem ser bastante sofisticados, o que implicará que os custos de instalação e operação possam ser bastante altos e, em alguns casos, mesmo superiores aos da produção do próprio betão. Dentro deste contexto, torna-se essencial a optimização dos sistemas de pré-refrigeração.

5.2 Contexto Português

De acordo com a norma NP EN 206-1 (IPQ, 2013), a temperatura do betão fresco na altura da entrega em obra não deve ser inferior a 5°C, e quando for necessária a definição de uma temperatura máxima, esta deverá ser especificada com as respectivas tolerâncias, ou seja, qualquer requisito no que concerne ao arrefecimento ou aquecimento do betão deve ser acordado com o produtor.

A definição da temperatura máxima do betão a entregar em obra é igualmente condicionada pela estratégia de pós-refrigeração adoptada, assunto que será explanado em item próprio.

Em Portugal, o autor desta dissertação foi confrontado basicamente com dois cenários típicos de exigências de pré-refrigeração:

- Limitar a temperatura máxima de colocação do betão fresco a valores da ordem dos 20-25°C (com pós-refrigeração em fase posterior);
- Limitar a temperatura máxima de colocação do betão fresco a valores da ordem dos 8-10°C (sem pós-refrigeração em fase posterior).

5.3 Estimativa e controlo das temperaturas do betão fresco

O método mais usual de baixar a temperatura da massa de betão (pré-refrigeração) é baixar a temperatura dos seus componentes antes de se proceder à respectiva amassadura. Um ou mais componentes poderão ser arrefecidos. Nos períodos do ano com temperaturas mais elevadas, os agregados e a água deverão ser mantidos à temperatura mais baixa possível, pois têm grande influência na temperatura final do betão (ACI, 2005a; ACI, 2005b; ACI, 2010; LERCH, 1955).

A contribuição de cada componente para a temperatura final da massa de betão está relacionada com o seu calor específico, temperatura e respectiva quantidade.

É portanto evidente, que a temperatura final da massa de betão no momento da sua colocação, está em primeiro lugar dependente da temperatura dos agregados e só depois da temperatura da água da mistura.

A temperatura aproximada de uma massa de betão pode ser calculada (ACI, 2010) usando a equação:

$$T = \frac{T_i * M_i * C_{ei} + T_c * M_c * C_{ec} + T_w * M_w * C_{ew} + T_{wa} * M_{wa} * C_{ewa} + C_m}{C_{ei} * M_i + C_{ec} * M_c + C_{ew} * M_w + C_{ewa} * M_{wa}} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde

T - temperatura final da massa de betão, em °C;

T_i , T_c , T_w e T_{wa} – temperatura (°C) dos agregados, cimento/cinzas (ligante), água livre da mistura e água nos agregados (humidade), respectivamente;

M_i , M_c , M_w e M_{wa} – massa (kg) dos agregados, cimento/cinzas (ligante), água da livre da mistura e água livre nos agregados (humidade), respectivamente;

C_{ei} , C_{ec} , C_{ew} e C_{ewa} – calor específico (kcal/(kg*°C)) dos agregados, cimento/cinzas (ligante), água da livre da mistura e água nos agregados (humidade), respectivamente;

C_m – calor da mistura (kcal).

Dos componentes do betão, a água é o mais fácil de refrigerar. Mesmo usada em pequenas quantidades, quando comparada com os outros componentes, a água refrigerada consegue ter um efeito moderado na redução da temperatura da mistura, porque o seu calor específico é cerca de quatro a cinco vezes maior do que o do cimento ou dos agregados, o que significa que o efeito do arrefecimento da água é que tem o maior impacto relativo, por unidade de massa do betão (ACI, 2010).

Baixar a temperatura da água na ordem dos 2 a 2,2°C permite usualmente reduzir a temperatura da mistura em cerca de 0,5°C. No entanto, como a água representa uma pequena percentagem dos componentes do betão, é difícil baixar a temperatura final do betão mais do que cerca de 4,5°C, usando apenas a refrigeração da água da mistura (ACI, 2010).

Outra alternativa é, complementarmente à utilização da água refrigerada, a colocação de gelo em escamas, como parte da água livre da mistura do betão.

Quando se junta gelo como parte da água da mistura, o efeito deve ser considerado recorrendo à equação 5.1, com as modificações apresentadas na equação 5.2 (ACI, 2010):

$$T = \frac{Ti \cdot Mi \cdot Cei + Tc \cdot Mc \cdot Cec + Tw \cdot Mw + Mwa - 80 \cdot Mg + Cm}{Cei \cdot Mi + Cec \cdot Mc + Mw + Mwa + Mg} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Onde Mg representa a massa de gelo adicionada em kg e 80 o valor do calor de fusão em kcal/kg.

A equação 5.2 assume que as escamas de gelo adicionadas se encontram no seu ponto de fusão. Uma abordagem mais exacta, que incorpore a temperatura do gelo (T_g), pode ser traduzida pela equação 5.3 (ACI, 2010):

$$T = \frac{Ti \cdot Mi \cdot Cei + Tc \cdot Mc \cdot Cec + Tw \cdot Mw + Twa \cdot Mwa - Mg \cdot (80 - 0,5 \cdot T_g) + Cm}{Cei \cdot Mi + Cec \cdot Mc + Mw + Mwa + Mg} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Obviamente as quantidades de água arrefecida e gelo incorporadas não podem exceder a quantidade de água livre prevista na composição do betão. Para que se possa otimizar a estratégia de substituição da água livre por água refrigerada e escamas de gelo, é necessário minimizar as humidades dos agregados.

Ressalva-se que o tempo da mistura terá que aumentar para permitir desfazer o gelo incorporado, podendo condicionar o tempo do ciclo de amassadura (o que pode representar uma perda da ordem dos 20% no rendimento da Central de betão).

A quantidade total de gelo não deve exceder aproximadamente os 75% da quantidade total de água inicialmente prevista e a redução máxima de temperatura com recurso à incorporação de gelo está usualmente limitada a 11°C (ACI, 2010; NRMCA, 1962).

Por outro lado, a temperatura dos agregados tem um efeito pronunciado na temperatura final da mistura, pois representam 70% a 85% do total da massa do betão. Para baixar a temperatura da mistura em 0,5°C é necessário baixar entre 0,8°C e 1,1°C a temperatura dos agregados (ACI, 2010; NRMCA, 1962).

Existem alguns métodos simples e económicos para tentar controlar as temperaturas dos agregados em aplicações menos exigentes, como por exemplo colocar os agregados à sombra, mantendo o teor de humidade com recurso a aspersão de água (mas sem nunca usar água salgada). Através do denominado efeito *evaporative cooling*, a aspersão de água e a sua evaporação proporciona um efectivo processo de arrefecimento dos materiais porosos que constituem os agregados, especialmente quando a humidade relativa é baixa (GONÇALVES et al., 2014).

A aspersão tem que ser ajustada de forma a evitar excessivas variações do teor de humidade.

Aliás, em obras onde os agregados não são fabricados no local mas sim fornecidos por pedreiras locais, é comum o dono de obra exigir uma lavagem e pré-crivagem dos infra-tamanhos resultantes do

transporte. Assim, este processo permite desde logo efectuar uma redução da temperatura dos agregados antes de efectuar a respectiva ensilagem. Mas a sua eficácia depende do tempo e temperatura a que vão ficar ensilados até serem utilizados.

Naturalmente existem também formas mais sofisticadas e eficazes (embora mais dispendiosas) de arrefecer os agregados grossos (> 5mm), como são por exemplo o caso da imersão em tanques de água arrefecida ou em tapetes transportadores, bem como através da circulação de ar frio nos silos de armazenagem.

No caso particular das areias, também é possível fazer o arrefecimento através da circulação de ar frio ou por imersão em água arrefecida. No entanto, isso implica a necessidade de recorrer a mais equipamento, nomeadamente: (i) a um tambor rotativo, no caso da circulação de ar, e a um sem-fim extractor; (ii) a um grupo hidrociclone no caso de imersão em água arrefecida, situação hoje pouco utilizada devido ao difícil controlo da humidade e alteração da granulometria pretendida.

Já a temperatura do cimento tem um efeito colateral na temperatura da massa de betão fresco. A quantidade em que é utilizado é relativamente pequena face à dos agregados e o seu calor específico é baixo. Uma mudança em cerca de 5°C na temperatura do cimento corresponde geralmente a uma mudança da temperatura da massa de betão na ordem dos 0,5°C (LERCH, 1955).

Uma solução alternativa para grandes reduções da temperatura da massa de betão fresco pode passar pela utilização de azoto líquido (ACI, 2010; GADJA e SUMODJO, 2012). Este pode ser injectado directamente na misturadora da central (utilizando uma agulha especial, que injecta directamente o azoto juntamente com a água da mistura ou injectando apenas o azoto separadamente) ou na autobetoneira, conforme se pode observar na figura 5.1.



Figura 5.1 - Injecção de azoto líquido (GADJA e SUMODJO, 2012)

A adição de azoto líquido não tem, por si só, influência na quantidade de água de amassadura, contrariamente ao que acontecia com a adição de gelo.

Este método tem custos elevados; no entanto pode justificar-se a sua utilização com base em considerações de ordem prática e de eficiência global.

Cerca de 3,8228m³ de azoto líquido num metro cúbico de betão usualmente implicará uma redução da temperatura da massa de betão em 0,5°C (ACI, 2010). Um exemplo prático de dimensionamento será apresentado em 5.10.5.

Há, no entanto, que ter algum cuidado com a utilização deste processo, na medida em que o contacto directo com o azoto pode originar problemas ou fissuras nos equipamentos cuja construção não tenha sido pensada para a utilização deste tipo de arrefecimento, como é o caso típico de metais aço-carbono com mau comportamento a baixas temperaturas. Já os aços ligados e ricos em níquel ou os aços inoxidáveis austeníticos não representarão qualquer obstáculo à utilização desta metodologia.

5.4 Técnica para medição da temperatura

Hoje em dia a temperatura da mistura é controlada através de uma sonda de temperatura com sistema de infravermelhos (gama de medição dos -40°C aos 60°C), localizada no módulo das misturadoras. O controlo faz-se de acordo com o preconizado no Plano de Inspeção e Ensaios e sempre que se considere necessário fazê-lo, naturalmente com mais frequência nas épocas de temperaturas mais baixas e mais altas.

Durante todo o processo de fabrico de betão, os diversos componentes são controlados a nível de humidade e de temperatura. Os silos das areias estão dotados com sondas de humidade, permitindo controlar os níveis e mantendo o teor de humidade dentro dos limites previstos.

Os silos de cimento, por sua vez, estão munidos com uma sonda de temperatura, permitindo o controlo das temperaturas.

Já os silos de agregados são, por sistema, pintados com tinta branca altamente reflectora e, quando necessário, revestidos com espuma rígida de poliuretano com cerca de 5 cm de espessura, com o objectivo de proporcionar isolamento térmico.

Nas situações onde os agregados sejam arrefecidos por algum meio auxiliar, os tapetes de transporte após arrefecimento são também usualmente cobertos por uma estrutura metálica e isolados com a mesma espuma anteriormente referida, ou com painéis tipo *sandwich* com isolamento térmico incorporado.

Quando necessário, pode ainda considerar-se a utilização de um sistema de ar condicionado, instalado nos módulos das tolvas de armazenamento de agregados das instalações de fabrico de betão (revestidos também a painéis *sandwich*), de forma a permitir manter a temperatura baixa dos agregados no seu interior, bem como compensar eventuais aumentos de temperatura provocados ao longo de todo o processo de transporte.

5.5 Sistemas de arrefecimento de betões em massa

De uma forma geral, os sistemas de pré-arrefecimento para a construção de uma barragem e para obras que recorram a betão em massa podem ser constituídos pelos seguintes elementos (KTI, 2011):

- Central de arrefecimento de água;
- Depósito de água arrefecida;

- Central de produção de escamas de gelo;
- Depósito de escamas de gelo;
- Sistema de entrega e pesagem de escamas de gelo;
- Sistemas de arrefecimento de agregados:
 - Com recurso a tapetes transportadores – agregados grossos (Inundação);
 - Com recurso a silos de arrefecimento – agregados grossos (Inundação);
 - Sistemas de arrefecimento de agregados grossos com recurso a ar frio;
 - Sistemas de arrefecimento de areias;
 - Sistemas combinados de arrefecimento/aquecimento de agregados com recurso a ar.

5.5.1 Central de arrefecimento de água

Existem centrais com capacidade de arrefecimento de água dos 30°C - 45°C para os 5°C; estas centrais de arrefecimento são normalmente fornecidas em contentores e são do tipo apresentado na figura 5.2.



Figura 5.2 - Central de arrefecimento de água (KTI, 2011)

Existem, no entanto, outras centrais ainda mais eficientes, que permitem arrefecer água dos 30°C - 45°C para 1°C, sendo conhecidas como centrais de produção de água gelada, e igualmente fornecidas de forma contentorizada, equipadas com um sistema de acumulação de gelo ao longo de um permutador de calor de tubo ou placa.

Para necessidades diárias até 180 m³ de água arrefecida, as centrais são instaladas em contentores de 20 pés, permitindo suprir as necessidades correspondentes à produção de betão entre os 1.500 m³ e os 2.200 m³ (KTI, 2011).

Para necessidades diárias até 450 m³ de água arrefecida, ou seja, correspondente a produções de betão entre os 3.700 m³ e os 5.500 m³, as centrais são instaladas em contentores de 40 pés (KTI, 2011).

As centrais de betão estão equipadas ainda com uma bomba extra, que permite a recirculação da água arrefecida que se encontra dentro do depósito, quando este se encontra na sua capacidade máxima, permitindo assim controlar a temperatura da água armazenada.

5.5.2 Depósito de água arrefecida

Cada central de arrefecimento de água necessita que se associe um depósito de armazenamento devidamente isolado termicamente. A dimensão depende do período de paragem da central de betonagem.

Existem três possibilidades para a instalações do referido depósito de armazenamento:

- O depósito é feito em betão armado e isolado localmente; qualquer dimensão é assim possível;
- O depósito é executado em aço, instalado e isolado termicamente dentro de um contentor de 40 pés, com uma capacidade máxima de 50 m³;
- O depósito é feito em aço, instalado e isolado termicamente dentro de uma estrutura metálica (moldura), conforme figura 5.3, com capacidade máxima de aproximadamente 150m³.

Nos três casos é recomendado instalar a central de arrefecimento sobre a cobertura dos depósitos, permitindo desta forma poupar espaço de instalação e respectivos custos associados.



Figura 5.3 - Tanque de água com 150m³ (KTI, 2011)

5.5.3 Central de produção de escamas de gelo

A partir do depósito de água arrefecida, a água é distribuída parcialmente para a central de produção de betão, e para a central de produção de escamas de gelo (Fig. 5.4). Usualmente os fornecedores destes equipamentos instalam estas unidades dentro de contentores de 40 pés. Estas unidades apresentam o funcionamento esquemático constante da figura 5.5.

As capacidades de produção de escamas de gelo de cada equipamento usualmente situam-se entre as 20 e 100 toneladas diárias. Centrais modulares, combinando equipamentos de capacidades diferentes, são igualmente possíveis até perfazer produções diárias da ordem das 200 toneladas (KTI, 2011).



Figura 5.4 - Central de produção de escamas de gelo na construção da Barragem de Alqueva

As escamas de gelo são removidas do tambor não rotativo da central através de ferramentas, e deverão possuir uma espessura de cerca 1,5 mm, espessura que garante o melhor efeito de arrefecimento, associado ao menor tempo de fusão e mistura (Fig. 5.6), dentro da cuba da central de betão.

As escamas de gelo são mantidas arrefecidas à temperatura de aproximadamente -7°C , mantendo-se estaladiças, o que permite a sua armazenagem e transporte, sem que se formem blocos de gelo.

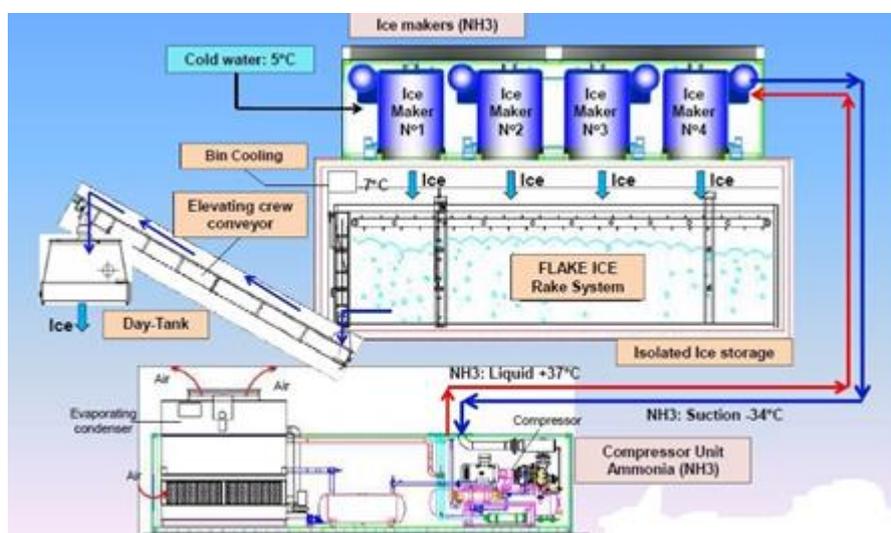


Figura 5.5 - Esquema de produção e entrega de escamas de gelo (NR KOELLING BV, 2012)

Devido à sua superfície específica, as escamas de gelo permitem otimizar o tempo de mistura dentro da cuba da central de betão, factor essencial para que a produção de betão não seja fortemente condicionada nos períodos do ano em que será necessário substituir água livre por gelo.

Em Portugal, os períodos do ano em que normalmente ocorre esta necessidade situam-se entre os meses de Abril a Setembro.



Figura 5.6 - Escamas de gelo (KTI, 2011)

5.5.4 Depósitos de escamas de gelo

O armazenamento de escamas de gelo é tão importante como a respectiva produção. Os fornecedores usualmente têm disponíveis sistemas de armazenamento modulares, com capacidades até às 90 toneladas, incluindo os respectivos sistemas de descarga automática. Os depósitos maiores são instalados dentro de estruturas metálicas (molduras). Os mais pequenos, com capacidades até às 23 toneladas, são instalados dentro de contentores metálicos. Em ambos os casos, as paredes duplas são especialmente isoladas, permitindo a circulação de ar em volta das escamas de gelo, mesmo quando o depósito está completamente cheio. O ar de circulação é mantido a uma temperatura da ordem dos 5°C negativos, o que permite manter as escamas separadas entre si, facilitando o transporte com recurso a transportadores de parafuso sem fim, ou por meios pneumáticos (KTI, 2011).

5.5.5 Sistema de entrega e pesagem de escamas de gelo

Do depósito até à central industrial de produção de betão, as escamas de gelo podem ser transportadas basicamente por dois tipos de soluções: sistema pneumático ou sistema transportador tipo parafuso sem fim.

5.5.5.1 Sistema pneumático

Este sistema é o indicado para grandes distâncias e para diversos pontos de descarga de gelo. Basicamente é constituído por um transportador tipo parafuso sem fim equipado com balança, uma comporta pneumática e um compressor (Fig. 5.7). O transportador alimenta, através da comporta, um sistema de tubagens (de 4" a 6") que, por ar comprimido, transporta as escamas de gelo à misturadora da central de betão.



Figura 5.7 - Sistema pneumático para transporte de escamas de gelo (KTI, 2011)

5.5.5.2 Sistema transportador tipo parafuso sem fim

Este sistema é mais económico para curtas distâncias ou para um máximo de dois pontos de entrega. O seu máximo comprimento não deve exceder os 18 metros (KTI, 2011). O transportador alimenta uma tremonha, equipada com células de pesagem e com comporta de descarga pneumática (Fig. 5.8).

Após pesagem, a tremonha descarrega as escamas de gelo no tapete transportador de agregados, que alimenta a central de betão, ou em alternativa descarrega directamente na misturadora da central.

Este sistema de descarga é hoje em dia o mais fiável, havendo no mercado tremonhas com capacidade entre os 250 a 1.200 kg, estudadas para evitar o entupimento durante a descarga (KTI, 2011).



Figura 5.8 – Transportador tipo parafuso e tremonha de pesagem (KTI, 2011)

5.6 Sistemas de arrefecimento de agregados

Tal como referido anteriormente, em certos casos, adicionar água fria e gelo, em substituição da água livre da mistura, é suficiente para que o betão atinga a temperatura requerida à saída da central de betão. No entanto, em determinadas circunstâncias, é necessário arrefecer os agregados, com água arrefecida.

5.6.1 Tapetes transportadores – agregados grossos (Inundação)

O processo mais rápido para arrefecer os agregados é inundá-los num tapete transportador (Fig. 5.9), com água à temperatura de 1°C a 4°C.



Figura 5.9 - Tapete transportador para arrefecimento de agregados grossos (KTI, 2011)

Dependendo do tamanho dos agregados e da respectiva temperatura de partida, períodos de inundação entre 1 e 8 minutos permitem atingir, em média, temperaturas de 5°C para agregados com $D_{máx}$ inferiores ou iguais a 75 mm. Para os grandes diâmetros, com $D_{máx}$ até 150 mm, períodos de tempo de inundação de aproximadamente 35 minutos serão necessários (KTI, 2011).

Após a inundação dos agregados, a água é encaminhada para tanques de decantação, para que se proceda à separação de areias e lamas, entrando posteriormente num sistema de recirculação de água, sofrendo novo arrefecimento e conseqüente reaproveitamento, nas operações de controlo de temperatura dos agregados.

As centrais de arrefecimento para este tipo de aplicações, em vez de utilizarem permutadores de calor de tubo, usam permutadores de placas, em que a água é espalhada em *spray* sobre as referidas placas, percorrendo-as e sendo captada numa bacia de retenção, situada debaixo da central de produção de água a 1°C – 4°C. O processo pode ser esquematicamente observado na figura 5.10.

Os tempos médios de arrefecimento usualmente permitidos por este processo, são apresentados na figura 5.11.

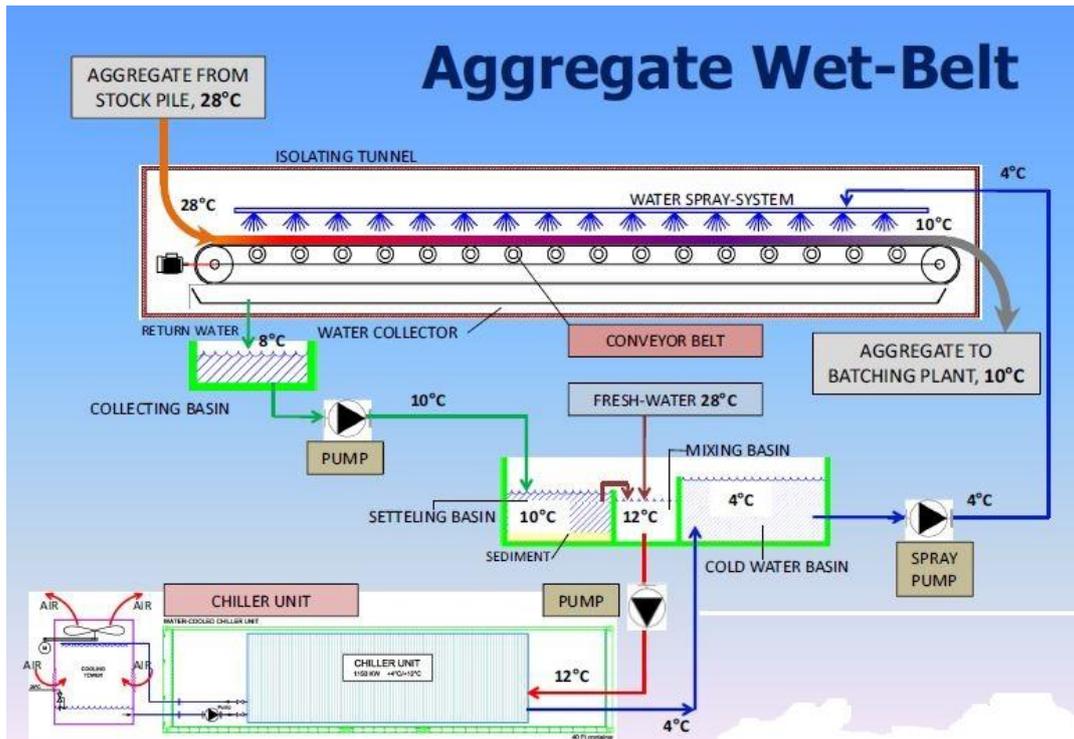


Figura 5.10 - Esquema de arrefecimento de agregados grossos – tapete transportador inundado (NR KOELLING BV, 2012)

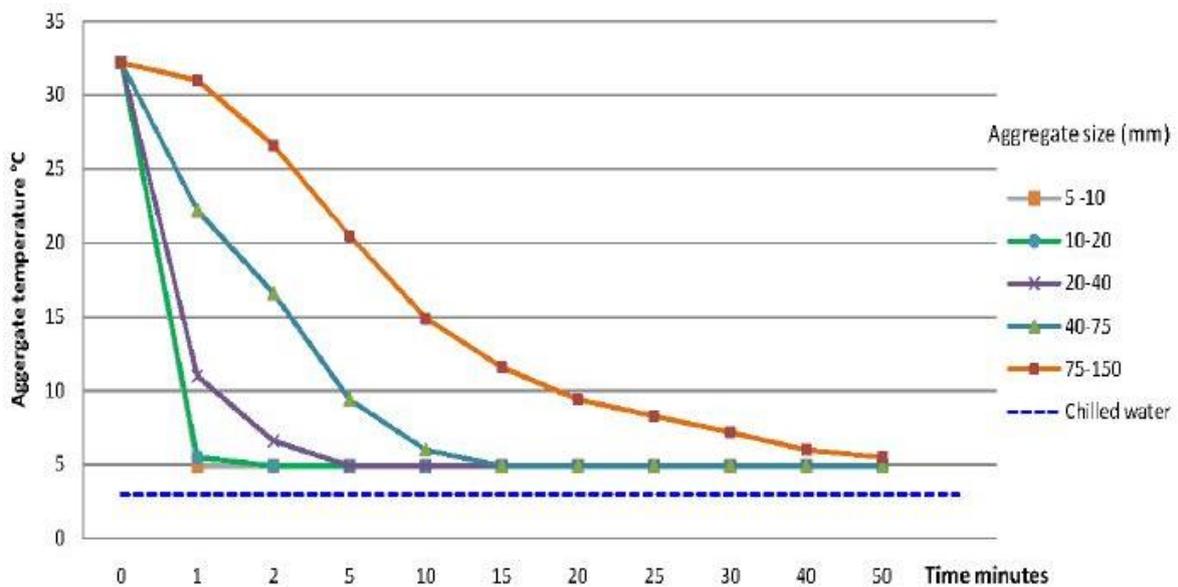


Figura 5.11 - Temperatura dos agregados, função da sua dimensão e do período de tempo de molhagem (NR KOELLING BV, 2012)

5.6.2 Silos de arrefecimento – agregados grossos (Inundação)

Em alternativa à molhagem dos agregados sobre tapetes transportadores, é possível inundá-los e consequentemente arrefece-los em silos (Fig. 5.12).

