

Igreja da Santíssima Trindade - Santuário de Fátima: Concepção tendo em vista a durabilidade



J. Mota Freitas¹



Eugénio Maia²



Miguel Guimarães³

RESUMO

A elevada durabilidade pretendida para esta obra - superior a 100 anos - levou a que fossem tomados cuidados especiais na concepção e projecto da estrutura, selecção dos materiais, sua produção e controlo, bem como a adopção de algumas medidas adicionais especiais.

Referem-se aqui alguns aspectos relativos às peças estruturais mais relevantes, as vigas principais da cobertura da Igreja.

PALAVRAS-CHAVE

Betão Branco, Pré-Esforço, Durabilidade, Produção, Colocação, Controlo da Fissuração

¹ Prof. Catedrático Convidado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil; ETECLDA - R. Júlio Dinis, 911, 6º 4050-327 PORTO. etec@etec.pt

² Mestre em Eng. Civil - ETECLDA - R. Júlio Dinis, 911, 6º 4050-327 PORTO. em@etec.pt

³ Mestre em Eng. Civil - ETECLDA - R. Júlio Dinis, 911, 6º 4050-327 PORTO. mg@etec.pt

1. INTRODUÇÃO

Em concurso internacional, o Santuário de Fátima escolheu o Arqº grego A. Tombazis para elaborar o projecto da nova Igreja da Santíssima Trindade, a implantar no recinto de Fátima e com capacidade para cerca de 9 000 lugares sentados. Como autores do Projecto de Fundações e Estruturas, apresentamos nesta comunicação alguns aspectos relativos às peças estruturais que consideramos mais relevantes, as vigas principais da cobertura da Igreja.

Sendo uma obra marcante num local com um carisma especial, pretendeu-se garantir uma elevada durabilidade - superior a 100 anos - o que levou a que fossem tomados cuidados especiais na concepção e projecto das estruturas, selecção dos materiais, sua produção e controlo, bem como a adopção de algumas medidas adicionais especiais.

A definição das estruturas principais, a disposição das juntas de dilatação e de retracção, o faseamento construtivo cuidado e a disposição dos aparelhos de apoio tiveram em vista a redução a níveis mínimos dos esforços devidos às deformações impedidas, sem que no entanto se perdesse a continuidade das peças mais significativas e tirando-se assim o melhor partido do seu pré-esforço.



Figura 1. Vista geral da Igreja. (Fotografia aérea tirada de Nascente)

Os betões, de elevada resistência e compacidade, baixa permeabilidade e retracção controlada, permitiram uma redução muito significativa das tensões de tracção que surgem em elementos de betão com grandes dimensões; foram ainda dotados com agentes inibidores de corrosão. O recurso ao azoto líquido para controlo da temperatura de aplicação do betão em massa traduziu-se em benefícios na retracção e na durabilidade esperada.

Foram ainda adoptados critérios mais exigentes, no que respeita à verificação dos estados-limite associados à fendilhação, o que condicionou o nível de pré-esforço adoptado: este procurou atender aos esforços principais, aos produzidos pelas acções secundárias e à existência de zonas com variações significativas do estado de tensão.

2. BREVE DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

A nova Igreja da Santíssima Trindade situa-se a cerca de 250 m a Sudoeste da actual, no topo oposto do recinto do Santuário de Fátima (fig. 1). A área de intervenção ocupa um rectângulo com cerca de 230x155 m².

O corpo principal é constituído essencialmente por uma parede cilíndrica de betão armado, com 125 m de diâmetro e cerca de 15 m de altura média, atravessado na zona central por 2 vigas salientes de grande altura (variável de 4 a 14 m), de betão branco pré-esforçado (VPE), com 2 m de largura, afastadas entre si de 10 m (a eixo) e que constituem os apoios centrais das vigas metálicas da cobertura. Estas vigas, com os pilares que lhes estão associados, definem pórticos de grandes dimensões, atingindo 182 m de comprimento.

No lado Nordeste da Igreja, virado para o Recinto e a actual Basílica, foram executadas (em cave) zonas para capelas, foyer, instalações sanitárias, confessionários e respectivas áreas técnicas de apoio. A Sudoeste, lado dos principais acessos rodoviários, situam-se também em cave, as áreas técnicas principais da nova Igreja bem como as zonas de apoio aos serviços religiosos.

3. VIGAS PRINCIPAIS PRÉ-ESFORÇADAS - VPE: CONCEPÇÃO GERAL

Estas duas vigas, de betão branco armado pré-esforçado, constituem elementos de grande importância pela função estrutural que desempenham e pela mais-valia arquitectónica que conferem à obra.



Figura 2. Vista interior da Igreja. Vão principal e apoio central das VPE.