Usualmente são usados um ou dois silos por classes granulométricas, que alternadamente são inundados e drenados. A água drenada, que contém sedimentos e lamas, é re-circulada e novamente arrefecida, após a passagem nos tanques de decantação. O procedimento geral deste arrefecimento pode ser observado na figura 5.13.



Figura 5.12 - Silos de Inundação (KTI, 2011)

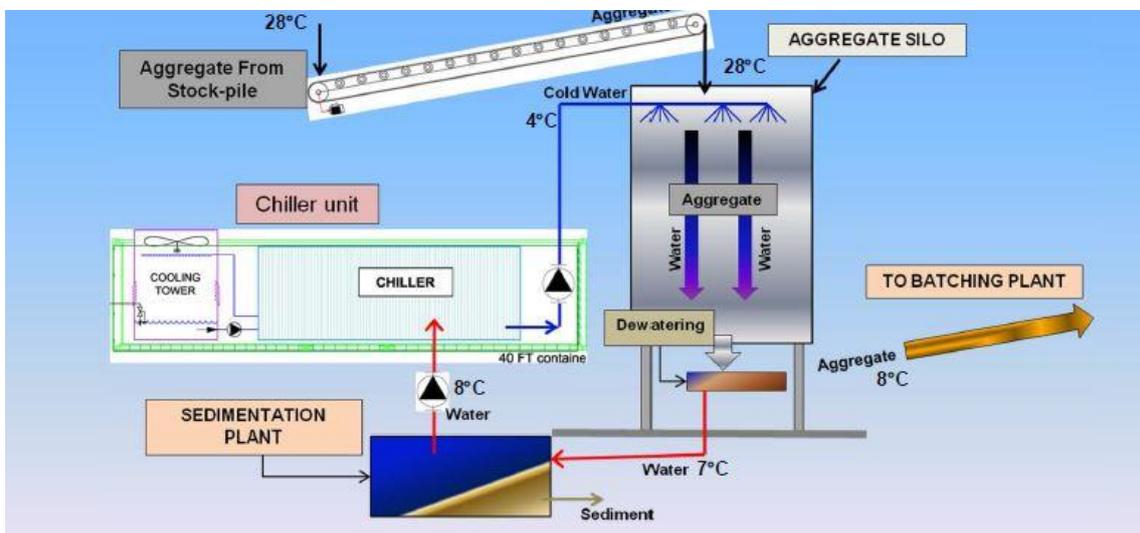


Figura 5.13 - Esquema de arrefecimento de agregados grossos – silos de inundação (NR KOELLING BV, 2012)

5.6.3 Sistemas de arrefecimento de agregados grossos com recurso a ar frio

Para arrefecer agregados com este método é necessário fazer circular grande quantidade de ar frio através dos silos de arrefecimento (Fig. 5.14). Os silos em causa têm que estar equipados com um distribuidor especial, que garanta um arrefecimento uniforme ao longo dos agregados, sendo possível atingir arrefecimentos abaixo de 0° (KTI, 2011). Os equipamentos de arrefecimento são normalmente instalados em contentores, sendo constituídos por:

- Compressor de parafuso;
- Condensador de evaporação;
- Separador de amoníaco com válvula flutuante de alta pressão;
- Bomba de amoníaco para fornecimento ao permutador de ar;
- Painel de controlo.



Figura 5.14 - Central de arrefecimento de agregados grossos – silos de arrefecimento por ar frio (KTI, 2011)

O funcionamento deste sistema pode ser traduzido nos termos constantes da figura 5.15, sendo que os tempos médios de arrefecimento associados são os constantes da figura 5.16.

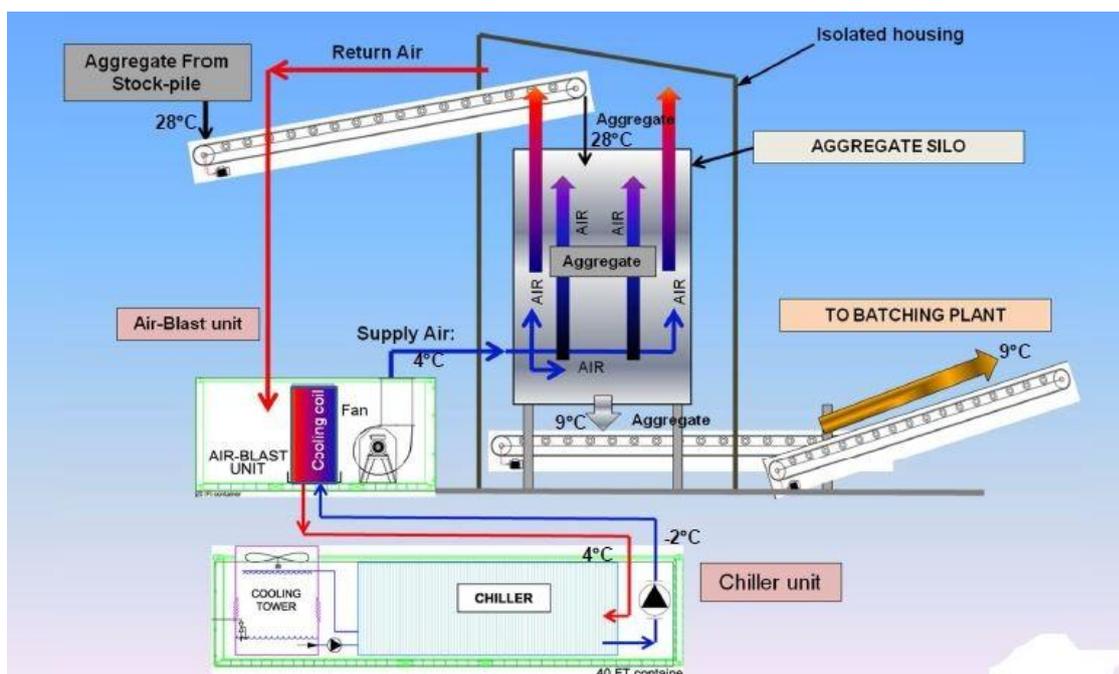


Figura 5.15 - Esquema de arrefecimento de agregados grossos – silos de arrefecimento por ar frio (NR KOELLING BV, 2012)

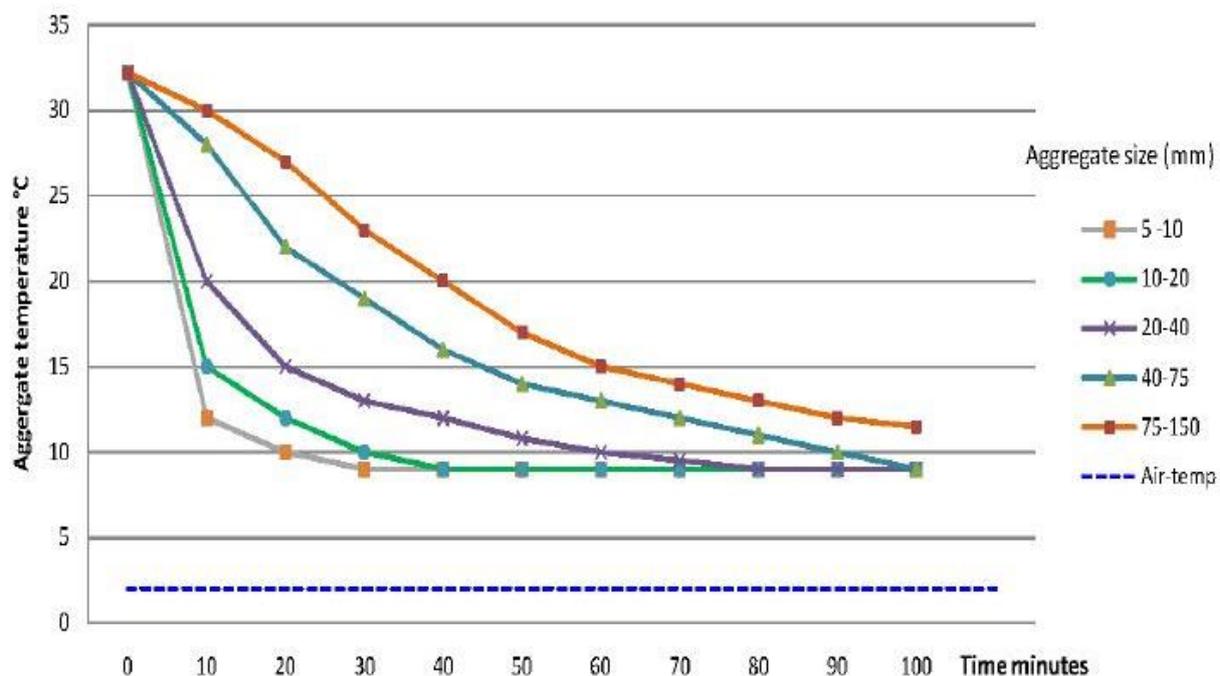


Figura 5.16 - Temperatura do agregado, função da sua dimensão e do tempo de contacto com o ar frio (NR KOELLING BV, 2012)

5.6.4 Arrefecimento de areias

Em alguns casos os requisitos de temperatura mínima do betão em massa são de tal maneira exigentes, que a única forma de os atingir é também refrigerando as areias, mesmo que se tenha utilizado água da mistura a 1°C a 4°C, escamas de gelo e refrigeração dos agregados grossos.

Esta é seguramente a forma mais dispendiosa de efectuar pré-refrigeração de betões, exigindo sofisticadas instalações, que podem equipar silos ou tambores rotativos (Fig. 5.17)

Para estes casos não existem soluções *standard*, sendo cada caso estudado especificamente com o cliente, por forma a atingirem-se os requisitos pretendidos (Fig. 5.18).

Os equipamentos de arrefecimento para areias são equivalentes aos utilizados no arrefecimento de agregados grossos.

5.6.5 Sistemas combinados arrefecimento/aquecimento de agregados com recurso a ar

Hoje em dia a construção está a tornar-se cada vez mais exigente, tanto no que se refere a requisitos de qualidade, como em termos de prazos, colocando os empreiteiros sobre uma forte pressão económica.

As mudanças climáticas estão a resultar, em muitas zonas geográficas, no aumento da probabilidade de verões extremamente quentes e também de invernos fortemente frios.



Figura 5.17 - Tambor rotativo para arrefecimento de areias (KTI, 2011)

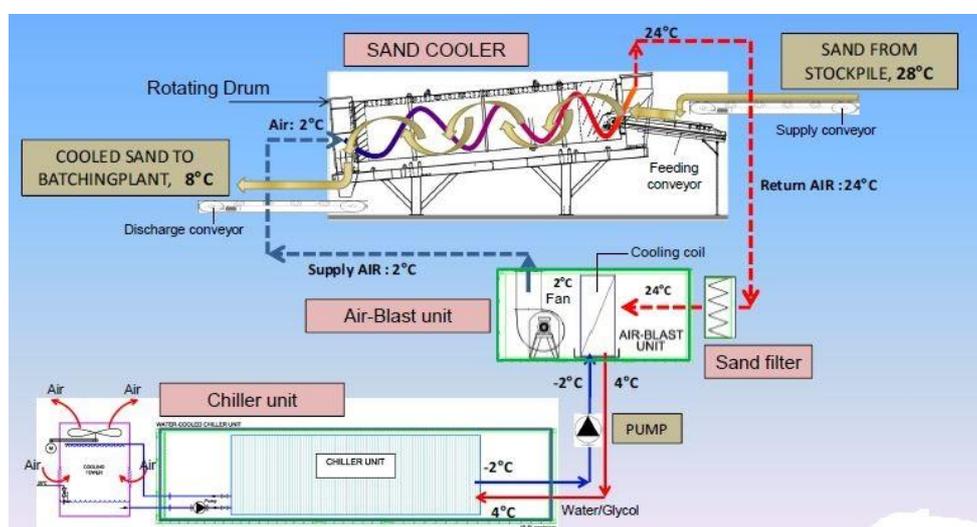


Figura 5.18 - Esquema de arrefecimento de areias – tambor rotativo com ar frio (NR KOELLING BV, 2012)

A pressão dos prazos exige que as actividades de construção tenham que ocorrer ao longo de todo o ano, mesmo em cenários de temperatura ambiente compreendidos entre os -20°C e os $+35^{\circ}\text{C}$.

Dentro deste contexto, tem surgido no mercado uma nova tendência de centrais mistas de ar insuflado (aquecimento/arrefecimento), para controlo das temperaturas dos agregados.

Por exemplo, para um cenário de temperaturas dos respectivos componentes do betão coerente com as temperaturas ambientes supra referenciadas, torna-se possível produzir betão nas seguintes condições:

- Inverno: 18°C ;
- Verão: 23°C .

Com este tipo de centrais, esquematicamente representada na figura 5.19, são possíveis produções de betão da ordem dos $50 \text{ m}^3/\text{h}$, durante uma operação diária de 10 horas, com as temperaturas dos agregados a variarem entre -10°C e $+30^{\circ}\text{C}$ (KTI, 2011).

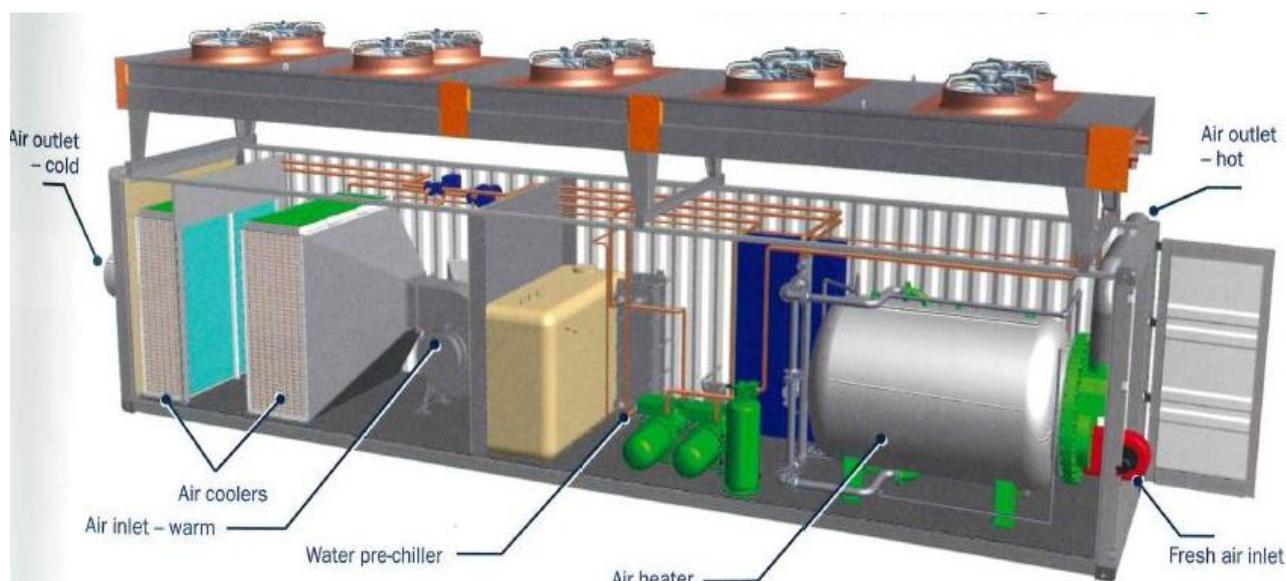


Figura 5.19 - Central combinada para arrefecimento/aquecimento de agregados (KTI, 2011)

5.7 Cenários resultantes de diferentes sistemas de pré-refrigeração

Num sistema integrado de pré-arrefecimento, podem co-existir diversos sistemas em paralelo. No caso da figura 5.20, é esquematizado em cima um sistema com: (i) arrefecimento de inertes grossos em silos de inundação; (ii) arrefecimento de areia com recurso a ar frio; (iii) escamas de gelo; (iv) arrefecimento da água livre da mistura; em baixo é esquematizado um sistema com: (i) inertes arrefecidos com recurso a ar frio; (ii) escamas de gelo; (iii) água livre da mistura.

Na tabela 5.1 apresentam-se alguns resultados sobre diferentes sistemas combinados de pré-refrigeração, com diferentes objectivos, tendo como ponto de partida um betão que, quando produzido sem qualquer arrefecimento, sai da central de betão a uma temperatura da ordem dos 37°C.

5.8 Consumo de energia eléctrica

Conforme explanado anteriormente, existem vários métodos para promover o pré-arrefecimento do betão em massa, podendo estes serem combinados entre si para que se obtenham diversas temperaturas alvo. Um dado importante a ter em conta, aquando da definição do sistema de pré-arrefecimento, é o consumo eléctrico, que pode ser sistematizado nos termos da tabela 5.2 (que deve ser analisada em conjunto com a tabela 5.1). Conclui-se da sua análise que as centrais de produção de escamas de gelo são as que mais consomem, quando comparadas com os outros métodos.

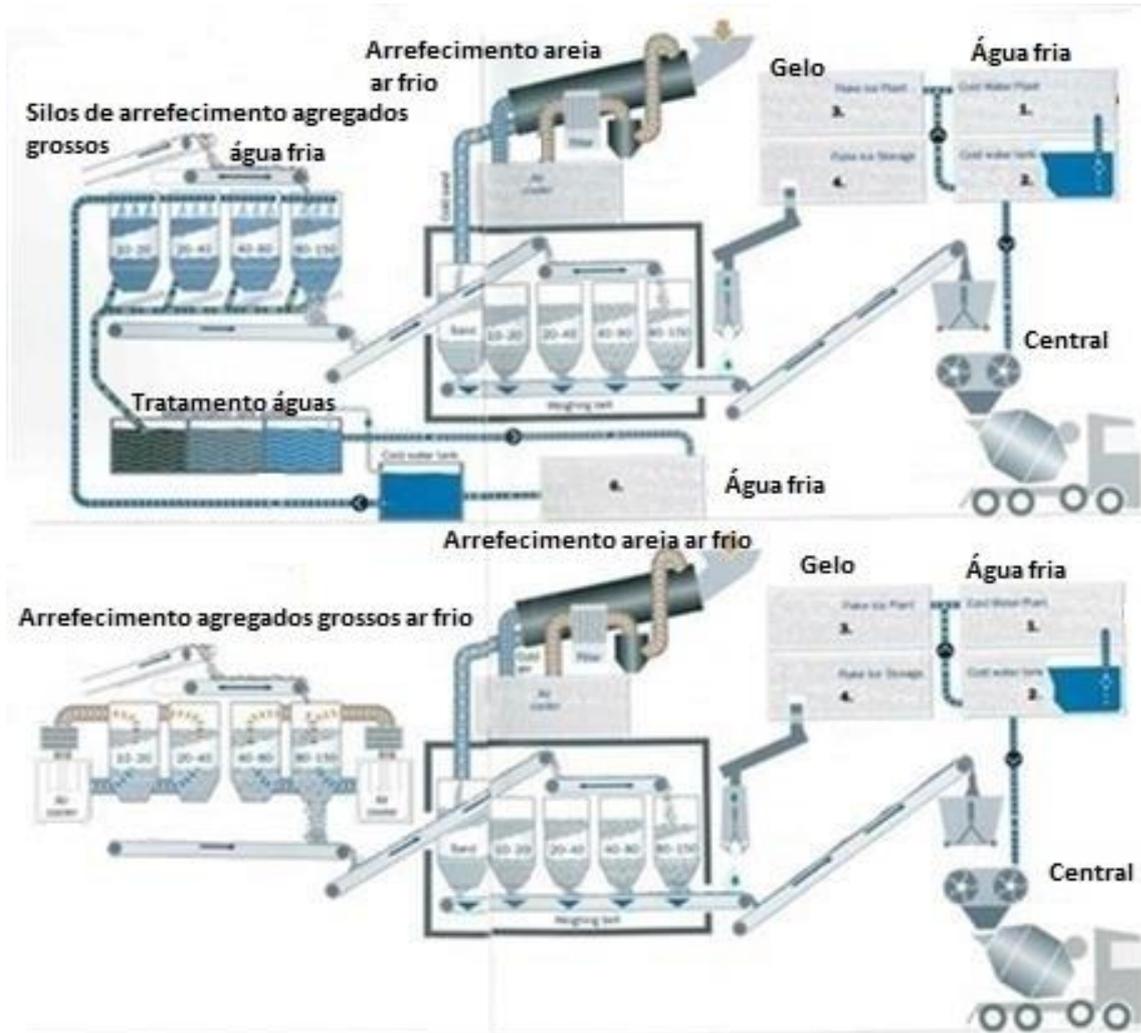


Figura 5.20 - Sistemas combinados de pré-arrefecimento (adaptado de KTI, 2011)

Tabela 5.1 – Sistemas de pré-refrigeração – temperaturas finais (NR KOELLING BV, 2012)

Cooling options	Cooling Plant combinations								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Chilled water	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flake Ice		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aggregate cooling by Water			<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
Aggregate cooling by Air				<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Sand cooling by Air					<input type="checkbox"/>				
Result output temp. Concrete (°C)	34,0	25,3	12,7	13,6	16,5	12,8	13,7	8,0	8,0

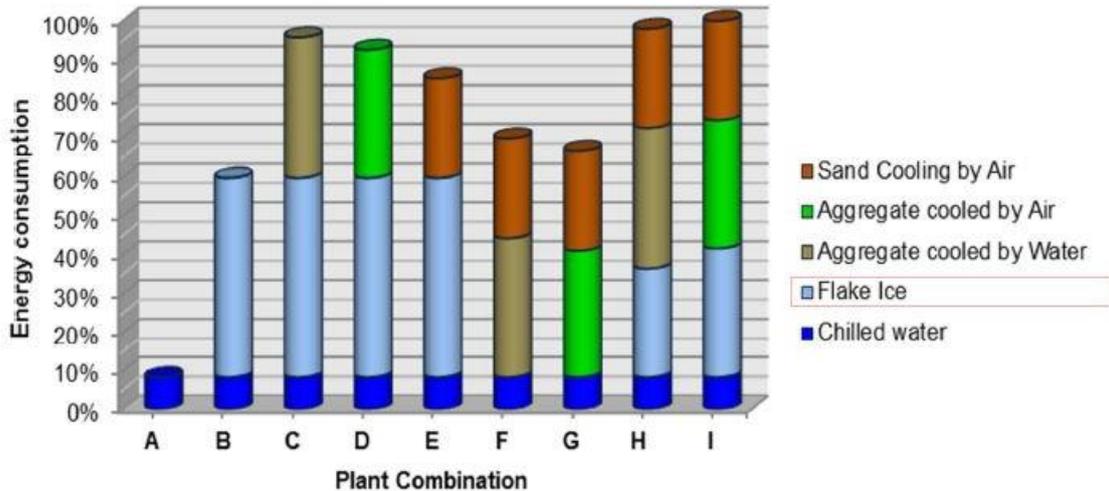


Figura 5-21 – Consumos eléctricos relativos a diversos sistemas de pré-refrigeração (NR KOELLING BV, 2102)
 Nota: A a I- Combinação de sistemas definidos na tabela 5.1

5.9 Síntese dos processos de arrefecimento de agregados

Conforme referido anteriormente, existem diversos métodos para efectuar o arrefecimento de agregados, cada um com as suas vantagens/desvantagens, que devem ser estudadas em função das características e necessidades da obra. Sintetizam-se na tabela 5.3, de forma muito simplificada, alguns dos processos de arrefecimento de agregados mais sofisticados.

Tal como a introdução de escamas de gelo na mistura tem implicações no tempo de amassadura e na consequente diminuição da capacidade de produção da central, seja qual for o método seleccionado para arrefecimento dos agregados, o tempo aqui despendido pode condicionar o processo de fabrico do betão e depende do tipo de brita (granítica, p.e.) e da sua dimensão.

5.10 Exemplo prático

Em seguida, partindo de uma composição de referência de betão em massa, analisam-se os diferentes cenários de controlo de temperatura supra referenciados, para alcançar uma temperatura alvo de colocação da ordem dos 8°C a 10°C.

5.10.1 Pressupostos e determinação da temperatura de colocação do betão sem pré-refrigeração

Considera-se um período de betonagem para efeitos de dimensionamento de 5 dias consecutivos com betonagens de 500 m³. Partindo da composição constante da tabela 5.4 e recorrendo à equação 5.1, chega-se facilmente à conclusão que a temperatura da massa de betão à saída da central será:

$$T = \frac{27 * (500 + 566 + 1110) * 0,20 + 60 * 200 * 0,20 + 23 * 61 * 1 + 27 * (20 + 8 + 11) * 1 + 674}{0,20 * (500 + 566 + 1110) + 0,20 * 200 + 61 * 1 + (20 + 8 + 11) * 1}$$

$$T = 30,0^{\circ}\text{C}$$

Tabela 5.2 - Métodos de arrefecimento de agregados – Vantagens/Desvantagens

Método	Vantagens	Desvantagens
Circulação de ar frio	<ul style="list-style-type: none"> - Solução mais económica - Ausência de consumo de recursos (água) - Dispensa a secagem dos agregados e facilita o controlo da humidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimento de arrefecimento inferior (coeficiente de convecção forçada mais reduzido)
Molhagem em tapetes	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimento de arrefecimento superior ao método por ar frio (condução + convecção forçada) 	<ul style="list-style-type: none"> - Solução com custo intermédio - Grandes reduções de temperatura obrigam a um elevado comprimento de tapetes, com baixa velocidade de circulação - Difícil implementação em estaleiros com áreas reduzidas - Elevado consumo de água - Requer a instalação de tanques de armazenamento de água refrigerada e de tanques de decantação - Requer secagem dos agregados para reduzir a humidade
Imersão em silos	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimento de arrefecimento elevado (convecção forçada) - Capacidade de arrefecimento de elevadas quantidades em tempos reduzidos 	<ul style="list-style-type: none"> - Solução mais dispendiosa - Consumo significativo de água - Requer a instalação de tanques de armazenamento de água refrigerada e de tanques de decantação - Requer secagem dos agregados para reduzir a humidade

Tabela 5.3 - Composição de referência (betão em massa)

Materiais	Massa (kg)	Temperatura (°C)	Calor Específico (kcal/(kg*°C))
Areia (*1)	500	27	0,2
Humidade	20	27	1
Brita média (*1)	566	27	0,2
Humidade	8	27	1
Brita Grossa (*1)	1110	27	1
Humidade	11	27	1
Água Livre (*2)	61	23	1
Ligante (*3)	200	60	0,2

Notas: (*1) A temperatura máxima dos agregados: 27°C;
 (*2) Temperatura média da água do rio será inferior ou igual a 18 °C;
 (*3) Temperatura do ligante: 60°C;
 (*4) Calor da mistura: 674 kcal.

5.10.2 Introdução de água refrigerada ou de escamas de gelo

Com a introdução de uma central de água refrigerada, que garanta uma temperatura de 4°C da água livre da mistura, e mais uma vez recorrendo à equação 5.1, ter-se-á:

$$T = \frac{27 * (500 + 566 + 1110) * 0,20 + 60 * 200 * 0,20 + 4 * 61 * 1 + 27 * (20 + 8 + 11) * 1 + 674}{0,20 * (500 + 566 + 1110) + 0,20 * 200 + 61 * 1 + (20 + 8 + 11) * 1}$$

$$T = 28,0^{\circ}\text{C}$$

A introdução de água refrigerada a 4°C na mistura, em substituição da água livre, permite baixar a temperatura dos 30°C para os 28,0°C, sendo este no entanto um valor ainda muito superior ao pretendido (8 a 10°C).

Tal como já foi referido anteriormente, em complemento à utilização de água refrigerada é usual substituir parte da água livre por escamas de gelo.

Com a introdução de escamas de gelo, a temperatura da mistura é estimada, recorrendo à equação 5.2 supra referenciada. Através de um processo iterativo, substitui-se gradualmente a quantidade de água livre na mistura (61 kg) por escamas de gelo, até se atingir a temperatura pretendida. É de salientar que é possível substituir até cerca de 75% da quantidade total de água (75% de 100 kg = 75 kg), ou até se esgotar a quantidade de água disponível (61 kg). Assim, neste caso, no limite seria possível substituir 61 kg de água por escamas de gelo.

Conclui-se então que, com 50 kg de escamas de gelo por m³ de betão, atinge-se uma temperatura de:

$$T = \frac{27 * (500 + 566 + 1110) * 0,20 + 60 * 200 * 0,20 + 4 * 11 * 1 + 27 * (20 + 8 + 11) * 1 - 80 * 50 + 674}{0,20 * (500 + 566 + 1110) + 0,20 * 200 + 11 * 1 + (20 + 8 + 11) * 1 + 50 * 1}$$

$$T = 20,7^{\circ}\text{C}$$

No entanto, este valor ainda continua longe do pretendido (8-10°C).

Se pretendermos ser um pouco mais rigorosos admitindo que o gelo não está no seu ponto de fusão, mas sim a -6°C, e recorrendo à equação 5.3 obter-se-á:

$$T = \frac{27 * (500 + 566 + 1110) * 0,20 + 60 * 200 * 0,20 + 4 * 11 * 1 + 27 * (20 + 8 + 11) * 1 - 50 * (80 + 0,5 * 6) + 674}{0,20 * (500 + 566 + 1110) + 0,20 * 200 + 11 * 1 + (20 + 8 + 11) * 1 + 50 * 1}$$

$$T = 20,5^{\circ}\text{C}$$

Mas o valor ainda continua longe do pretendido (8 a 10°C). Em alternativa ou em complemento à introdução de escamas de gelo, pode-se optar pelo arrefecimento de agregados.

5.10.3 Arrefecimento de agregados

Dependendo da temperatura da mistura que se pretende alcançar, opta-se por arrefecer uma ou mais granulometrias de agregados.

Neste exemplo prático, e tendo em consideração que a temperatura da mistura, com a adição de escamas de gelo, é de cerca de 20,7°C, valor muito superior ao limite imposto, é necessário proceder ao arrefecimento de todos os agregados grossos (> 5 mm).

Assim, a temperatura da massa de betão, arrefecendo as britas a 7°C, será da ordem de:

$$T = \frac{27 * 500 * 0,20 + 7 * (566 + 1110) * 0,20 + 60 * 200 * 0,20 + 4 * 11 + 27 * 20 + 7 * (8 + 11) - 80 * 50 + 674}{0,20 * (500 + 566 + 1110) + 0,20 * 200 + 11 * 1 + (20 + 8 + 11) * 1 + 50 * 1}$$

$$T = 8,4^{\circ}\text{C}$$

Este valor já se situa dentro do limite pretendido, comprovando assim o efeito pronunciado, já referido anteriormente, que a temperatura dos agregados tem na temperatura final da mistura.

Se por qualquer motivo ainda fosse necessário colocar betão a uma temperatura mais baixa, o arrefecimento das areias para valores da ordem dos 7°C, permitiria obter um betão à saída da central industrial de produção, com um valor da ordem de:

$$T = \frac{7 * 500 * 0,20 + 7 * (566 + 1110) * 0,20 + 60 * 200 * 0,20 + 4 * 11 + 7 * 20 + 7 * (8 + 11) - 80 * 50 + 674}{0,20 * (500 + 566 + 1110) + 0,20 * 200 + 11 * 1 + (20 + 8 + 11) * 1 + 50 * 1}$$

$$T = 4,2^{\circ}\text{C}$$

5.10.4 Dimensionamento dos sistemas de arrefecimento de agregados grossos em silos de inundação e produção de escamas de gelo.

Tendo em consideração o cenário apresentado em 5.10.1 (para se alcançar a temperatura pretendida do betão à saída da central), apresenta-se de seguida os dimensionamentos das instalações industriais para o caso particular do arrefecimento de agregados por inundação em silos (Fig. 5.21) e para o caso da incorporação de escamas de gelo (5.10.2).

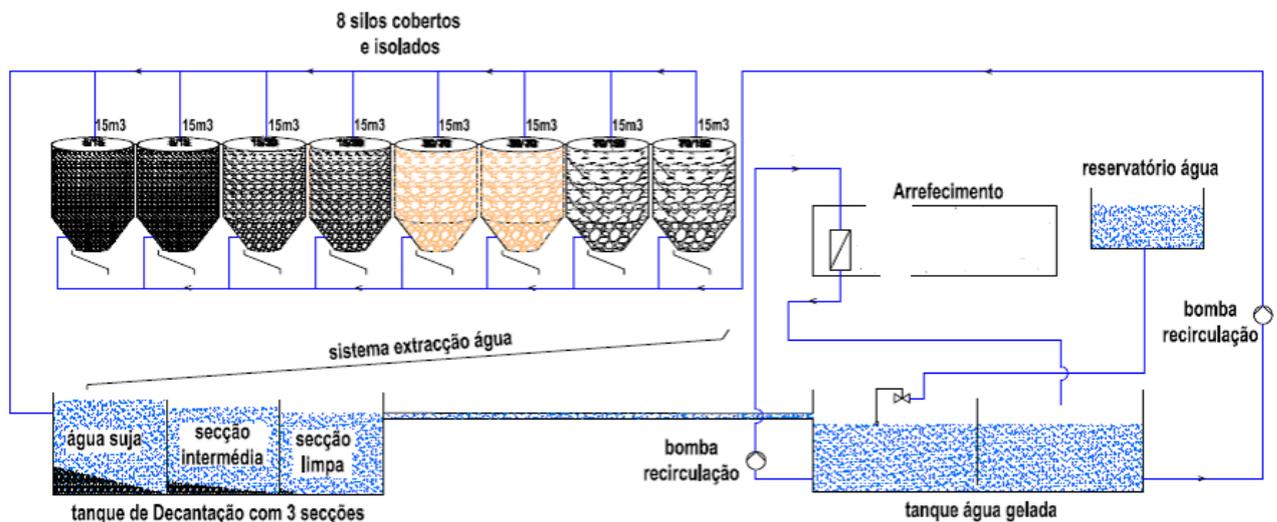


Figura 5.21 - Sistema de pré-refrigeração (agregados grossos)

Admitindo perdas no sistema (isolamento), considera-se para efeitos de cálculo que a temperatura da água de imersão é de 3°C (conservativamente) e que as britas estão a 27°C. Assim:

$$\left. \begin{aligned} \theta_o &= T_{inertes} - T_{\text{água imersão}} = 27^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C} = 24^{\circ}\text{C} \\ \theta_m &= T_{final\ inertes} - T_{\text{água imersão}} = 7^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C} = 4^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right\} \frac{\theta_m}{\theta_o} = \frac{4}{24} = 0,17$$

Recorrendo à figura 5.22 (ver em conjunto com a Fig. 4.1) obter-se-á:

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,035$$

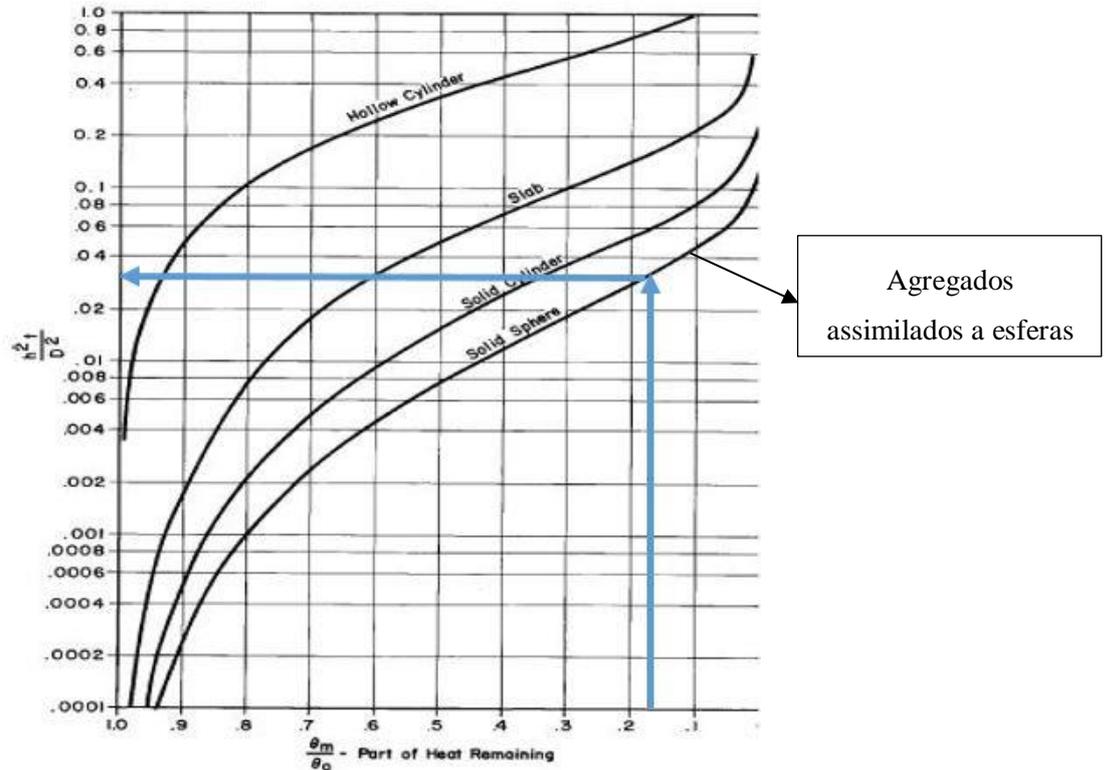


Figura 5.22 - Determinação do tempo de arrefecimento para agregados grossos função de θ_o e θ_m (adaptado de ACI, 2005a)

Continuando a considerar os mesmos pressupostos, sendo os agregados graníticos e considerando uma difusibilidade de 0,096 m²/dia (Tab. 4.1), tem-se que o tempo de arrefecimento de cada agregado é, em função da granulometria, o seguinte:

Para [70-150] mm,

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,035 \leftrightarrow t_{70-150} = \frac{0,035 * 0,150^2}{0,096} = 0,008 \text{ dias} \Leftrightarrow t_{70-150} \approx 12 \text{ min}$$

Para [30-70] mm,

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,035 \leftrightarrow t_{30-70} = \frac{0,035 * 0,070^2}{0,096} = 0,002 \text{ dias} \Leftrightarrow t_{30-70} \approx 3 \text{ min}$$

Para [15-30] mm,

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,06 \Leftrightarrow t_{15-30} = \frac{0,035 * 0,030^2}{0,096} = 0,0004 \text{ dias} \Leftrightarrow t_{15-30} \simeq 1 \text{ min}$$

Para [5-15] mm,

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,06 \Leftrightarrow t_{5-15} = \frac{0,035 * 0,015^2}{0,096} = 0,0001 \text{ dias} \Leftrightarrow t_{5-15} \simeq 0,5 \text{ min}$$

Partindo do pressuposto que os movimentos de carga e descarga demoram em média cerca de 30 minutos cada, ter-se-á os seguintes tempos de ciclo por granulometria:

Para [70-150] mm,

$$t_{ciclo [70-150]} = 30 + 12 + 30 \simeq 72 \text{ min}$$

Considerando uma eficiência do sistema de 70% tem-se que a duração efectiva do ciclo é de:

$$\frac{72 \text{ min}}{0,7} \Leftrightarrow t_{efectiva \text{ ciclo } [70-150]} \simeq 103 \text{ min}$$

Para [30-70] mm,

$$t_{ciclo [30-70]} = 30 + 3 + 30 = 63 \text{ min} \Leftrightarrow t_{efectiva \text{ ciclo } [30-70]} = \frac{63 \text{ min}}{0,7} \simeq 90 \text{ min}$$

Para [15-30] mm,

$$t_{ciclo [15-30]} = 30 + 1 + 30 = 61 \text{ min} \Leftrightarrow t_{efectiva \text{ ciclo } [15-30]} = \frac{61 \text{ min}}{0,7} \simeq 88 \text{ min}$$

Para [5-15] mm,

$$t_{ciclo [5-15]} = 30 + 0,5 + 30 = 60,5 \text{ min} \Leftrightarrow t_{efectiva \text{ ciclo } [5-15]} = \frac{60,5 \text{ min}}{0,7} \simeq 87 \text{ min}$$

Analisando assim a situação mais condicionante a nível de duração de ciclo (agregado 70-150) e partindo dos seguintes pressupostos:

Granulometria [70-150] é aproximadamente 25 % da dosagem teórica;

- 2 Reservatórios por granulometria (a utilização de apenas um reservatório, em períodos de maior necessidade de uma classe granulométrica em especial, pode interferir com os rendimentos de produção de betão);
- 1 m³ de betão da barragem leva cerca de 1.700 kg de britas médias e grossas.

Chega-se à conclusão que é necessário arrefecer, em termos de agregados, cerca de:

$$500 \text{ m}^3 * 1.700 \text{ kg} = 850.000 \text{ kg} = 850 \text{ toneladas}$$

Assumindo que se trabalha 10 horas por dia, em média, ter-se-á como necessidade o arrefecimento de 85 toneladas de agregados por hora.

Obtém-se assim a seguinte necessidade para os reservatórios do agregado 70-150:

$$25\% * 85 \text{ ton/h} \approx 21 \text{ ton/h} \Rightarrow \frac{21.000 \text{ kg}}{60 \text{ min}} = \frac{2 \text{ reservatórios} * \text{capacidade} * 1.300 \text{ kg/m}^3}{103 \text{ min}}$$

$\Rightarrow \text{capacidade} \approx 14 \text{ m}^3 \text{ por reservatório.}$

Considera-se assim necessário ter 2 reservatórios, cada um com 15 m^3 .

Embora as restantes granulometrias apresentem naturalmente necessidades de armazenamento inferiores, de forma a precaver algumas paragens relacionadas com os subprocessos de arrefecimento (fabrico de água refrigerada, transporte e secagem dos agregados, etc.) vamos considerar a utilização de 8 reservatórios iguais para todos os tipos de granulometrias.

Tendo por base o volume de arrefecimento dos agregados da ordem dos $8 * 15 \text{ m}^3 \rightarrow 120 \text{ m}^3/\text{h}$, considerando 1.300 kg/m^3 a massa volúmica das britas de granito e o facto do calor específico do granito ter o valor de $0,79 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ [W1], podemos determinar o calor que a água refrigerada tem que retirar aos agregados, para os arrefecer de 27°C até 7°C :

$$Q = 120 \text{ m}^3 * 1.300 \text{ kg/m}^3 * 0,79 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C}) * (27^\circ\text{C} - 7^\circ\text{C}) = 2.464.800 \text{ kJ}$$

Obtem-se assim um total de $2.464.800 \text{ kJ}$, ou seja, uma potência térmica dada por $2.464.800 \text{ kJ}/3600 \text{ s} = 685 \text{ kW}_{\text{Térmicos}}$.

Assumindo um *Chiller* com um COP (coeficiente de performance) da ordem de 3 (típico em equipamentos frigoríficos (KTI, 2013)), chegamos a uma potência eléctrica dada sensivelmente por $685 \text{ kW}_{\text{Térmicos}}/3 = 229 \text{ kW}_{\text{Eléctricos}}$.

Desta forma, admitindo que a água ao entrar no *chiller* e após o arrefecimento dos agregados é sujeita a um salto térmico de 5°C e que o calor específico da água tem o valor de $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ [W2], a massa de água necessária para efectuar a troca de calor acima determinada, em cada hora, é dada por:

$$m_{\text{Água}} = \frac{2.464.800 \text{ kJ}}{4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C}) * 5^\circ\text{C}} = 117.933 \text{ kg/h} \approx 118 \text{ m}^3/\text{h}$$

Considerando uma eficiência do sistema de 80% tem-se uma necessidade efectiva de água de:

$$m_{\text{Água, efectiva}} = \frac{118 \text{ m}^3/\text{h}}{0,80} = 147,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Assim, e tendo em consideração o cenário condicionante supra referenciado, em anexo às Instalações de Fabrico de Betão será montada uma Instalação de Arrefecimento de Agregados, constituída por:

- 8 Silo com capacidade para $15 \text{ m}^3/\text{cada}$, isolados termicamente, com sistema individual de captação/exacção de água, e sistema individual pós-crivagem e secagem de agregados;
- Uma unidade para arrefecimento de água com capacidade para arrefecer $155 \text{ m}^3/\text{h}$ ($3.720 \text{ m}^3/\text{dia}$) de água em cerca de 5°C , com uma potência instalada de 275 kW , associada a 1 reservatório (pulmão) com capacidade aproximada de 350 m^3 e termicamente isolado;

- Um tanque de decantação termicamente isolado para separar os sedimentos provenientes do arrefecimento dos agregados sob imersão e efectuar reaproveitamento da água da refrigeração;
- Duas bombas para recirculação de água com capacidade para bombear cerca de 140 m³/h.

Em relação à Central de Produção de Escamas de Gelo, dimensionada para uma produção máxima diária de 500 m³ de betão (10h de trabalho), chegamos a uma necessidade horária de gelo de:

$$50 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ betão} * 50 \text{ kg escamas gelo} = 2.500 \text{ kg escamas de gelo/h}$$

O que se traduz para uma semana crítica de produção, numa necessidade média dada por:

$$5 \text{ dias} * 500 \text{ m}^3 * 50 \text{ kg escamas gelo} = 125.000 \text{ kg escamas de gelo/semana}$$

Ou seja, considerando as necessidades supracitadas, preconiza-se a utilização de uma central de produção de 23 ton/dia (958 kg/h), associada a um reservatório da ordem das 25 ton, cujo funcionamento horário durante a semana de trabalho é dado pelo ciclo que se apresenta na figura 5.23 (Produção escamas de gelo → 24h/dia; Produção de betão → 10h dia).

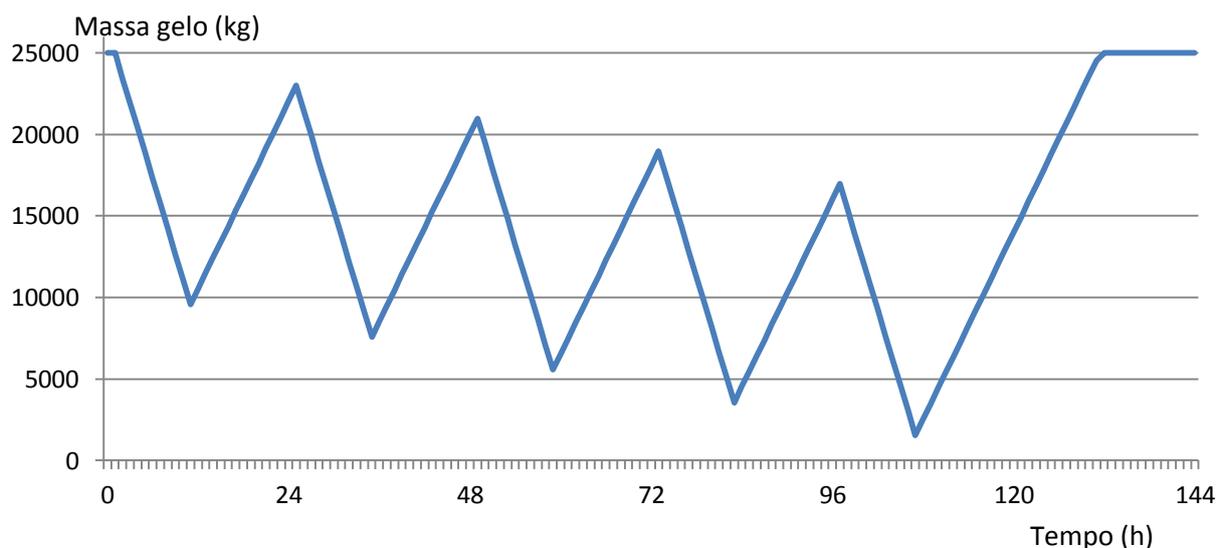


Figura 5.23 - Disponibilidade de gelo no reservatório de armazenamento (kg) ao longo de uma semana de trabalho

Tendo em consideração o cenário supra referenciado, anexo às Instalações de Fabrico de Betão, será montada uma Instalação de Fabrico de Gelo em Escamas e de Água Refrigerada, constituída por:

- Um contentor, com uma unidade para fabrico de gelo, com capacidade para produzir 23 ton de gelo em escamas por dia, com uma potência instalada de 61 kW;
- Um contentor para armazenamento de cerca de 25 ton de gelo em escamas, isolados internamente com painéis de poliuretano;
- Sem-fins para alimentação das balanças de pesagem e abastecimento das Instalações Principais e Auxiliares de Fabrico de Betão, com capacidade individual de 40 ton/h e uma potência instalada de 11 kW, cada;

- Uma unidade para arrefecimento de água com capacidade para arrefecer 86 m³/dia de água a 4°C, com uma potência instalada de 44,6kW, associada a 1 reservatório com capacidade para 58 m³, devidamente isolado.

A unidade de arrefecimento de água é instalada junto à produção de gelo e fornece água para as máquinas de produção de gelo, assim como para as Instalações de Fabrico de Betão.

5.10.5 Injecção de azoto líquido

Tal como já foi referido anteriormente, a injecção de azoto líquido no betão é um método eficaz para a redução da temperatura do betão.

A quantidade de azoto líquido necessário varia de acordo com as proporções dos componentes da mistura, e a quantidade de redução de temperatura necessária. Normalmente, o uso de cerca 10 kg de azoto por m³ de betão permite reduzir a temperatura de betão em cerca de 1°C (3,8228 (m³/0,5m³)*2*1,165kg/m³≈10kg/°C), considerando para massa volúmica 1,165 kg/m³ [W3].

Neste exemplo prático, e para atingir temperaturas na ordem dos 8 -10°C, e tendo em consideração que a temperatura inicial da mistura é de 30,2°C, seriam necessários cerca de 212 kg (≈180 m³) de azoto líquido.

6 PÓS-REFRIGERAÇÃO

6.1 Enquadramento

A pós-refrigeração de uma massa de betão, ou seja, o controlo da subida da temperatura no seio dessa massa, corresponde a um arrefecimento artificial que se efectiva pela circulação de um líquido, refrigerado ou não, usualmente água, através de uma rede de tubos deixados aquando da betonagem (ACI, 2005a; ACI, 2005b).

Dependendo do diâmetro da rede de tubos, volume, regime e temperatura do fluído circulante, pode conseguir-se remover uma quantidade significativa de calor de hidratação do ligante, reduzindo de alguma forma a temperatura máxima atingida (ACI, 2005b). No entanto, e embora este efeito da diminuição da temperatura máxima atingida não seja muito significativo, dado que a taxa a que se produz o calor é muito superior à taxa com que este pode ser retirado pela refrigeração artificial (SILVEIRA, 1961), este sistema diminui, de facto, o tempo necessário para que se atinja uma determinada temperatura alvo.

Estas quantidades de calor, retiradas de forma artificial e rápida, são acompanhadas naturalmente por retracções da massa de betão. Estas retracções ocorrem em idades muito jovens do betão, situação muito favorável uma vez que nessas idades o betão possui um módulo de elasticidade relativamente baixo, o que permite acomodar maiores extensões, sem que se ultrapasse a respectiva resistência à tracção. Nestes períodos iniciais após a betonagem, o arrefecimento artificial deve manter-se mesmo depois de atingido o pico máximo de temperatura, até que uma das seguintes condições ocorra (ACI, 2005b):

- A taxa de arrefecimento do betão (sem fissuração) atinja valores da ordem dos 0,6°C a 1°C por dia;
- A temperatura do betão desça na ordem dos 17°C, em relação ao pico máximo de temperatura;
- A temperatura do betão seja arrefecida até à sua temperatura estável final ou até um valor intermédio, preconizado pelo projectista.

Este período inicial de pós refrigeração pode durar entre alguns dias, até cerca de um mês. Após a paragem desta fase de refrigeração, poderá existir um aumento significativo de temperatura, o que exigirá novos períodos de refrigeração.

A experiência que o autor desta dissertação adquiriu ao longo da sua vida profissional, nomeadamente no que concerne à construção de grandes barragens com sistemas de arrefecimento artificial, pode ser sistematizada nos seguintes termos:

Numa primeira fase, usualmente entre o 4º e o 20º dia após a betonagem de um bloco, procede-se à circulação com água do rio, de modo a limitar/controlar a elevação da temperatura do betão (1ª refrigeração). Mais tarde e antes de terminar as betonagens da barragem, realiza-se uma 2ª refrigeração

de forma faseada, inicialmente com água do rio a que se segue água refrigerada a 4°C-5°C, para que se obtenha um arrefecimento progressivo e se atinja o valor final pretendido (período T4 nos termos da Fig. 6.1).

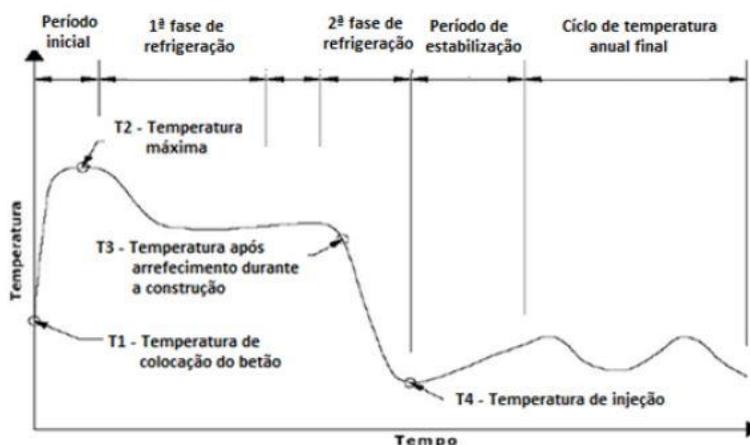


Figura 6.1 - Evolução térmica durante a construção de uma barragem de betão com pós-refrigeração (adaptado de U.S. ARMY CORP of ENGINEERS, 1994)

Face ao apresentado, pode afirmar-se que o principal objectivo da pós-refrigeração está associado à injeção das juntas de contracção entre blocos. Ao arrefecer em tempo oportuno os blocos de betonagem (temperatura alvo da ordem dos 10°C), provoca-se a abertura das juntas, que por sua vez vai permitir a sua colmatação eficaz, criando-se uma estrutura monolítica na barragem.

As operações de injeção podem ser projectadas de forma a permitir uma ou duas operações (quando a abertura da junta é próxima do seu máximo), ou várias operações, quando a colmatação da junta ocorre antes da sua abertura máxima ter ocorrido, ou seja, quando não foram previstas, em termos de projecto, operações de pós-refrigeração (Fig. 6.2). O controlo desta problemática é essencial em barragens com duplo arco de curvatura, em que se exige uma continuidade estrutural, para que se atinja o comportamento pretendido. Mesmo nas barragens gravíticas onde, em princípio, a injeção das juntas não seria necessária devido à não existência de tensões transversais, tem-se optado ultimamente por injectar, devido ao aparecimento de fissuração paralela às juntas de contracção (ACI, 2005a).

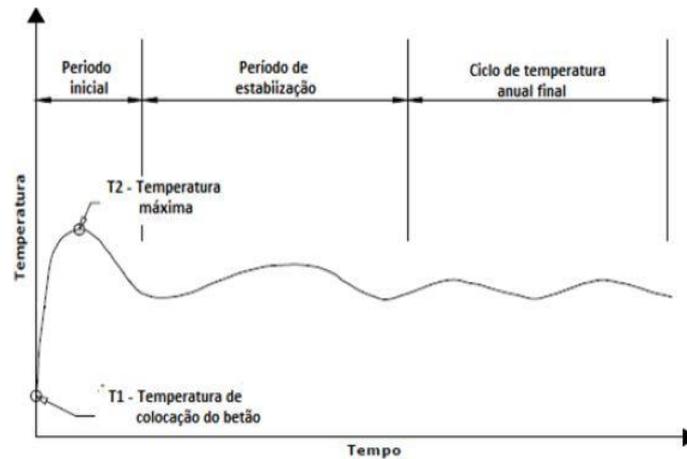


Figura 6.2 - Evolução térmica durante a construção de uma barragem de betão sem pós-refrigeração (adaptado de U.S. ARMY CORPS of ENGINEERS, 1994)

6.2 Definição geral de um sistema de refrigeração artificial de uma barragem

Em termos gerais, quando uma barragem exige a implementação de um sistema de pós refrigeração, ele é constituído por (Fig. 6.3):

- Central de refrigeração, circulação e bombagem de água, usualmente uma em cada uma das margens do rio;
- Instalação de bombagem de água do rio e reservatórios;
- Rede de condutas principais exteriores, colunas montante embebidas, condutas de distribuição nas galerias e distribuidores para os grupos de serpentinas, incluindo válvulas, torneiras, inversores e demais acessórios;
- Rede de serpentinas e chaminés interiores embebidas no betão da barragem;
- Instrumentação para monitorização de caudais e temperaturas da água de circulação.

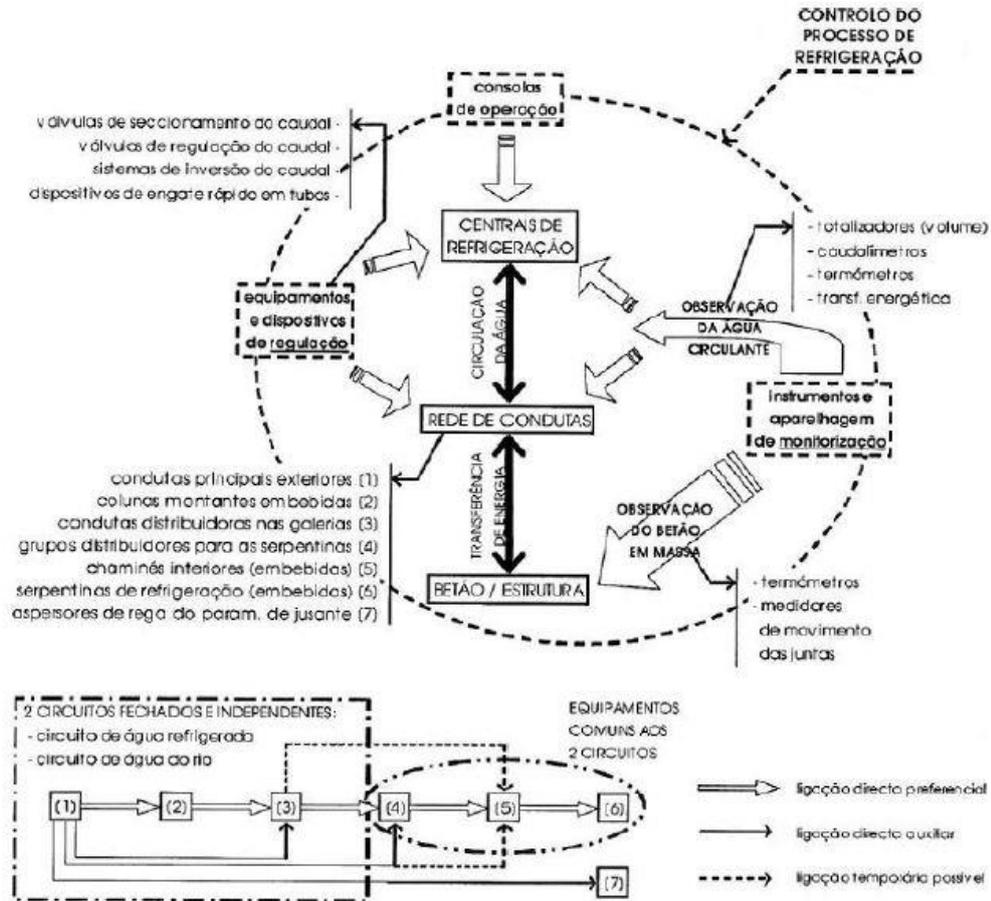


Figura 6.3 - Definição da pós-refrigeração de betões em barragens de betão (EDP, 2010)

O princípio de funcionamento do sistema consiste em dois circuitos independentes (Fig. 6.4), um de água do rio e outro de água refrigerada. A água do rio é captada na ensecadeira de montante e encaminhada para um reservatório. A partir deste, entra na rede efectuando uma primeira refrigeração e no retorno é lançada directamente na ensecadeira de jusante, ou seja no rio, porque a temperatura prevista de saída torna o reaproveitamento desta água desinteressante.

Para a água refrigerada o princípio é semelhante, sendo no entanto reutilizada a água de retorno se a temperatura desta não for superior à água do rio.

A água do rio armazenada no reservatório serve também para compensar fugas/perdas no circuito de água refrigerada ou, eventualmente, se a temperatura da água fria de retorno for superior à temperatura da água do rio, para entrar no circuito para alimentação das centrais de refrigeração.

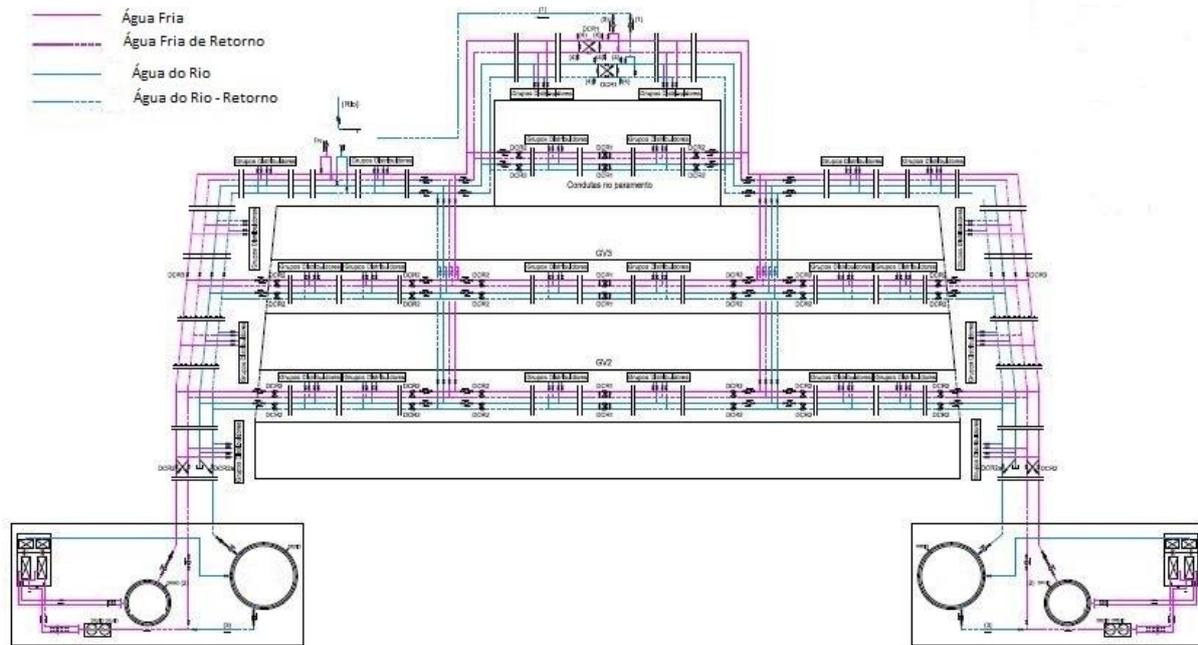


Figura 6.4 - Layout geral de um sistema tipo pós-refrigeração com recurso a duas centrais de refrigeração

6.3 Equipamentos

6.3.1 Centrais de refrigeração, depósitos, circulação e bombagem.

Com base nas necessidades frigoríficas estimadas no projecto - que se conseguem definir tendo presente o número de serpentinas simultaneamente em operação, a temperatura da água de refrigeração, o período disponível para estas operações e a temperatura alvo pretendida - define-se a potência útil máxima de arrefecimento forçado necessário à refrigeração da água.

As potências térmicas das centrais de refrigeração devem ter em conta que as perdas térmicas nas condutas podem ser superiores às estimadas, sendo portanto prudente incrementar cerca de 10% a potência de dimensionamento. É igualmente essencial considerar no dimensionamento da quantidade e da capacidade das máquinas frigoríficas e instalações acessórias, uma reserva de pelo menos 25% para avarias e manutenção (EDP, 2010).

Usualmente, as temperaturas da água refrigerada para operações de pós-refrigeração costumam situar-se no intervalo compreendido entre os 3°C e os 5°C. Quando for necessário realizar refrigerações com temperaturas inferiores, por exemplo com água a 1°C, o fluido será constituído por uma mistura de 70% de água arrefecida, e 30% de um agente anti congelação (ACI, 2005b).

Uma central de refrigeração (Fig. 6.5 e Fig. 6.6) é basicamente composta por um reservatório de água do rio, um reservatório de água refrigerada e as máquinas frigoríficas com um reservatório para a água de retorno.

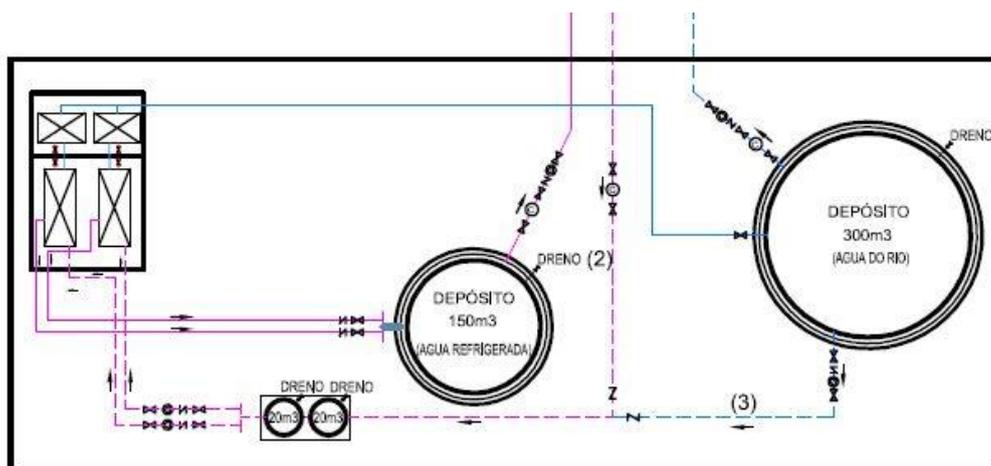


Figura 6.5 - Exemplo de uma central para operações de pós-refrigeração de uma barragem

Para a determinação dos volumes de reserva de água do rio e de água refrigerada são tidos usualmente como critérios base, a interrupção do funcionamento dos equipamentos de bombagem e refrigeração durante 3 horas, ou para servir de volante durante 12 horas, caso o rendimento das máquinas frigoríficas baixe 25%.

Os reservatórios de água refrigerada (Fig. 6.7) devem ser convenientemente isolados em termos térmicos.

As necessidades de bombagem podem ser determinadas a partir do número de serpentinas que funcionam em simultâneo e que podem ser obtidas com base no faseamento construtivo da obra.

O caudal típico que deve circular em cada serpentina deve estar compreendido entre os 15 e os 17 litros por minuto, os quais garantem, para os diâmetros das tubagens das serpentinas (25 mm), velocidades superiores às necessárias para que a circulação de água ocorra em regime turbulento (ACI, 2005b).

A circulação de água, em regime turbulento dentro da tubagem (serpentina), aumenta a taxa de transferência de energia entre as partículas do fluido, permitindo deste modo aumentar a taxa de fluxo de calor por convecção (ACI, 2005b).

É de salientar que a captação de água em cursos de rios exige cuidados de filtragem, para que os sedimentos em suspensão não provoquem obturações em curvas, reduções, válvulas de controlo, picagens e outros pontos singulares da rede.



Figura 6.6 - Central de pós-refrigeração (margem direita, Barragem de Alqueva)

Todos estes sistemas de circulação de água devem ser projectados por forma a serem reversíveis, ou seja, pelo menos uma vez por dia a entrada e saída da água de cada serpentina deve ser trocada. Esta situação pode ser atingida de formas diferentes, mais ou menos sofisticadas, automaticamente ou manualmente, junto às centrais de bombagem, junto de cada grupo de serpentinas, ou individualmente para cada serpentina.

As instalações de bombagem (quer no rio, para abastecimento de água às centrais ou directamente nas condutas principais, quer nas centrais de refrigeração para circulação da água refrigerada) terão que ser dimensionadas por forma a permitir a circulação dos caudais já referidos, garantindo igualmente a potência necessária, para ter em conta as perdas de carga ao longo de toda a rede. É usual dimensionar as referidas bombas com uma reserva de pelo menos 25% (EDP, 2010), para ter em conta as avarias e a manutenção.



Figura 6.7 - Depósitos de água associados a uma central de pós-refrigeração

As centrais de refrigeração e bombagem, para que se possa agilizar todo o processo de controlo, devem ser equipadas com um sistema automático de medição e registo contínuo, em suporte informático, de todas as variáveis que caracterizam em cada instante o respectivo funcionamento.

Por vezes devido à diferença de cota (Fig. 6.8) entre as centrais e o fundo do rio, e de maneira a manter a pressão nominal da tubagem nos 16 bar (a normalmente exigida nos cadernos de encargos (EDP, 2010)), torna-se necessária a introdução de uma câmara de perda de carga (CPC). O abastecimento de água a esta câmara é normalmente efectuado por gravidade,

A jusante da CPC é frequente prever a introdução de um grupo de bombagem, que permite introduzir a pressão necessária para que a água percorra o circuito mais desfavorável: da CPC ao ponto mais alto e mais distante, voltando ao ponto inicial e passando pelo fundo da barragem. No retorno é também necessária a introdução de um grupo de bombagem para elevar a água até às centrais. O tipo e a potência dos grupos de bombagem são determinados em função do caudal máximo instantâneo de circulação, nos termos anteriormente descritos.

Se o problema do excesso de pressão nas condutas apenas se verificar a partir de determinada cota, pode introduzir-se uma derivação a montante da CPC para, quando for possível, efectuar a refrigeração por gravidade. Entre o reservatório e a derivação terá que ser introduzida uma válvula reguladora de caudal.

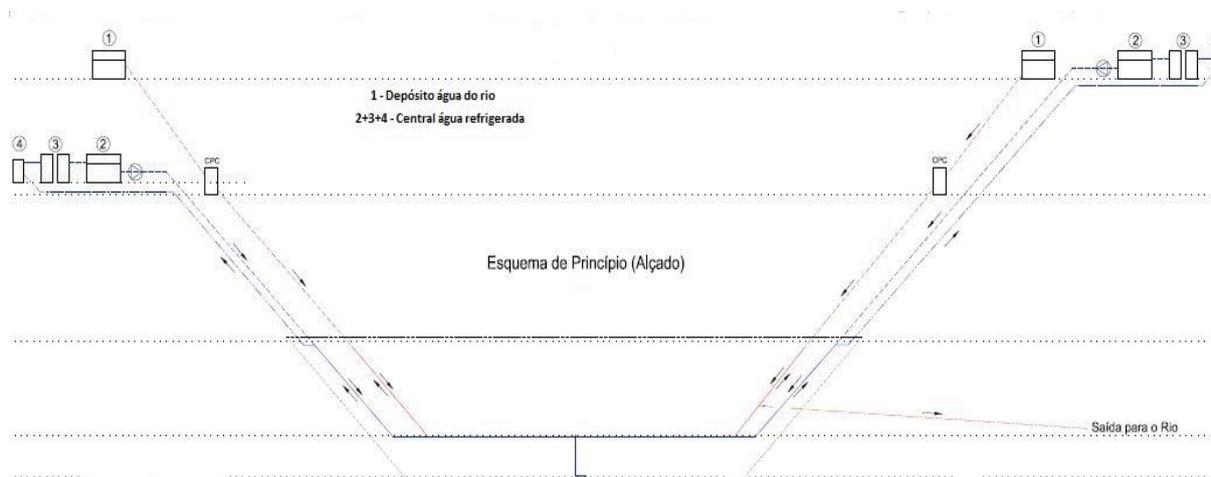


Figura 6.8 - Esquema de princípio de um sistema de pós-refrigeração

6.3.2 Rede de Condutas

As condutas, tubagens, componentes e acessórios têm que ser resistentes a uma determinada pressão nominal interior, que frequentemente neste tipo de trabalhos costuma ser na ordem de 16 bar (EDP, 2010). As ligações e juntas são executadas de forma a garantir a estanqueidade do sistema, situação que é confirmada mantendo o circuito a uma pressão 1,5 vezes superior à pressão de serviço, durante um período de 24 horas (quer após a montagem de qualquer parte do sistema, quer no caso de existirem betonagens envolventes), durante a colocação da primeira camada de 0,5 m de betão.

As condutas de distribuição, horizontais e verticais, assim como quaisquer outras condutas do circuito de refrigeração dos betões expostas à radiação solar, devem ser devidamente isoladas. O isolamento térmico mais usual costuma ser em poliestireno expandido, da classe EPS60 ou superior (CEN, 2012), sendo que a espessura mínima recomendada é 20 mm (EDP, 2010).

A localização em planta das colunas montantes e das chaminés interiores de condução dos ramais verticais de ligação às serpentinas deverá ser estabelecida por forma a minimizar a sobreposição das zonas de influência de perturbação térmica provocada por cada uma delas. O respectivo *layout* deve ter ainda em conta, a posição relativa dos próprios ramos das serpentinas e outros possíveis obstáculos, tais como furos/sondas térmicas, poços e furos para fios-de-prumo, etc.. Na execução das cofragens de galerias e paramentos dos blocos terão que ser previstos furos para a passagem dos tubos dos ramais provenientes das chaminés interiores, das tubagens de ligação das condutas principais e distribuidoras às colunas montantes e também para os dispositivos de amarração/fixação das condutas de distribuição aos hasteais das galerias. Nos pontos de cota mais elevada dos circuitos, em que se incluem pontos intermédios de inflexão das tubagens e condutas, têm-se que instalar dispositivos de purga para retirada de ar. Um exemplo desta situação surge nas juntas de betonagem que intersectam as galerias, em que os ramos das serpentinas têm que contornar o tecto da galeria.

6.3.2.1 Condutas principais exteriores

Estas condutas, usualmente em ferro galvanizado (Tab. 6.1), são dispostas no exterior ao longo das encostas, a jusante da barragem e de um encontro ao outro desta, fazendo a ligação às centrais de refrigeração e circulação, e às instalações de bombagem de água do rio e respectivos reservatórios. Ao longo do seu traçado, que deverá sempre que possível acompanhar o soco de jusante da barragem, as condutas principais são dispostas em 2 pares, lado a lado, correspondendo cada par, adução e retorno, a um circuito independente de refrigeração, ou seja, à água refrigerada e à água do rio (Fig. 6.9, Fig.6.10 e Fig. 6.11).

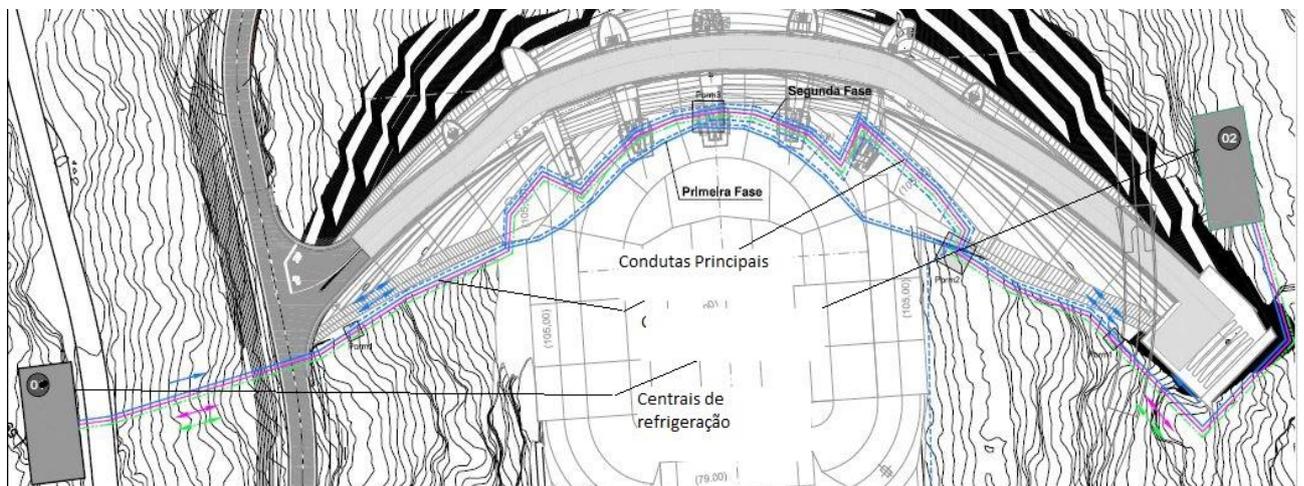


Figura 6.9 - Layout de um sistema de condutas principais exteriores

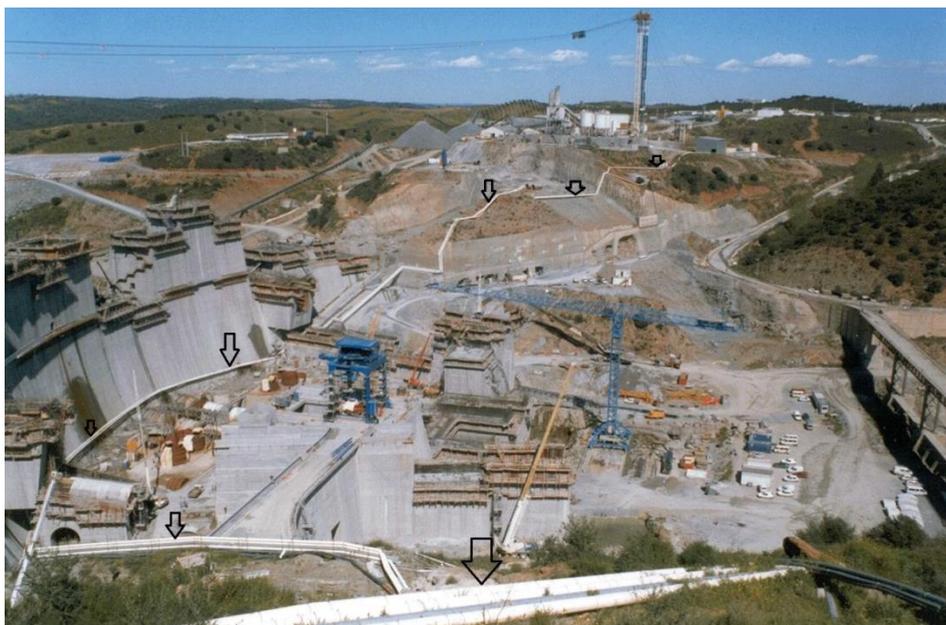


Figura 6.10 - Sistema de condutas principais exteriores, barragem de Alqueva

Nas zonas inferiores de cada bloco, os distribuidores para as de serpentinas são alimentados a partir do paramento de jusante, sendo ligados directamente às condutas principais (Fig. 6.15), através de picagens (*tie-in*), munidas de grupos distribuídos (Fig. 6.19).

Tabela 6.1 - Características das condutas principais exteriores (EDP, 2010)

Material	Ferro Galvanizado
Diâmetro Nominal	8"
Resistência Interior	16 bar
Isolamento Térmico	20 mm poliestireno expandido ou equivalente

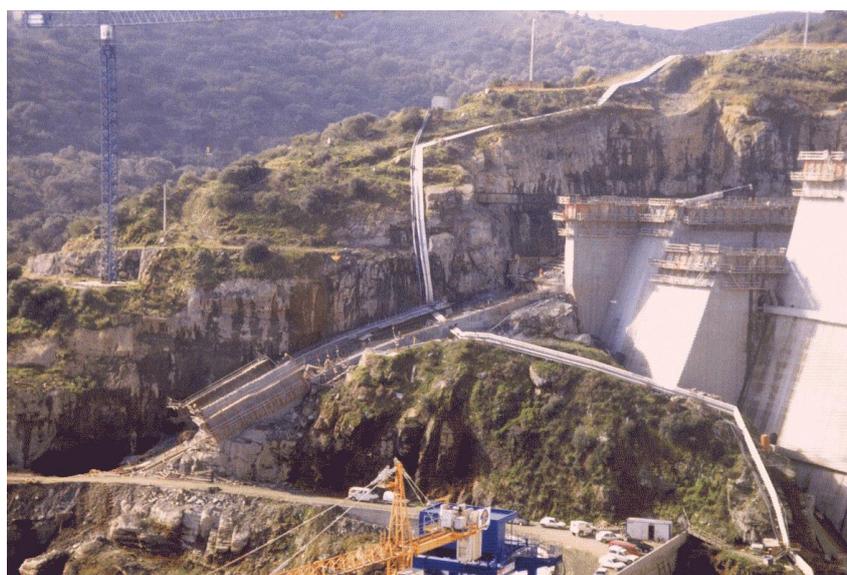


Figura 6.11 - Descida de encosta das condutas principais exteriores, barragem de Alqueva

6.3.2.2 Colunas montantes embebidas

A partir das condutas principais derivam condutas em ferro galvanizado, usualmente com diâmetro nominal 6'' (Tab. 6.2), materializadas em duas colunas verticais, localizadas em dois blocos, que são normalmente betonados em avanço. As colunas ficam embebidas no betão do bloco, dentro de uma manilha de betão, que por sua vez é preenchido com poliestireno expandido (Fig. 6.12). Cada uma delas é constituída por 4 condutas, 2 para a água refrigerada (adução e retorno) e 2 para água do rio (adução e retorno).

As colunas montantes alimentam as condutas distribuidoras nas galerias, cada uma servindo a refrigeração da barragem entre a consola central e o último bloco alcançável da respectiva margem (Fig. 6.12 e Fig. 6.13).

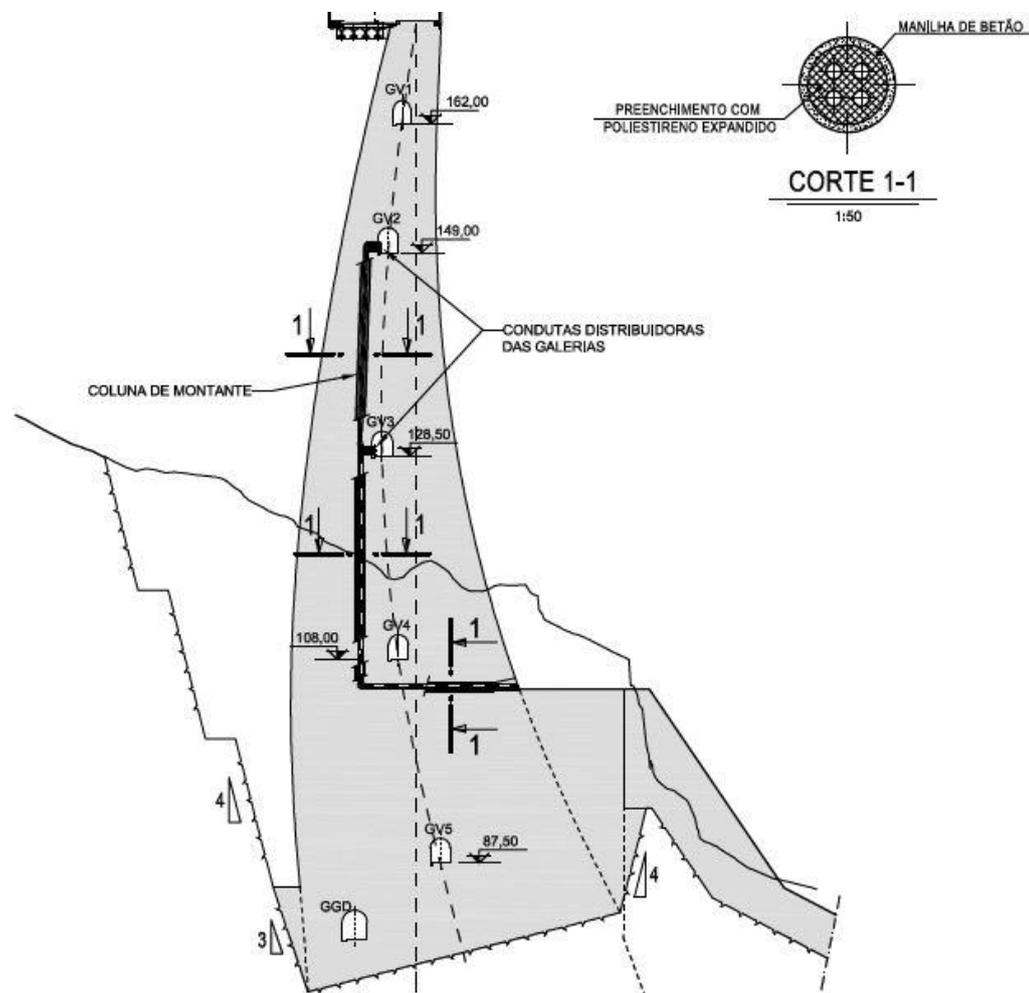


Figura 6.12 - Definição das colunas montantes de um sistema de pós-refrigeração de uma barragem (corte transversal de um bloco de betão). (EDP, 2010)

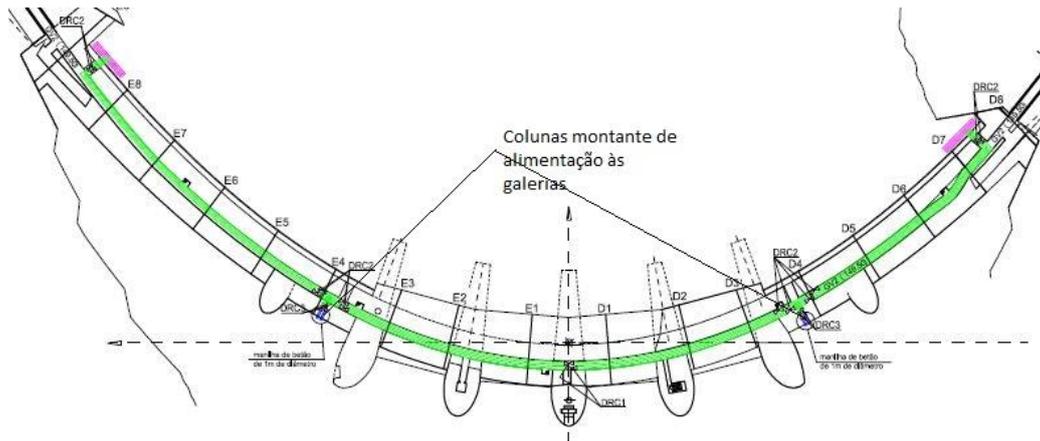


Figura 6.13 - Localização prevista para as condutas montantes, (corte horizontal- barragem de Foz Tua)

Tabela 6.2 – Características das condutas montantes embebidas (EDP, 2010)

Material	Ferro Galvanizado
Diâmetro Nominal	6"
Resistência Interior	16 bar
Isolamento Térmico	20 mm poliestireno expandido ou equivalente

6.3.2.3 Condutas distribuidoras

As condutas distribuidoras, que irradiam directamente das colunas montantes (Fig. 6.12), são igualmente em ferro galvanizado e usualmente com diâmetro de 4" (Tab. 6.3). São instaladas ao longo das galerias de visita da barragem, junto ao hasteal de montante, de modo a ocuparem o menor espaço possível (Fig. 6.14 e Fig. 6.16 - direita).

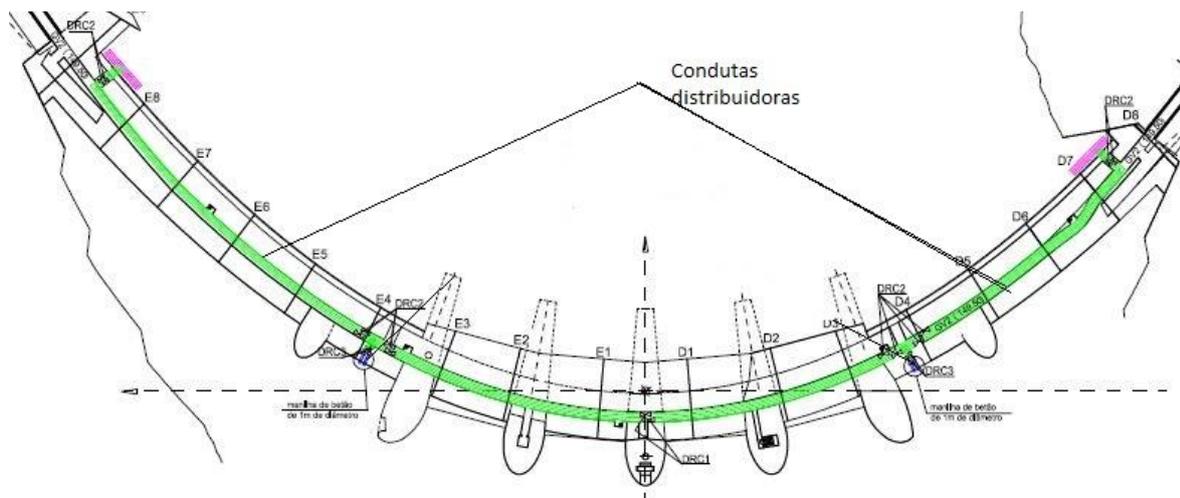


Figura 6.14 - Layout de um sistema de condutas distribuidoras ao nível de uma galeria de visita

Ao longo do seu traçado as condutas distribuidoras são dispostas em 2 pares, adução e retorno, servindo cada par um circuito independente de refrigeração, água do rio e água refrigerada.

Logo que a descofragem da galeria do último bloco o permita, as condutas distribuidoras são conectadas às condutas principais a partir do soco da barragem (Fig. 6.4), permitindo assim uma optimização das perdas de carga, sobretudo para o abastecimento das galerias a cotas mais altas. Deste modo, a partir da realização destas conexões, poderá ser possível alimentar as condutas distribuidoras directamente a partir das principais, fechando-se previamente a alimentação dessas distribuidoras a partir das colunas montantes.

Tabela 6.3 – Características das condutas distribuidoras (EDP, 2010)

Material	Ferro Galvanizado
Diâmetro Nominal	4"
Resistência Interior	16 bar
Isolamento Térmico	Não necessário

6.3.2.4 Serpentinhas de refrigeração e Chaminés interiores

A alimentação directa às serpentinhas, a partir das condutas principais ou das condutas distribuidoras, faz-se recorrendo a um circuito único de adução e retorno, composto pelo respectivo par de chaminés interiores (Fig. 6.15 e Tab.6.4) e por um sistema distribuidor, conhecido na gíria de obra como “piano de válvulas” e que será mais adiante descrito.

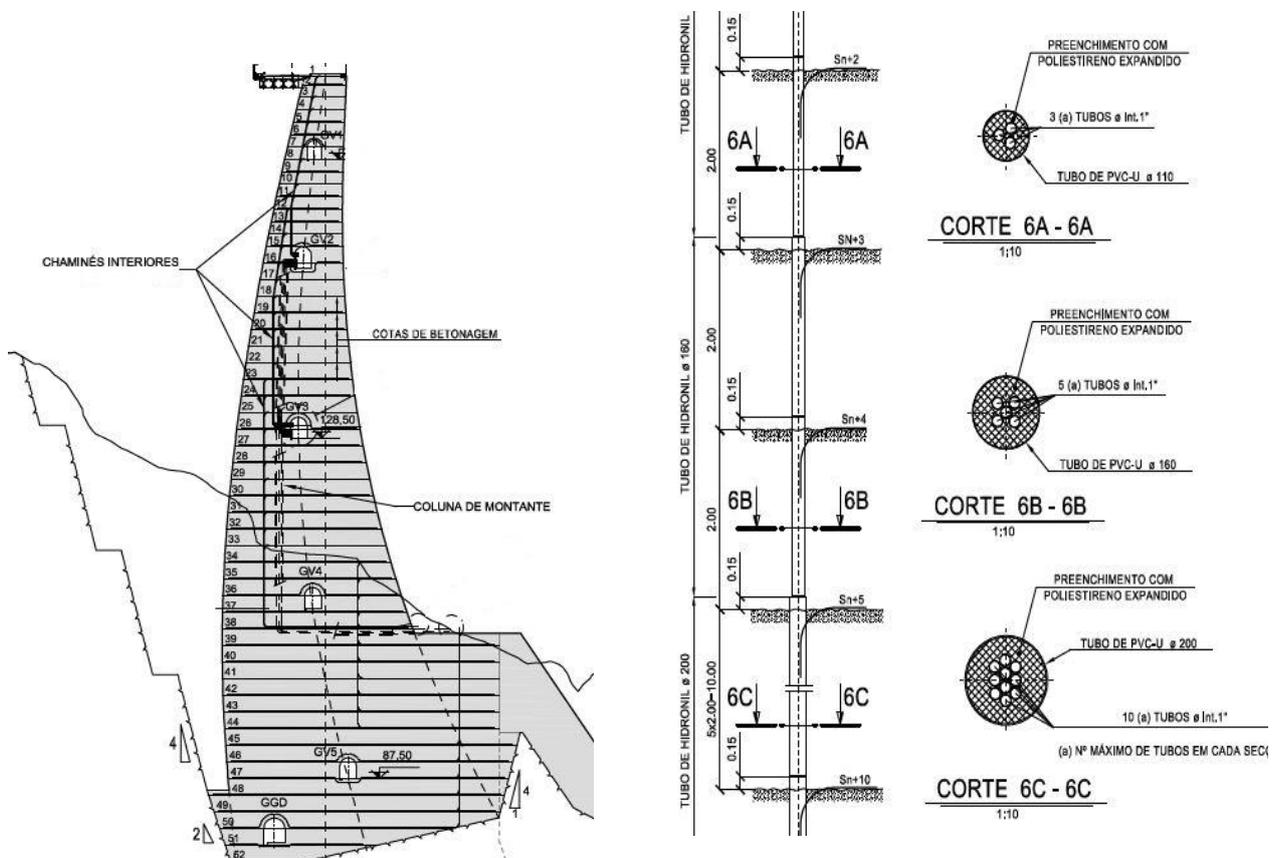


Figura 6.15 - Chaminés interiores (Esquerda – corte transversal por um bloco de betonagem; Direita – corte tipo) (EDP, 2010)

As serpentinas são geralmente constituídas por tubagens de 1'' de diâmetro nominal (Fig. 6.17 e Fig. 6.18), em polietileno de alta densidade (PEAD) da classe MRS 100-PN 16 (Tab. 6.5) ou outro material equivalente que respeite as características de condutibilidade térmica mínimas exigidas, que costumam ser da ordem dos 0,4 W/(m.°C) (EDP, 2010). É também importante que a sua resistência diametral externa seja compatível com a carga correspondente ao peso do betão fresco e à circulação de veículos e máquinas (Fig. 3.7).

Por vezes é admitida a aplicação de serpentinas de resistência inferior, MRS100-PN10, nas camadas equipadas com tubagens sujeitas a menor pressão hidráulica. Esta situação comporta alguns riscos, nomeadamente no que concerne à troca de materiais.

As serpentinas são dispostas em planos horizontais espaçados de 2,0 m (altura da camada) e coincidentes com as juntas de betonagem. Cada serpentina é ligada ao seu grupo distribuidor (Fig. 6.19), através de ramais de ligação verticais, concentrados em chaminés interiores. Cada grupo distribuidor costuma conectar um máximo de 10 ramais por chaminé. Dentro deste contexto, cada conjunto de serpentinas, associado a um grupo distribuidor, será alimentado directamente por um par de chaminés interiores, adução e retorno, localizadas paralelamente uma à outra (Fig. 6.16). Quando o volume associado a um par de colunas exceder os 8.000 m³, é habitual aumentar o número de grupos distribuidores (EDP, 2010).

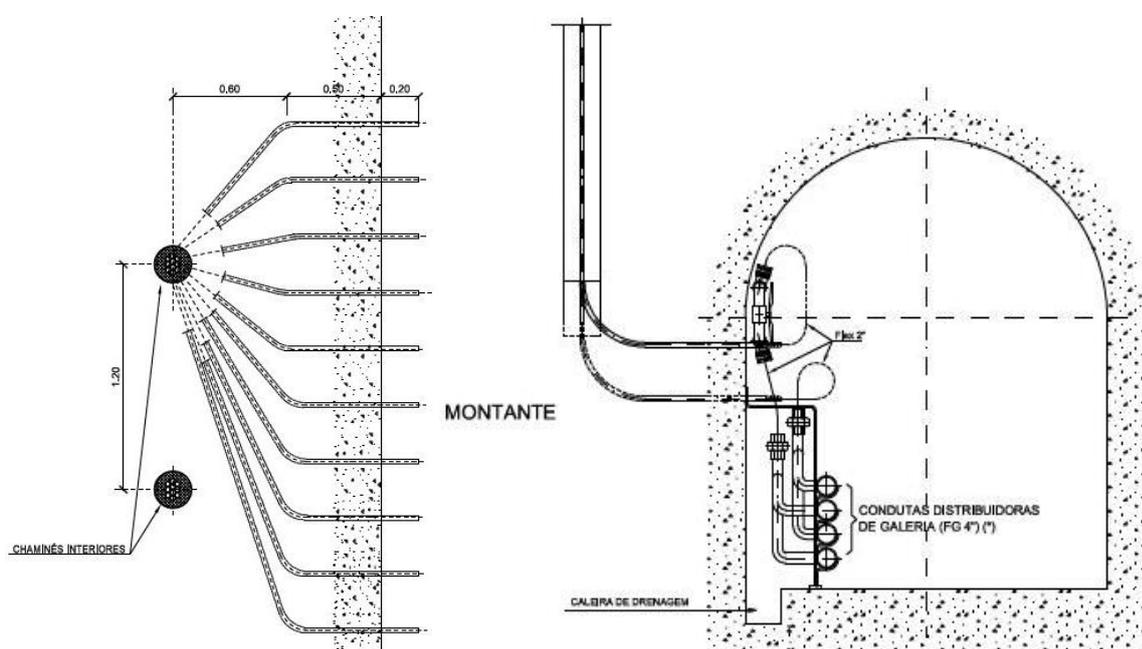


Figura 6.16 - Pormenor da derivação de uma chaminé interior (planta) para um grupo distribuidor localizado numa galeria de visita (corte transversal) (EDP, 2010)

As tubagens no interior das chaminés deverão ser revestidas com um mínimo de 20 mm de poliestireno expandido (EPS 60) ou solução equivalente de isolamento (Tab. 6.4).

No plano horizontal, os ramos da serpentina devem ter um afastamento equivalente ao espaçamento vertical, ou seja, a altura de cada camada. No entanto, para se ter em conta diferentes espessuras de blocos, este espaçamento poderá variar sensivelmente.

De forma geral, na zona inferior de cada bloco, as serpentinas são ligadas a grupos distribuidores exteriores, que se instalam no soco de jusante da barragem, e que são alimentados pelas condutas principais exteriores.



Figura 6.17 - Serpentina de refrigeração e chaminé interior – preparação de bloco para betonagem



Figura 6.18 - Serpentina de refrigeração – preparação de bloco para betonagem

Acima dessa zona, as serpentinas são alimentadas pelas condutas distribuidoras existentes na galeria de visita imediatamente abaixo (Fig. 6.15).

Na prática corrente, em cada bloco a serpentina nº1 é a mais próxima da cota de coroamento e coincidente com a junta de betonagem que garanta um mínimo de 1 m de recobrimento de betão.

A dobragem dos tubos nos pontos angulosos dos ramos das serpentinas e dos respectivos ramais de ligação às galerias, ao paramento de jusante e à superfície da blocagem, deverá realizar-se com um raio de curvatura que seja compatível com as suas funções resistentes e funcionais.

As serpentinas instaladas por baixo das galerias de visita mais próxima da fundação devem ser protegidas de forma a serem detectadas e não danificadas na execução dos furos para tratamento de fundações.

É usual que a ligação dos grupos distribuidores aos bocais de ligação dos ramais das serpentinas, adução e retorno, seja feita através de tubagens flexíveis de engate rápido, resistentes a uma pressão nominal interior de 16 bar e diâmetro nominal de pelo menos 30 mm.

É boa prática, a fim de prolongar a vida útil e manter a perfeita operacionalidade das serpentinas, realizar mensalmente uma operação de limpeza de resíduos sólidos acumulados. Esta operação é feita através de circulação de água em circuito aberto, minimizando deste modo as possibilidades de entupimento.

Tabela 6.4 – Características das chaminés interiores (EDP, 2010)

Material	PVC - U SN 8 ou equivalente
Diâmetro Nominal	Variável de acordo com o úmero de serpentinas
Resistência Interior	-
Isolamento Térmico	Preenchimento mínimo de 20 mm de poliestireno expandido entre serpentinas e paredes da chaminé

Tabela 6.5 – Características das serpentinas (EDP, 2010)

Material	PEAD MRS 100 ou equivalente
Diâmetro Nominal	1"
Resistência Interior	16 bar (10 bar nas condições supra referenciadas)
Isolamento Térmico	Não necessário

6.3.3 Grupos distribuidores

Basicamente, um grupo distribuidor (Fig. 6.19) é constituído por tubos de 2” de diâmetro nominal que se inserem nas condutas principais ou distribuidoras, munidos de “pianos de válvulas” dispersores (de adução e retorno), dos quais derivam ramais de 1” para ligação rápida, através de engate, às serpentinas, sendo habitualmente realizados em ferro galvanizado (EDP, 2010).

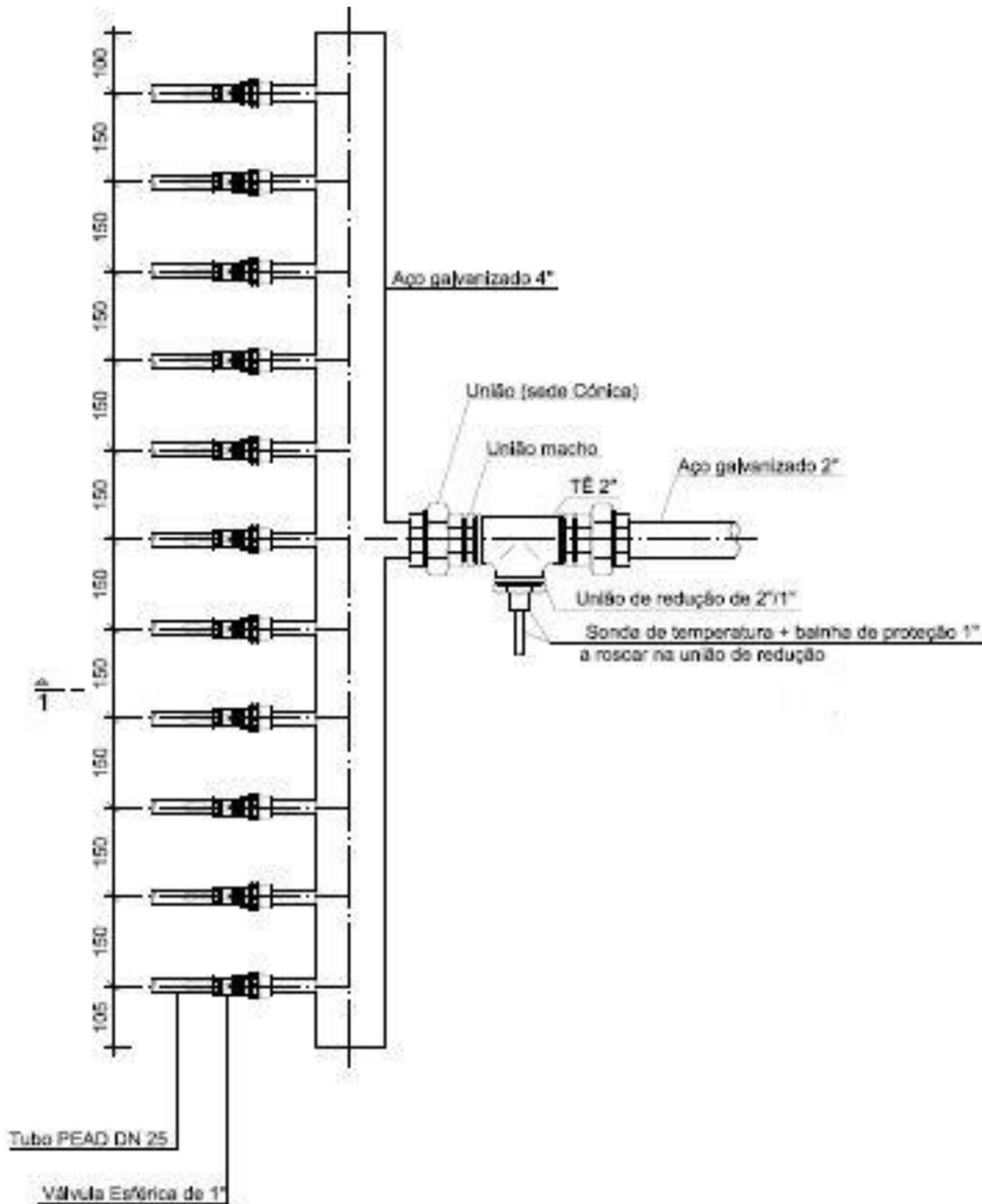


Figura 6.19 - Grupo distribuidor

As válvulas a instalar nos tubos de 2” são usualmente do tipo borboleta, permitindo a regulação do caudal, enquanto as válvulas a instalar no ramal dos “pianos” são do tipo esférico, permitindo apenas seccionamento/corte do caudal.

Normalmente cada grupo distribuidor tem a capacidade para alimentar em simultâneas 10 serpentinas. Em casos especiais, conforme já referido, é possível realizar mais ligações de serpentinas, desde que o volume de betão associado não ultrapasse um determinado limite definido e já referido.

Cada sistema de refrigeração (grupo distribuidor) afecto a cada conjunto de serpentinas tem que permitir (Fig. 6.20):

- A ligação alternada ao circuito de água refrigerada e água do rio e também a regulação e corte do caudal de circulação do conjunto, através da rápida intervenção nos sistemas mecânicos de regulação;
- A inversão local do sentido de circulação da água no conjunto das serpentinas, através de dispositivos de engate rápido e de tubagens flexíveis entre as condutas de alimentação e os “pianos de válvulas”;
- Isolar a alimentação e circulação em cada serpentina, por intermédio de válvulas de seccionamento;
- Desligar e re-ligar de forma expedita os tubos de adução e retorno para cada serpentina, através de dispositivos de engate rápido e tubagens flexíveis;
- A medição da temperatura da água, na adução e retorno no conjunto das serpentinas;
- A medição do caudal de circulação para o conjunto das serpentinas, o caudal instantâneo e volume acumulado;
- A circulação nos caudalímetros segundo o sentido de funcionamento permitido pelos mesmos, caso estes não sejam bidirecionais. Esta implementação pode ser concretizada através de um sistema de by-pass, conforme se apresenta na figura 6.21.

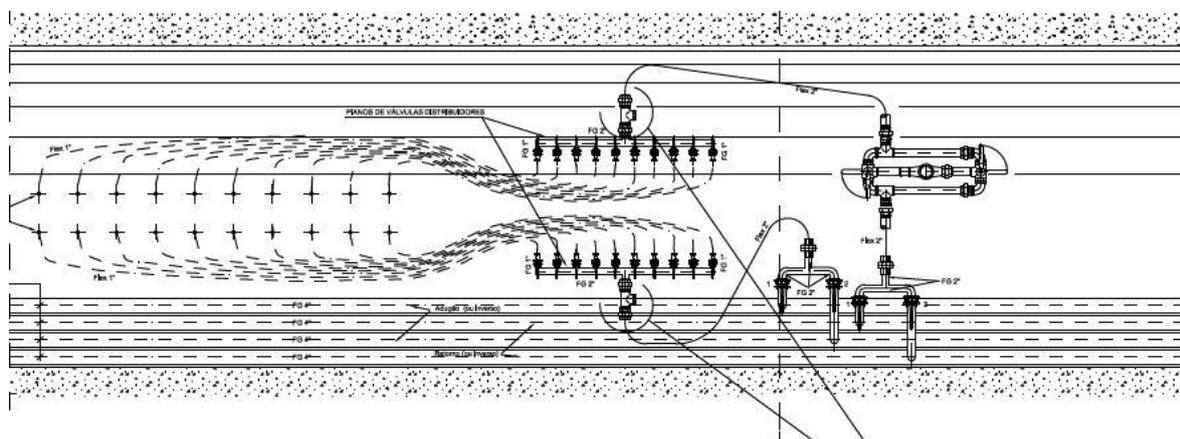


Figura 6.20 - Exemplo de galeria de visita (corte longitudinal), inserção dos grupos distribuidores nas condutas de distribuição e inversor do sentido de circulação da água (EDP, 2010)

6.3.4 Regulação do caudal e corte

Regulação do caudal: Válvulas borboleta

Com a finalidade de promover a regulação e corte do caudal, são usualmente instaladas válvulas de borboleta em diversos pontos das condutas principais (8”), das colunas montantes (6”) e das condutas distribuidoras (4”) dos circuitos de água refrigerada e de água do rio.

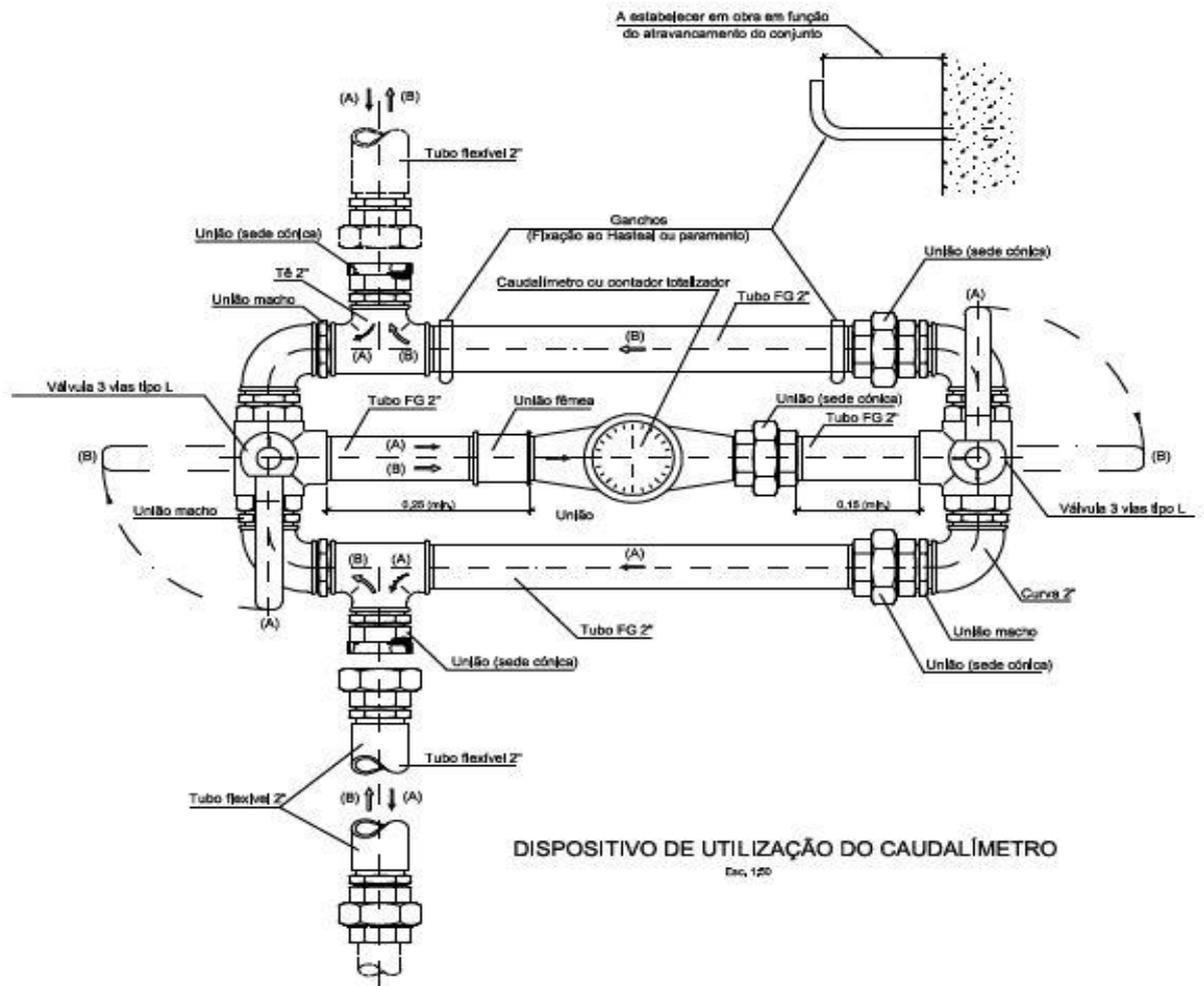


Figura 6.21 - Sistema de by-pass para caudalímetros unidireccionais (EDP, 2010)

Deste modo consegue-se controlar a origem do abastecimento (margem esquerda, margem direita), quer da água refrigerada, quer da água do rio, para qualquer secção da rede de condutas e, naturalmente, para qualquer zona da barragem a refrigerar (EDP, 2010).

Nos grupos distribuidores, conforme referido em 6.3.3, também existem válvulas borboleta a aplicar nas tubagens de 2”.

Secionamento do caudal: Válvulas esféricas

Ao longo dos circuitos de água refrigerada e de água do rio, são também instaladas válvulas de secionamento e corte do caudal, dispostas em número suficiente e em posições adequadas por forma a permitir, sempre que se considere necessário, o esvaziamento completo e a limpeza de qualquer parte dos sistemas.

6.3.5 Etiquetagem e identificação

O sistema de refrigeração artificial tem que ser devidamente etiquetado e identificado, junto aos seus principais equipamentos e pontos singulares, de modo a permitir uma correcta operação e exploração do sistema e um controlo eficiente do processo de refrigeração (EDP, 2010)

6.4 Monitorização do processo de refrigeração - Instrumentação

Tendo em conta a inércia térmica que envolve um processo de arrefecimento artificial, as operações de refrigeração têm que se iniciar obrigatoriamente com alguma antecedência, relativamente às campanhas de injeção das juntas de retracção. Assim sendo, a refrigeração artificial inicia-se habitualmente antes da conclusão dos betões da barragem, estendendo-se em várias fases e para diferentes zonas da estrutura, sendo habitual o seu prolongamento até em simultâneo com os trabalhos de injeção das juntas.

Durante todo o período em que se pretende arrefecer a estrutura de uma forma controlada, até uma determinada temperatura pré-definida pelos projectistas, usualmente entre os 10°C-11°C, torna-se imprescindível monitorizar o processo de refrigeração, registando-se:

- A temperatura e o caudal da água que circula nos sistemas de refrigeração, isto é, controlando o efeito da acção da refrigeração;
- A evolução das temperaturas dos betões e da abertura de contracção.

Desta forma a monitorização e a exploração adequada de todo o sistema de refrigeração, regulando o caudal e a temperatura da água que abastece as serpentinas das diferentes zonas da estrutura, permite controlar continuamente o processo de refrigeração.

Normalmente compete ao empreiteiro a leitura dos aparelhos que integram o sistema de monitorização (caudalímetros e sondas térmicas), bem como o tratamento e fornecimento dos dados e resultados à fiscalização/projectista, em suporte informático (EDP, 2010).

6.4.1 Observação da água em circulação

Logo à saída das fontes de alimentação de água (centrais de refrigeração, instalações de bombagem, depósitos de água do rio, etc.) para os circuitos de água do rio e de água refrigerada, e sempre antes dos dispositivos de inversão de circulação, tem que se medir o caudal e a temperatura na adução e no retorno. Tem que ser igualmente implantada a medição de caudais em todos os nós e derivações principais da rede de condutas, em ambos os circuitos, afectando as condutas principais exteriores, as colunas montantes embebidas e as condutas distribuidoras nas galerias.

Junto às fontes de alimentação de água, os caudalímetros utilizados podem ser unidireccionais, mas o mesmo não deve acontecer para a medição junto aos nós e derivações principais das condutas, onde o sentido de circulação pode ser alternado. Neste caso recorre-se preferencialmente a caudalímetros

bidirecionais. No entanto, é possível adoptar os caudalímetros unidireccionais para esses locais, desde que:

- Haja um caudalímetro na adução e outro no retorno;
- A inversão da circulação se realize sem que ocorram danos nos caudalímetros.

Os caudalímetros unidireccionais têm que ser equipados com válvulas anti-retorno.

A medição de caudais à saída das fontes de alimentação tem que ser feita por forma a permitir que se contabilize também o retorno, pois só assim é possível determinar as fugas nos circuitos ou deficiências de funcionamento do sistema de refrigeração.

Nos grupos distribuidores deve haver instrumentação para medição do caudal instantâneo, do volume totalizado e das temperaturas da água de adução e retorno para o conjunto das serpentinas. Não costuma, no entanto, ser necessário que a totalidade dos grupos distribuidores esteja equipada com esta instrumentação.

Na realidade, como a pós-refrigeração recorrendo às serpentinas embebidas e à água refrigerada se realiza faseadamente, apenas é necessário monitorizar o caudal e a temperatura da água para o conjunto dos distribuidores, que em cada fase estão a ser utilizados para esse fim (EDP, 2010).

6.4.1.1 Caudalímetros

São frequentes as seguintes exigências técnicas base para os aparelhos em causa (EDP, 2010):

- Medição do caudal instantâneo e do volume total, em determinado circuito hidráulico, com montagem do tipo intrusiva ou não intrusiva, e de funcionamento mecânico, electromagnético ou ultrassónico;
- Mostrador analógico ou digital hermético, inserido no corpo do caudalímetro, com leitura infinita do totalizador, e possibilidade de substituição sem alteração das condições de funcionamento do corpo principal do caudalímetro;
- Leitura mínima (resolução) de pelo menos 0,5% do caudal máximo permanente para o caudal instantâneo, e de 0,1 dm³ para o volume totalizado;
- Acoplamento às condutas rígidas por flange ou união cónica, no caso das montagens intrusivas;
- Fluxo bidirecional ou unidireccional, conforme solução a implementar, e já abordada anteriormente;
- Possibilidade de leitura e registo horário da medição realizada;
- Baixa perda de carga.

As condições usualmente exigidas à instalação e funcionamento são:

- Sempre que possível a posição de montagem deve ser próxima da horizontal;
- Pressão máxima de serviço da ordem dos 16 bar;

- Caudal permanente nas condutas de 2": 8 dm³/s;
- Caudal permanente nas condutas de 4": 35 dm³/s;
- Caudal permanente nas condutas de 8": 70 dm³/s;
- A água do rio tem que ser decantada, sem detritos sólidos significativos;
- Temperatura do fluido: 3°C a 4°C, excepcionalmente de 0°C a 50°C.

Normalmente ao fornecedor do equipamento é exigida a definição da seguinte informação técnica:

- Pressões máximas e mínimas de funcionamento;
- Caudal e velocidades e máximos admitidos;
- Caudal e velocidade mínimos admitidos;
- Caudal de arranque;
- Perda de carga para o caudal máximo;
- Perda de carga para o caudal mínimo;
- Resolução (mínimo valor lido no mostrador);
- Tipo de acoplamento e esquema de montagem para cada situação de instalação;
- Posição de funcionamento do mostrador;
- Tipo de mecanismo de medição e componentes em contacto com a água;
- Componentes rectos mínimos, a montante e a jusante do caudalímetro.

6.4.1.2 Sondas termométricas

São frequentes as seguintes exigências técnicas base para os aparelhos em causa (EDP, 2010):

- Medição da temperatura da água de adução e retorno, em determinado local de um circuito, com montagem do tipo intrusiva, em que a sonda se constitui como componente amovível e sem contacto directo com o fluido;
- Campo de medida: de 0°C a 50°C;
- Precisão mínima de 0,2°C;
- Leitura eléctrica por unidade portátil;
- Sonda dotada com cabo, para facilitar a ligação à unidade portátil;
- Possibilidade de leitura e registo horário da medição realizada;
- Baixa perda de carga.

As condições usualmente exigidas à instalação e funcionamento são:

- Montagem posicionada em posição tal que permita o rápido e fácil acesso para leituras e manutenção;
- Montagem preparada para fluxo bidireccional, mantendo as características próprias de precisão e de perda de carga;
- Pressão máxima de serviço: 16 bar;
- Velocidade média do fluido (máximo admitido): 5 m/s;

- Água do rio decantada, sem detritos sólidos significativos;
- Temperatura do fluido: 3°C a 40°C, excepcionalmente de 0°C a 50°C.

Normalmente ao fornecedor do equipamento é exigida a definição da seguinte informação técnica:

- Pressão máxima de serviço admitida pela montagem;
- Máximo admitido para a velocidade média do fluido;
- Perdas de carga função da gama de velocidades;
- Margem de erro da sonda e da unidade portátil;
- Resolução;
- Tipo de acoplamento recomendado para cada situação de montagem;
- Tecnologia, método de medição e acessórios em contacto com a água;
- Componentes rectos mínimos a montante e a jusante da montagem.

6.4.2 Observação do betão em massa da barragem

A observação da evolução do arrefecimento do betão da barragem durante o processo de pós-refrigeração é efectuada, por um lado, através das leituras das temperaturas e das aberturas das juntas medidas na aparelhagem eléctrica embebida e, por outro lado, através de conjuntos de sondas para perfis térmicos colocados no interior do betão especificamente para este efeito. Os conjuntos de sonda para perfis térmicos são usualmente colocados em todos os blocos, entre galerias de visita, em planos verticais equidistantes das juntas. Estes conjuntos são frequentemente constituídos por cinco sondas, ficando cada conjunto distanciado entre si na ordem dos 4 metros, situando-se a primeira 4 metros acima da abóboda da galeria inferior e a última ao nível da galeria superior. Estes conjuntos devem permitir leituras com precisões entre 1°C a 0,50°C, e ter um campo de medida entre os 0°C e os 70°C. As leituras são realizadas com recurso a unidades eléctricas portáteis, devendo ser iniciadas o mais cedo possível, ou seja, quase em simultâneo com o início das betonagens dos blocos.

6.5 Exemplo prático

6.5.1 Cálculo da elevação da temperatura do betão em barragens (método de Schmidt)

Pretende-se determinar o aumento de temperatura ao longo da altura de um bloco de betão em massa de uma barragem, com 2 metros de altura e recoberto num intervalo de tempo de 3 dias.

A curva do desenvolvimento do calor de hidratação do cimento em função do tempo, pode ser apresentada nos termos constantes da equação 6.1 (ESTEVEVES, 2011; TELES, 1985).

$$Q = Q_i * (1 - e^{-m * t}) \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Q_i e m_i são constantes específicas de cada cimento e t é a variável tempo.

Esta curva é usualmente obtida através de ensaios de laboratório.

Com base na equação 6.1 é possível determinar a curva das temperaturas adiabáticas no betão, nos termos constantes da equação 4.3 desta dissertação.

Tendo obtido a curva adiabática da temperatura do betão e a respectiva difusibilidade, pode-se determinar o aumento da temperatura do betão, tendo presente um determinado planeamento de betonagens e uma dada espessura das camadas.

Para determinar a elevação da temperatura é usual recorrer-se ao conhecido método de Schmidt que, em linhas gerais, pode ser apresentado nos seguintes termos (ACI, 2005a; INTECSA, 1998; SILVEIRA, 1961):

Numa barragem de grande espessura, o calor desenvolvido durante os primeiros dias é praticamente perdido pela face superior do bloco (camada). Está-se assim em presença de um caso de fluxo unidireccional de calor, que pode ser expressa pela equação 6.2 (INTECSA, 1998).

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{h^2}{(\Delta z)^2} (\theta_{(z+\Delta z)} + \theta_{(z-\Delta z)} - 2\theta_{(z)}) + \frac{\Delta\theta_1}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Em que:

- θ - temperatura do volume considerado;
- t - variável tempo;

z - coordenada na direcção do fluxo;

h^2 - difusibilidade do betão (neste caso serão consideradas britas graníticas. Tab. 4.1) ;

$\Delta\theta_1$ - aumento de temperatura do elemento de volume considerado.

Para se aplicar o método de Schmidt é necessário que Δt e Δz sejam escolhidos de forma a que:

$$h^2 * \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} = \frac{1}{2}$$

Desta forma a equação 6.2 toma a forma:

$$\theta = \frac{1}{2} * (\theta_{(z+\Delta z)} + \theta_{(z-\Delta z)}) + \Delta\theta_1 \quad (\text{Eq. 6.3})$$

No caso do exemplo, tomando uma espessura de camada de betonagem de $\Delta z = 0,333$ m, ou seja, considerando uma divisão da altura do bloco em 6 intervalos, implica:

$$\Delta t = \frac{(\Delta z)^2}{2h^2} = 0,57 \sim 0,5 \text{ dias}$$

Considere-se que o betão em causa tem as seguintes características:

- Difusibilidade: $h^2 = 0,004 \text{ m}^2/\text{h} = 0,096 \text{ m}^2/\text{dia}$;

- Variação do calor de hidratação do betão: $\Delta Q_1 = 6,1 * e^{-0,23836 * t}$ (valor utilizado no estudo preliminar de refrigeração do betão, Barragem de Alqueva (INTECSA, 1998)).

O cálculo das temperaturas que se desenvolvem no betão, colocado com um dado ritmo estabelecido no planeamento da obra, para uma determinada altura de betonagem (2 m) e calor de hidratação, é apresentada na tabela 6.6. As condições iniciais em cada intervalo de tempo são apresentadas na primeira coluna. As temperaturas desenvolvidas nesse intervalo de tempo encontram-se na coluna do meio. A temperatura final, no intervalo de tempo em análise, consta da última coluna e é obtida pela soma das duas primeiras colunas. A primeira coluna do intervalo seguinte obtém-se efectuando as operações indicadas na primeira parte da equação 6.3. Adicionando $\Delta\theta_1$, que se coloca na coluna do meio, obtém-se a temperatura desenvolvida nesse intervalo de tempo.

No exemplo apresentado admite-se que a primeira camada de betonagem é colocada sobre o terreno de fundação, ou sobre um bloco já arrefecido, o que implica que a subida de temperatura nessas condições seja de apenas metade da subida da temperatura do betão (desde que a rocha ou o bloco arrefecido não gere calor).

Na junta de construção, entre os dois blocos sobrepostos, os quais geram calor a diferentes taxas, em determinado intervalo de tempo, o aumento da temperatura será a média dos dois aumentos.

Nas superfícies expostas ao meio ambiente, o aumento adiabático da temperatura é zero, desde que o calor gerado se dissipe tão rapidamente quanto é gerado.

Adoptou-se, conforme já referido anteriormente, um intervalo de três dias entre as betonagens de dois blocos sobrepostos.

Como se pode observar na tabela 6.6, a máxima elevação da temperatura é de 26,31°C, ou seja, de aproximadamente 26°C.

Assim, a máxima temperatura que o betão pode atingir será a sua temperatura de colocação adicionada dos 26°C, nos termos constantes do item 4.6 desta dissertação.

Tabela 6.6 – Método Schmidt para cálculo das temperaturas que se desenvolvem no betão

H(m)		Bloco 8			Bloco 9			Bloco 10			Bloco 11			Bloco 12			Bloco 13		
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2ª Bloco	4,00																		
	3,67	0,00 5,49 5,49			2,74 4,87 7,61			5,18 4,32 9,50			6,65 3,84 10,49			7,96 3,41 11,37			8,92 3,02 11,94		
	3,33	0,00 5,49 5,49			5,49 4,87 10,36			8,98 4,32 13,31			12,09 3,84 15,93			14,44 3,41 17,84			16,11 3,02 19,14		
	3,00	0,00 5,49 5,49			5,49 4,87 10,36			10,36 4,32 14,68			14,55 3,84 18,39			17,45 3,41 20,86			20,39 3,02 23,41		
	2,67	0,00 5,49 5,49			5,49 4,87 10,36			11,47 4,32 15,79			15,15 3,84 18,98			19,53 3,41 22,94			21,76 3,02 24,78		
	2,33	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	Bloco 5	Bloco 6	Bloco 7	0,00 5,49 5,49	7,72 4,87 12,59	11,30 4,32 15,62	16,83 3,84 20,67	19,24 3,41 22,65	23,29 3,02	26,31				
1ª Bloco	2,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	6,02 3,93 9,95	8,75 3,49 12,24	14,78 3,10 17,87	16,74 2,75 19,50	21,20 2,44 23,64	22,56 2,17 24,72					
	1,67	0,00 5,49 5,49	2,74 4,87 7,61	5,18 4,32 9,50	6,65 3,84 10,49	7,96 3,41 11,37	8,70 3,02 11,72	9,35 2,68 12,03	9,63 2,38 12,01	14,85 2,11 16,96	15,99 1,88 17,87	20,05 1,67 21,72	20,98 1,48 22,46	24,24 1,31 25,55					
	1,33	0,00 5,49 5,49	5,49 4,87 10,36	8,98 4,32 13,31	12,09 3,84 15,93	13,99 3,41 17,39	15,67 3,02 18,70	16,57 2,68 19,25	17,37 2,38 19,75	17,63 2,11 19,75	20,36 1,88 22,23	20,81 1,67 22,47	23,35 1,48 24,83	23,67 1,31 24,98					
	1,00	0,00 5,49 5,49	5,49 4,87 10,36	10,36 4,32 14,68	13,65 3,84 17,49	16,57 3,41 19,98	18,40 3,02 21,42	20,02 2,68 22,70	20,87 2,38 23,26	21,64 2,11 23,75	21,87 1,88 23,74	23,32 1,67 24,98	23,39 1,48 24,87	24,93 1,31 26,24					
	0,67	0,00 5,49 5,49	5,49 4,87 10,36	9,67 4,32 13,99	13,39 3,84 17,22	15,99 3,41 19,40	18,31 3,02 21,34	19,81 2,68 22,49	21,14 2,38 23,53	21,87 2,11 23,99	22,52 1,88 24,40	22,65 1,67 24,32	23,54 1,48 25,02	23,44 1,31 24,75					
	0,33	0,00 5,49 5,49	4,11 4,87 8,98	7,77 4,32 12,09	10,66 3,84 14,50	13,24 3,41 16,64	15,18 3,02 18,20	16,90 2,68 19,59	18,11 2,38 20,49	19,18 2,11 21,30	19,68 1,88 21,56	20,43 1,67 22,10	20,53 1,48 22,01	21,25 1,31 22,56					
	0,00	0,00 2,74 2,74	2,74 2,43 5,18	5,18 2,16 7,34	7,34 1,92 9,26	9,26 1,70 10,96	10,96 1,51 12,47	12,39 1,34 13,73	13,65 1,19 14,84	14,31 1,06 15,37	15,53 0,94 16,47	15,92 0,83 16,75	16,74 0,74 17,48	16,88 0,66 17,54					
	Fundação ou Bloco Frio	-0,33	0,00 0,00 0,00	1,37 0,00 1,37	2,59 0,00 2,59	4,01 0,00 4,01	5,28 0,00 5,28	6,57 0,00 6,57	7,72 0,00 7,72	8,13 0,00 8,13	9,76 0,00 9,76	10,28 0,00 10,28	11,37 0,00 11,37	11,76 0,00 11,76	12,57 0,00 12,57				
-0,67		0,00 0,00 0,00	0,69 0,00 0,69	1,29 0,00 1,29	2,18 0,00 2,18	2,96 0,00 2,96	3,87 0,00 3,87	4,68 0,00 4,68	5,19 0,00 5,19	6,28 0,00 6,28	6,76 0,00 6,76	7,67 0,00 7,67	8,07 0,00 8,07						
1,00		0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,35 0,00 0,35	0,65 0,00 0,65	1,18 0,00 1,18	1,64 0,00 1,64	2,25 0,00 2,25	2,79 0,00 2,79	3,24 0,00 3,24	3,96 0,00 3,96	4,38 0,00 4,38	5,06 0,00 5,06						
-1,33		0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,17 0,00 0,17	0,32 0,00 0,32	0,63 0,00 0,63	0,90 0,00 0,90	1,29 0,00 1,29	1,64 0,00 1,64	1,99 0,00 1,99	2,46 0,00 2,46	2,79 0,00 2,79						
-1,67		0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,09 0,00 0,09	0,16 0,00 0,16	0,34 0,00 0,34	0,49 0,00 0,49	0,74 0,00 0,74	0,95 0,00 0,95	1,20 0,00 1,20	1,50 0,00 1,50						
-2,00		0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,04 0,00 0,04	0,08 0,00 0,08	0,18 0,00 0,18	0,27 0,00 0,27	0,41 0,00 0,41	0,54 0,00 0,54	0,70 0,00 0,70					
-2,33		0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00	0,02 0,00 0,02	0,04 0,00 0,04	0,09 0,00 0,09	0,13 0,00 0,13	0,21 0,00 0,21	0,27 0,00 0,27					
$\Delta T \rightarrow$	0 dias	0,5 dias	1,0 dias	1,5 dias	2,0 dias	2,5 dias	3,0 dias	3,5 dias	4,0 dias	4,5 dias	5,0 dias	5,5 dias	6,0 dias						

6.5.2 Cálculo do arrefecimento do betão

Admita-se agora que se pretende arrefecer o bloco de betão em análise, por forma a realizar a injeção eficaz das juntas de contracção, o que significa que não haverá necessidade de re-injecções.

A pós-refrigeração é feita com recurso a um sistema de serpentinas de 1", onde circulará água em regime turbulento, podendo considerar-se que o espaçamento horizontal é aproximadamente equivalente ao vertical, ou seja, 2 metros.

Considere-se que a temperatura alvo pretendida é de 10°C, e que o betão foi colocado durante a betonagem a uma temperatura de 25°C.

A central de arrefecimento de água a instalar na barragem terá capacidade de fornecer água a 4°C.

A água do rio, antes de arrefecida, tem uma temperatura média da ordem dos 18°C.

Pretende-se saber quanto tempo durarão as operações de arrefecimento em dois cenários diferentes:

- Arrefecimento feito apenas com água a 4°C, admitindo que os riscos de choque térmico podem ser desprezáveis;
- Arrefecimento em dois patamares: (i) água do rio a 18°C; (ii) seguida de água refrigerada a 4°C.

Pretende-se ainda determinar qual o caudal necessário para proceder às operações de arrefecimento.

6.5.2.1 Arrefecimento feito apenas com água arrefecida a 4°C

A secção transversal correspondente a cada ramo da serpentina é de $2 \times 2 = 4 \text{ m}^2$.

O diâmetro de um cilindro equivalente pode ser calculado nos seguintes termos:

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} = 4 \text{ m}^2$$

Ou seja:

- $D^2 = 5,09 \text{ m}^2$
- $D = 2,26 \text{ m}$

Considerando:

- Temperatura máxima do betão: $25 + 26 = 51^\circ\text{C}$
- θ_0 (Diferença inicial da temperatura): $51 - 4 = 47^\circ\text{C}$
- θ_m (Diferença final da temperatura): $10 - 4 = 6^\circ\text{C}$
- $\frac{\theta_m}{\theta_0} = 0,13$

Recorrendo ao gráfico constante da figura 4.1, e considerando as condições inerentes ao caso em estudo, nos termos constantes da figura 6.22 obtém-se:

$$\frac{h^2 t}{D^2} = 0,93$$

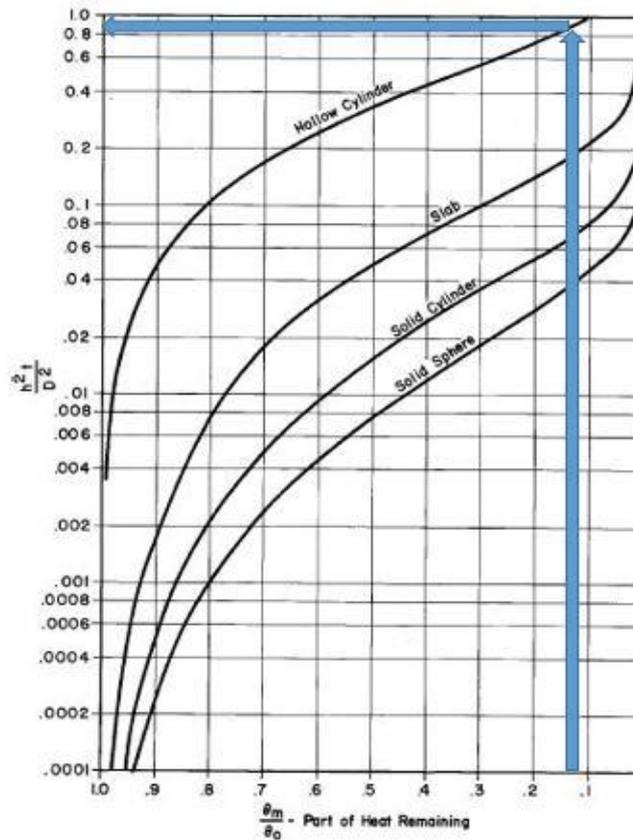


Figura 6.22 - Ábaco para resolução do problema-alínea 6.5.2.1 (Determinação de h^2t/D^2 em função de θ_m/θ_0) (adaptado de ACI, 2005a)

Então que implica que $t = \left(\frac{0,93 \cdot 5,09}{0,096} \right) = 49$ dias.

6.5.2.2 Arrefecimento em dois patamares (água do rio + água arrefecida)

O mesmo processo de arrefecimento pode ser realizado, com grande poupança de energia, se se iniciar com um arrefecimento parcial com água do rio, captada à temperatura natural. Desta forma o gradiente térmico é mais controlado, prevenindo-se desta forma choques térmicos conforme já referido anteriormente.

Considerando que a água do rio está à temperatura natural de 18°C, e admitindo que o primeiro patamar de arrefecimento (I) será o necessário para trazer a temperatura do betão para os 25°C, o que implica para uma temperatura máxima do betão de $25 + 26 = 51$ °C:

- θ_0 (Diferença inicial da temperatura): $51 - 18 = 33$ °C
- θ_m (Diferença final da temperatura): $25 - 18 = 7$ °C
- $\frac{\theta_m}{\theta_0} = 0,21$

Recorrendo ao gráfico constante da figura 4.1 e considerando as condições inerentes ao caso em estudo, pelo ábaco da figura 6.23 obtém-se:

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,70$$

$t = 37$ dias.

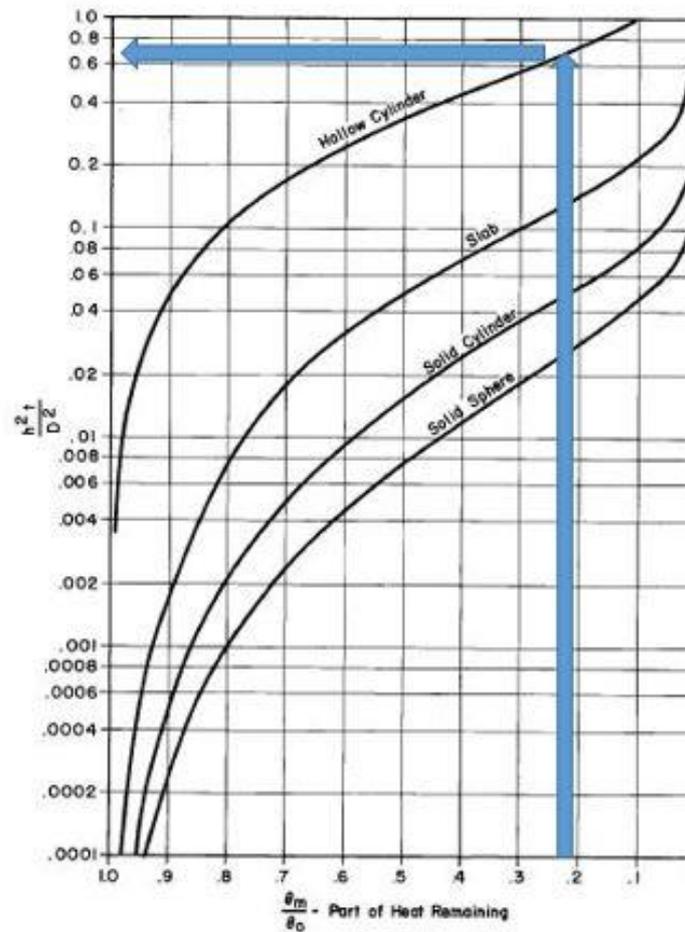


Figura 6.23 - Ábaco para resolução do problema-alínea 6.5.2.2 (I) (Determinação de h^2t/D^2 em função de θ_m/θ_0) (adaptado de ACI, 2005a)

Para o segundo patamar de arrefecimento (II) tem-se:

- θ_0 (Diferença inicial da temperatura): $25 - 4 = 21^\circ\text{C}$
- θ_m (Diferença final da temperatura): $10 - 4 = 6^\circ\text{C}$
- $\frac{\theta_m}{\theta_0} = 0,29$

Recorrendo ao gráfico constante da figura 4.1 e considerando as condições inerentes ao caso em estudo, obtém-se pela figura 6.24:

$$\frac{h^2t}{D^2} = 0,56$$

$$t = 30 \text{ dias}$$

O tempo total de arrefecimento é de $37+30 = 67$ dias, o que corresponde aproximadamente a mais 36,7% ($67/49$) de duração do que a solução com recurso apenas a água refrigerada; porém a poupança de energia será muito significativa.

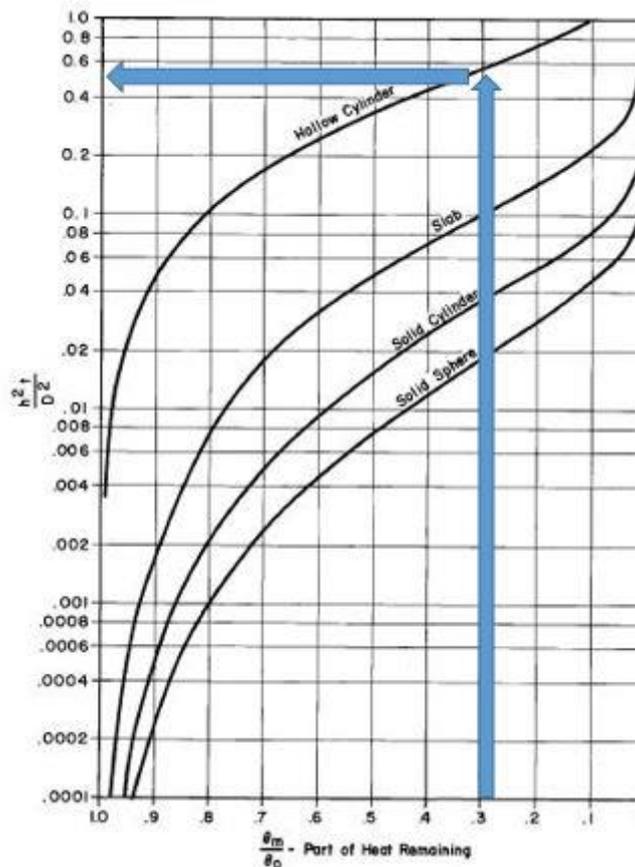


Figura 6.24 – Ábaco para resolução do problema-alínea 6.5.2.2 (II) (Determinação de h^2t/D^2 em função de θ_m/θ_0) (adaptado de ACI, 2005a)

6.5.3 Determinação do caudal necessário para se proceder à refrigeração

Conforme já referenciado anteriormente, a circulação de água nas serpentinas deve ocorrer em regime turbulento, o que implica um número de Reynolds de:

- $Re = 12.600$

Este valor é usualmente utilizado em estudos de refrigeração de betões (INTECSA, 1998), tendo também em consideração que não se deve projectar um processo de escoamento na região de transição com: $10^3 < Re < 10^4$ (WHITE, 1999).

Tendo em conta que o número Reynolds tem a seguinte expressão (WHITE, 1999):

- $Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$ (Eq. 6.4)

- V - velocidade

- D – diâmetro

- ν – viscosidade cinemática da água $\sim 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (WHITE, 1999)

Considerando o diâmetro útil da serpentina de 23,4 mm, obtém-se que a velocidade da água deverá ser:

$$V \geq 0,54 \text{ m/s}$$

para uma secção útil de:

$$S = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Conclui-se que o caudal mínimo que deve circular em cada serpentina, por forma a garantir o regime turbulento, é de:

$$Q = V \cdot S = 0,232 \text{ l/s}$$

6.5.4 Definição da central de arrefecimento de água para uma barragem (operações de pós-refrigeração)

Admita-se que o bloco de betonagem médio de uma barragem é sujeito às operações de pós-refrigeração (Fig. 6.25), nos termos constantes do item 6.5.2.2, ou seja, o arrefecimento artificial é realizado em dois patamares:

- Primeiro com água do rio, que permite levar a temperatura média de 51°C para 25°C;
- Depois com água refrigerada a 4° C, que permite obter a temperatura necessária à injeção das juntas de contracção (10°C).

Considere-se que no mês mais condicionante é necessário arrefecer 95 blocos com água refrigerada, sendo que as serpentinas são realizadas em tubo PEAD com 1” de diâmetro, comprimento médio de 305 m e com os diversos ramos afastados entre si cerca de 2 metros. Nestas condições pretende-se determinar as características da central de arrefecimento a instalar. Para garantir, com alguma margem de segurança, que a circulação de água dentro da serpentina ocorre em regime turbulento, admite-se um caudal de circulação de 0,25 l/s, valor superior ao mínimo determinado no item 6.5.3. Como tem de proceder-se simultaneamente (durante 30 dias) a um arrefecimento artificial, com água a 4°C, em 95 blocos, o caudal mínimo necessário é de $95 \cdot 0,25 = 23,75 \text{ l/s}$.

Para um betão com $h^2 = 0,096 \text{ m}^2/\text{dia}$ (1,03 ft²/dia), pretende-se calcular o salto térmico da água (θ_w), correspondente a $\theta_0 = 25-4$.

Para tal recorre-se à figura 6.26 da qual se retira $\theta_w/\theta_0 = 0,30$.

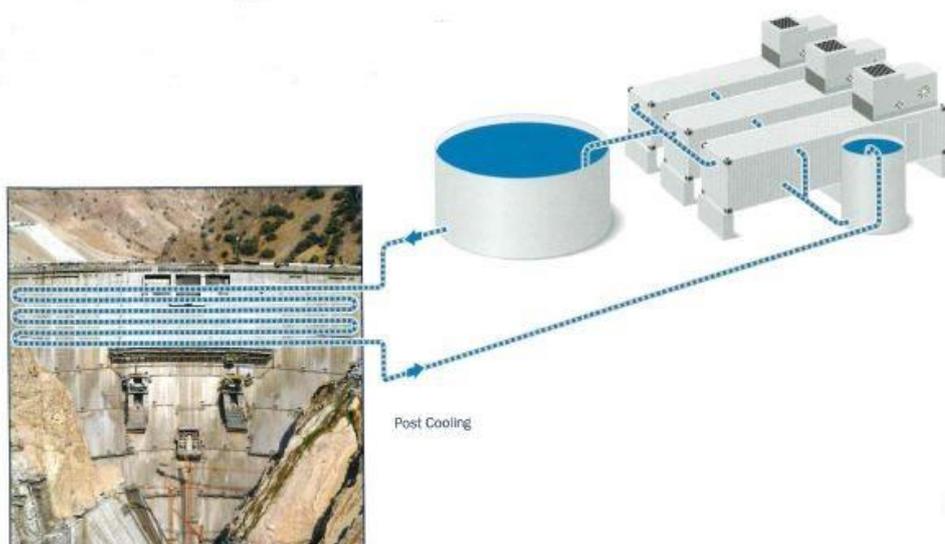


Figura 6.25 – Esquema ilustrativo do conceito de pós-refrigeração (KTI, 1991)

Esta situação implica $\theta_w = 0,30 \cdot \theta_0 = 0,30 \times 21 = 6,30^\circ \text{C}$, ou seja, em média a água aumentará de temperatura cerca de $6,30^\circ\text{C}$, saindo do processo de refrigeração a uma temperatura da ordem dos $4+6,30 \approx 10^\circ\text{C}$.

Desta forma, a água entrará no *Chiller* a 10°C saindo a 4°C .

Tendo como base o volume de arrefecimento de $23,75 \text{ l/s}$, ou seja, $85,5 \text{ m}^3/\text{h}$, e o facto do calor específico da água ter um valor de $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ [W2] o calor que o *chiller* tem que retirar, para arrefecer a água dos 10°C para os 4°C (sem contar com a água de reposição, devido a fugas do sistema) é de:

$$Q = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 85,5 \text{ m}^3/\text{h} \times 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot (10^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}) = 2.149.470 \text{ kJ}$$

Obtém-se assim um total de $2.149.470 \text{ kJ}$, ou seja, uma potência térmica dada por $2.149.470 \text{ kJ}/3600 \text{ s} = 597,08 \text{ kW}_{\text{térmicos}}$

Admitindo como água de reposição um valor da ordem dos 10%, ter-se-á um caudal de $26,13 \text{ l/s}$ e um salto térmico médio de $\theta_w = (23,75 \cdot 6 + 2,375 \cdot (18 - 4)) / 26,13 = 6,7^\circ\text{C}$

Então o valor corrigido da potência térmica (o calor que o *chiller* tem de retirar) será:

$$Q_{\text{corrigido}} = 4,19 \cdot 26,13 \cdot 7 = 766,39 \text{ kW}_{\text{térmico}}$$

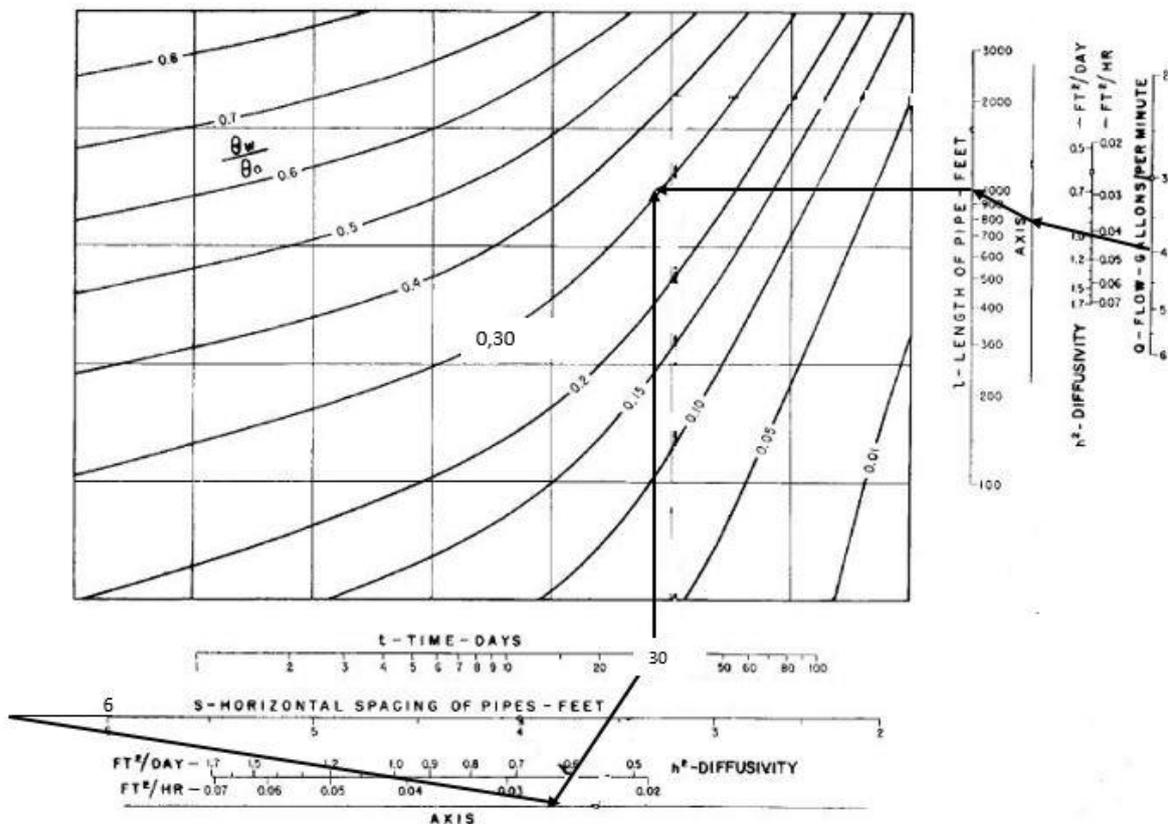


Figura 6.26 – Salto térmico da água função do salto térmico do betão, tendo em conta o caudal, comprimento da serpentina, duração do processo e difusibilidade do betão (adaptado de ACI, 2005a)

Admite-se usualmente uma reserva de pelo menos 25%, o que faz que o equipamento tenha que ter a capacidade de aproximadamente $958 \text{ kW}_{\text{térmicos}}$.

Assumindo um *chiller* com um COP (coeficiente de performance) da ordem de 3 (típico em equipamentos frigoríficos (KTI, 2013)), chega-se a uma potência eléctrica dada sensivelmente por $958 \text{ kW}_{\text{térmicos}}/3 = 319 \text{ kW}$.

Admita-se agora que o arrefecimento foi feito em apenas um patamar, com recurso a água refrigerada a 4°C , nos termos constantes em 6.5.2.1, o que corresponderá a uma operação com uma duração de 49 dias, em que se tem:

$$\theta_0 = 51 - 4 = 47^\circ\text{C}$$

Recorrendo à figura 6.27 obtém:

$$\theta_w/\theta_0 = 0,22$$

$$\theta_w = 0,22 \cdot \theta_0 = 0,22 \cdot 47 = 10,34^\circ\text{C}$$

Ou seja, a água sairia em média dos blocos em que ocorre o arrefecimento artificial a uma temperatura de $10,34 + 4 = 14,34^\circ\text{C}$.

Admitindo mais uma vez como água de reposição um valor da ordem dos 10%, ter-se-á um caudal de 26,13 l/s e um salto térmico de médio de $\theta_w = (23,75 \cdot 10,34 + 2,375 \cdot (18 - 4)) / 26,13 = 11^\circ\text{C}$.

O que implica as seguintes necessidade de potência térmica:

$$Q = 4,19 \cdot 26,13 \cdot 11 = 1.204 \text{ kW}_{\text{térmicos}}$$

Seria portanto necessário um equipamento com uma potência eléctrica de $1.204/3 \cdot 1,25 = 502 \text{ kW}$.

O consumo eléctrico desta solução seria superior à realizada com recurso a 2 patamares de refrigeração (água do rio + água a 4°C) em:

$$(502 \cdot 49 - 319 \cdot 30) / (319 \cdot 30) \times 100 \approx 157\%$$

Em termos técnicos, não é indicado iniciar um processo de arrefecimento artificial com água arrefecida, devido ao grande gradiente térmico e velocidade de arrefecimento induzidos, conforme já foi anteriormente abordado. Mas mesmo em termos económicos, tal solução também não é apropriada, pois exige uma central com potência mais elevada e um correspondente consumo eléctrico muito maior.

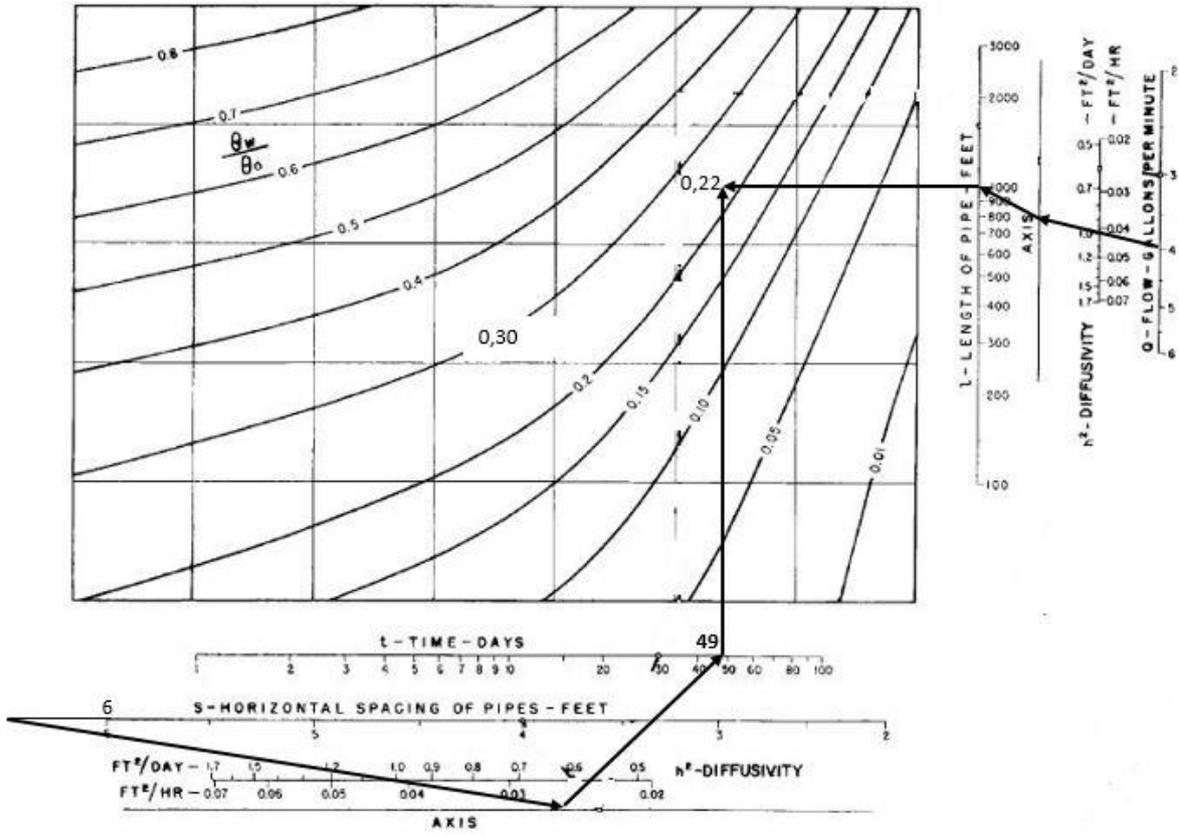


Figura 6.27 – Salto térmico da água função do salto térmico do betão, tendo em conta o caudal, comprimento da serpentina, duração do processo e difusibilidade do betão (adaptado de ACI, 2005a)

7 SÍNTESE FINAL

7.1 Sumário

Esta dissertação visou sistematizar e enquadrar, numa perspectiva prática e com base na experiência profissional do autor, a problemática do controlo das temperaturas nos betões em massa.

Com este documento pretende-se, assim, contribuir para o diálogo técnico activo entre os interlocutores usuais nestas matérias, ou seja: donos de obra, projectistas, empreiteiros e fornecedores destas tecnologias.

Os principais assuntos abordados, com níveis de detalhe diferenciados, podem ser resumidos nos seguintes termos:

- Definição de betão em massa e justificação da necessidade do controlo da respectiva temperatura interna, por forma a evitar subidas e gradientes exagerados/descontrolados;
- Definições na composição do betão, por forma a minimizar a quantidade de ligante e consequentemente o respectivo calor de hidratação libertado;
- Faseamentos/métodos construtivos que contribuem para a gestão da problemática térmica;
- Estratégias de arrefecimento artificial (pré e pós arrefecimento).

7.2 Pontos relevantes

Como conclusão desta dissertação, apresentam-se de seguida os principais pontos que permitem sistematizar e compreender o estado-da-arte em Portugal:

Composição do betão em massa

Utilização de cinzas volantes em percentagens superiores a 30% da massa do ligante, com a finalidade de minimizar o calor de hidratação e contribuir para a prevenção das reacções expansivas internas.

Utilização de agregados com $D_{máx}$ da ordem dos 150 mm, uma vez que o aumento do $D_{máx}$ do agregado, para uma mesma resistência, implica a diminuição da quantidade de ligante necessário devido à diminuição do espaço entre partículas.

As estratégias mais usuais de utilização de adjuvantes (plastificantes) têm como principal objectivo controlar a relação A/L, permitindo a obtenção de valores mais reduzidos possíveis (pela diminuição da quantidade de água), o que significa em termos práticos a minimização do calor de hidratação. Mesmo os introdutores de ar possuem um efeito colateral, de melhorar a trabalhabilidade nos betões muito secos com baixas quantidades de ligante.

Métodos/Faseamentos construtivos

A localização das juntas de contracção, tem uma importância significativa no controlo da fissuração decorrente dos gradientes térmicos, sendo uma preocupação que tem que ser tida em conta na fase de projecto.

As alturas dos blocos de betonagem (usualmente da ordem dos 2 m) e o intervalo de tempo entre 2 betonagens sobrepostas (da ordem dos 3 a 4 dias), são factores essenciais para o controlo da temperatura máxima que se atinge no interior da betonagem. É na direcção vertical e durante o intervalo de tempo referido, que ocorrem as mais significativas perdas de calor, tanto maiores quanto menor for a altura do bloco interessado.

Os prazos para a retirada das cofragens, condicionam o momento de exposição das respectivas zonas perimetrais do volume de betão à temperatura ambiente. A gestão destes prazos, função da temperatura ambiente, é essencial para o controlo dos gradientes térmicos entre o núcleo e a zona perimetral da betonagem. Estes gradientes, quando exagerados, podem provocar fissuração acentuada nos blocos de betonagem.

Arrefecimento artificial do betão

Em condições adiabáticas, a temperatura máxima que um volume de betão pode atingir corresponde à sua temperatura inicial de colocação, a que se soma a respectiva elevação de temperatura decorrente da reacção de hidratação do ligante.

Dentro deste contexto, as estratégias de arrefecimento artificial dividem-se nas que pretendem controlar a temperatura de colocação do betão (pré-refrigeração) e as que pretendem gerir a temperatura decorrente do fenómeno da presa do betão (pós-refrigeração).

A pré-refrigeração, em termos práticos, passa pelo controlo das temperaturas de alguns dos constituintes do betão, usualmente a água livre de amassadura e os agregados.

As estratégias menos exigentes passarão pela substituição da água livre por água refrigerada (1°C – 4°C) e/ou substituição parcial por escamas de gelo. Com a substituição apenas por água refrigerada dificilmente se consegue baixar a temperatura do betão mais de 4°C ou 5°C. Com a incorporação de escamas de gelo é possível atingir reduções de temperatura da ordem dos 11°C.

As estratégias mais exigentes passarão obrigatoriamente por controlar as temperaturas dos agregados, que correspondem a 70% - 85% da massa do betão. Para tal recorre-se a tecnologias em que o arrefecimento é efectivado com ar frio ou água refrigerada. A obtenção de betões à temperatura final de 10°C é usual com estas metodologias.

A combinação das várias estratégias disponíveis de pré-refrigeração permitirá a colocar betões a temperaturas de 5°C - 7°C, ou mesmo mais baixas em casos especiais.

Uma solução de pré-refrigeração que tem como alvo, não os diversos componentes do betão, mas a massa de betão no seu todo, é a que recorre à injeção de azoto líquido. Em termos práticos a injeção de cerca de 10 kg de azoto por metro cúbico de betão permite reduzir a temperatura de colocação em aproximadamente 1°C. Esta solução é bastante onerosa, só se justificando quando estão em causa volumes de betão relativamente pequenos.

A tecnologia de pós-refrigeração (circulação de água arrefecida, ou não, através de um sistema de tubagens embebidas nos blocos de betão), mais que condicionar a máxima temperatura atingida no interior de um volume de betão, pretende minimizar o tempo necessário para que esse volume atinja uma determinada temperatura. Esta situação deve-se ao facto da taxa de geração de calor devido à hidratação do ligante ser muito superior à taxa de remoção de calor que a circulação de água promove. Esta temperatura que se pretende atingir corresponde à temperatura preconizada em projecto para a injeção das juntas de contracção. Daqui decorre a necessidade de preconizar a utilização de um sistema de pós-refrigeração, quando se pretende injectar juntas de contracção.

No entanto, o problema é um pouco mais complexo, uma vez que existem projectistas que preconizam apenas a utilização de pré-refrigeração, mesmo em barragens de dupla curvatura, prescindindo da pós-refrigeração devido ao seu custo e complexidade. Dentro deste quadro, a forma mais correcta de se colocar a exigência de utilização de um sistema de pós-refrigeração, passa pela necessidade de se executar as injeções das juntas de contracção em apenas uma ou duas operações, ainda durante o período de construção.

Se a opção for recorrer a uma primeira campanha de injeções, ainda durante a fase de construção, e a campanhas posteriores de re-injeções, após a conclusão da obra, então é possível dispensar a pós-refrigeração, evitando os custos inerentes. Esta solução exige, no entanto, uma abordagem mais agressiva da pré-refrigeração, com os inevitáveis aumentos de custos associados.

7.3 Desenvolvimentos futuros

Tendo o autor desta dissertação observado, em condições relativamente idênticas, opções contraditórias sobre o recurso a sistemas de pós-refrigeração e, conseqüentemente, a necessidade de se considerar, ou não, campanhas complementares de re-injeção, pensa-se que pode ser relevante a criação de um quadro orientador que ajude a clarificar a tomada da decisão mais equilibrada.

REFERÊNCIAS

ACI (2005a) - ACI 207.1R – 05 – Guide to Mass Concrete.

ACI (2005b) - ACI 207.4R – 05 – Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete.

ACI (2007a) - ACI Education Bulletin E1- 07 – Aggregates for Concrete.

ACI (2007b) - ACI 207.2R – 07 – Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete.

ACI (2010) - ACI 305R – 10 – Guide to Hot Concreting.

ACI (2012) - ACI Education Bulletin E4-012 – Chemical Admixtures for Concrete.

ANDRIOLO, F.; SGARBOZA, B. (1993) – Inspeção e Controlo de Qualidade de Concreto, Edições Loyola, São Paulo.

APPLETON, J. (2013) – Estruturas de Betão Armado – Volumes 1 e 2, Edições Orion.

ARAÚJO, J.; AWRUCH, M. (1998) - Cracking Safety Evaluation on Gravity Concrete Dams During the Construction Phase. *Computers and Structures* 66, 93-104.

BOND, L.; KEPLER, W.; FRANGOPOL, D. (2000a) – Improved Assessment of Mass Concrete Dams Using Acoustic Travel Time Tomography. Part I – Theory. *Construction and Building Materials* 14, 133-146.

BOND, L.; KEPLER, W.; FRANGOPOL, D. (2000b) – Improved Assessment of Mass Concrete Dams Using Acoustic Travel Time Tomography. Part II – Application. *Construction and Building Materials* 14, 147-156.

BRAZÃO-FARINHA, J.; REIS, A. (1996) – Tabelas Técnicas, Edições Técnicas E.T.L.

CEN (2012) - EN 13163 – Thermal Insulation Products for Building. Factory Made Expanded Polystyrene (EPS) Products. Specification.

CHU, I.; LEE, Y.; AMIM, M.; JANG, B.-S.; KIM, J.-K. (2013) – Application of Thermal Stress Device for Prediction of Stresses Due to Hidration Heat in Mass Concrete Structure. *Construction and Building Materials* 45, 192-198.

EDP (2010) – Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua, Processo de Concurso, Tomo IIC – Caderno de Encargos – Condições Técnicas.

ESTEVES, M. (2011) – Modelação do Comportamento Térmico do Betão em Massa (Aplicação a uma Barragem de BCC), Dissertação de Mestrado, ULHT-FECN.

- GAJDA, J.; ALSAMSAM, E. (2006) – Engineering Mass Concrete Structures, PCA.
- GADJA, J.; SUMODJO, F. (2012) – Precooling Mass Concrete with Liquid Nitrogen. Air Liquide Industrial U.S. LP
- GONÇALVES, T.D.; BRITO, V.; VIDIGAL, F.; MATIAS, L.; FARIA, P. (2014) - Evaporation from Porous Building Materials and its Cooling Potential. Journal of Materials in Civil Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001174.
- INTECSA (1998) – Estudio del Enfriamiento Artificial del Hormigón de la Presa de Alqueva. Documento Interno SOMAGUE.
- IPQ (2002+2010) NP EN 12620+A1 – Agregados para Betão.
- IPQ (2005) NP EN 14216 – Cimento. Composição, Especificações e Critérios de Conformidade para Cimentos Especiais de Muito Baixo Calor.
- IPQ (2005+2009a) NP EN 13263-1+A1 – Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade.
- IPQ (2005+2009b) NP EN 13263-2+A1 – Sílica de Fumo para Betão. Parte 2: Avaliação da Conformidade.
- IPQ (2006) NP EN 450-2 – Cinzas Volantes para Betão. Parte2: Avaliação da Conformidade.
- IPQ (2007) NP ENV 13670-1 – Execução de Estruturas em Betão. Parte 1: Regras Gerais.
- IPQ (2008) NP EN 13791 – Avaliação da Resistência à Compressão do Betão nas Estruturas e em Produtos Pré-fabricados.
- IPQ (2009+2012) NP EN 934-2+A1 – Adjuvantes para Betão, Argamassa e Caldas de Injecção. Parte 2: Adjuvantes para Betão. Definições, Requisitos, Conformidade, Marcação e Etiquetagem.
- IPQ (2010) NP 4220 – Pozolanas para Betão, Argamassa e Caldas. Definições, Requisitos e Verificação da Conformidade.
- IPQ (2011) NP EN 13670 – Execução de Estruturas de Betão.
- IPQ (2012a) NP EN 197-1 - Cimento. Parte 1: Composição, Especificações e Critérios de Conformidade para Cimentos Correntes.
- IPQ (2012b) NP EN 450-1 – Cinzas Volantes para Betão. Parte 1: Definições, Exigências e Controlo de Qualidade.
- IPQ (2013) NP EN 206-1 – Betão. Parte 1: Especificações, Desempenho, Produção e Conformidade.
- IPQ (2014) NP EN 197-2 – Cimento. Parte 2: Avaliação da Conformidade.
- KTI (2011) - Concrete Cooling Systems. Technical Document.

- KTI (2013) - Water Chillers for Concrete Cooling (Green Line). Technical Document
- LERCH, W. (1955) – Hot Cement and Hot Weather Concrete Tests, PCA.
- LIU, X.; ZHANG, C.; CHANG, X.; ZHON, W.; CHENG, Y. (2015) – Precise Simulation Analysis of the Thermal Field in Mass Concrete with a Pipe Water Cooling System. *Applied Thermal Engineering* 78, 449-459.
- LNEC (2007a) - LNEC E461 – Betões, Metodologias para Prevenir Reacções Expansivas Internas.
- LNEC (2007b) - LNEC E464 – Betões. Metodologia Prescritiva para uma Vida Útil de Projecto de 50 e de 100 Anos Face às Acções Ambientais.
- MATA, J.; LEITÃO, N.; CASTRO, A.; COSTA, J. (2014) - Construction of Decision Rules for Early Detection of a Developing Concrete Arch Dam Failure Scenario. A Discriminant Approach. *Computers and Structures* 142, 45-43.
- MINEMURA, O.; SAKATA, N.; YUYAMA, S.; OKAMOTO, T.; MARUYAMA, K. (1998) – Acoustic Emission Evaluation of Arch Dam During Construction Cooling and Grouting. *Construction and Building Materials* 12, 385-392.
- NR KOELLING BV (2012) – HKCI Seminar, Hong Kong.
- NRMC (1962) – Cooling Ready Mixed Concrete. Publication 106.
- PCA (1987) – Concrete for Massive Structures. Concrete Information.
- QIAN, C.; GAO, G. (2012) – Reduction of Interior Temperature of Mass Concrete Using Suspension of Phase Change Materials as Cooling Fluid. *Construction and Building Materials* 26, 527-531.
- SANTOS, C.; MATIAS, L. (2006) – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. ITE 50, LNEC.
- SANTOS, E. (2013) – Análise Térmica de Barragens de Betão Durante a Construção (Aplicação à Barragem de Alqueva). Dissertação de Mestrado, IST.
- SANTOS, M.; BRITO J. (2008) – O Panorama Nacional das Reacções Álcalis-Sílica em Betões. *Revista Engenharia Civil da UM* 32, 57-71.
- SIKA (2007) – Catálogo de Fichas de Produto. Prontuário.
- SILVEIRA, A. (1961) – As Variações de Temperatura nas Barragens. Tese de Especialista – Memória nº 177, LNEC.
- SOMAGUE (2004) – Construção da Barragem de Alqueva. Documento Interno SOMAGUE.
- SOUSA-COUTINHO, J. (2006) – Materiais de Construção 2 – 1ª Parte. Ligantes e Caldas, FEUP.
- SUN, W. (2011) – Seismic Response Control of High Arch Dams Including Contraction Joint Using Nonlinear Super-Elastic SMA Damper. *Construction Building Materials* 25, 3762-3767.

- TELES, M. (1985) – Comportamento de Barragens de Betão, DEC-FEUP.
- USAGE (1997) – Engineering and Design. Thermal Studies of Mass Concrete Structures, ETL 1110-2-542.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1994) – Arch Dam Design, Engineer Manual nº 1110-2-2201, Washington.
- VARELA, N.; VIEIRA, F. (2005) – Cimento: Uma Matéria-Prima Essencial no Fabrico de Argamassa, SECIL.
- WANG, G.; ZHANG, S. (2014) – Damage Prediction of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion Shock Loading. *Engineering Failure Analysis* 39, 72 - 91.
- WANG, G.; ZHANG, S.; ZHOU, C.; LU, W. (2015) – Correlation Between Strong Motion Durations and Damage Measures of Concrete Gravity Dams. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* 69, 148-162.
- WHITE, F. (1999) – Mecânica dos Fluidos – 4ª Edição - McGraw Hill, Rio de Janeiro.
- WU, S.; CHEN, X.; ZHON, J. (2012) – Influence of Strain Rate and Water Content on Mechanical Behavior of Dam Concrete. *Construction and Building Materials* 36, 448-457.
- YANG, J.; HU, Y.; Zuo, Z.; JIN, F.; LI, Q. (2012) – Thermal Analysis of Mass Concrete Embedded with Double-Layer Staggered Heterogeneous Cooling Water Pipes. *Applied Thermal Engineering* 35, 145-156.
- ZHONG, H.; LIN, G.; LI, J. (2011) – Seismic Failure Modeling of Concrete Dams Considering Heterogeneity of Concrete. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 1678-1689.

WEBSITES

- [W1] www.mspc.eng.br/ciemat/cmat210.shtml
(27/02/2015).
- [W2] <http://emtemposc.blogspot.pt/2011/05/tabela-de-calor-especifico-da-agua-e-do.html>
(27/02/20215).
- [W3] www.oxigeniobrasil.com.br/nitrogenio.htm
(27/02/2015).