Apresentam uma altura significativa que varia linearmente desde Sudoeste (altura máxima de 14m) até Nordeste (altura mínima de 4m), resultando num elo de ligação visual entre o espaço da Grande Assembleia que envolvem, e as capelas onde os pilares mergulham após terem passado por cima do foyer, destacando-se de quaisquer outros elementos do edifício.

Resultam assim vigas de grande comprimento (cerca de 182m) e altura, sendo a sua secção vazada em caixão, o que permite um aligeiramento significativo a par de um elevado desempenho estrutural. Este vazamento é ainda aproveitado para facultar acessos técnicos à cobertura, bem como para o alojamento de equipamentos e instalações técnicas.

Os 3 pilares de apoios de cada viga são lâminas de betão armado de grande comprimento, complanares e solidárias com as vigas, definindo pórticos com 2 tramos contínuos. O maior (com cerca de 81m livres) vence a quase totalidade do espaço correspondente à Assembleia, recebendo as acções provenientes da sua cobertura; o menor, muito menos carregado, funciona como tramo de equilíbrio e prolonga-se até às capelas. Os pilares intermédios encontram-se encastrados em maciços de fundação e

*Igreja da Santíssima Trindade - Santuário de Fátima:
Concepção tendo em vista a durabilidade*

constituem pontos fixos destes pórticos. Os pilares extremos prolongam-se para além dos aparelhos de apoio respectivos: são também pré-esforçados, tanto ao nível superior como nas faces laterais, o que elimina as tensões de tracção inerentes ao seu funcionamento como consolas, tanto para a flexão como para o esforço transversal.



Figura 3. Pilares extremos dos pórticos principais, dotados de aparelhos de apoio móveis.

Os efeitos acumulados das variações de temperatura e da retracção do betão, associados à muito elevada rigidez, levou a que se adoptassem juntas nos apoios dos pilares extremos, com liberdade de movimentação longitudinal, sendo os esforços verticais e transversais transmitidos por intermédio de aparelhos de apoio adequados capazes de permitir deslocamentos longitudinais e rotações. Todos os dispositivos de apoio, tanto os principais que suportam as VPE como os que suportam as vigas metálicas da cobertura, houve o cuidado de prever a sua inspecção e manutenção, seja no que respeita



Figura 4. Aspecto dos aparelhos de apoio móveis dos pilares extremos das VPE.

à acessibilidade como à possibilidade de se recorrer a equipamentos hidráulicos de pequeno curso para se proceder à sua eventual substituição.

Estas vigas são assim, nas extremidades, completamente independentes da restante estrutura do edifício, nomeadamente da parede circular periférica, não se impedindo mutuamente de se movimentar: enquanto que as paredes por retracção e variação de temperatura tendem a apresentar movimentos limitados e crescentes em altura, normais às VPE, estas

tendem, por efeito das diversas acções, que mais à frente se referem, a movimentar-se longitudinalmente de forma significativa, apresentando ainda rotações no plano vertical e horizontal que fazem, portanto, variar este movimento tanto em altura como entre as duas vigas.

Eliminam-se assim os esforços que esses deslocamentos produziram, se impedidos, e permite-se que o pré-esforço seja eficaz, pois de outro modo seria quase integralmente transferido para as fundações.

Para o seu equilíbrio transversal, as vigas VPE são solidarizadas entre si por intermédio de uma laje e um conjunto de septos do mesmo material, situados em correspondência com os planos das vigas metálicas da cobertura a que dão apoio.

Para as acções horizontais provenientes da cobertura na direcção transversal às duas vigas VPE, estas funcionam assim em conjunto como uma única viga horizontal de grande altura cuja alma é constituída por esta laje que as liga. Na extremidade Sudoeste (a mais alta), dobra-se para baixo e prolonga-se na vertical até ao nível dos aparelhos de apoio, desempenhando o papel de parede de fecho posterior da Igreja e funcionando como gigante de solidarização dos dois pilares extremos, o que garante a respectiva estabilidade transversal, em conjunto com os pilares centrais.

Os pilares das extremidades Nordeste encontram-se soltos entre si ou de outros elementos que não as vigas que suportam, funcionando transversalmente como consolas.

O dimensionamento destas vigas principais foi muito condicionado por este funcionamento transversal global: para além dos esforços verticais usuais, consideraram-se as acções devidas à cobertura de grandes dimensões (variação de temperatura, o vento e os sismos) e às próprias vigas, sobretudo a variação diferencial de temperatura devida à exposição solar assimétrica. Esta assimetria existe tanto entre faces da mesma viga, como entre as duas vigas ou entre os banzos inferiores e superiores de uma mesma viga, sendo o seu efeito particularmente gravoso. Origina comportamentos alternados de tracção e compressão nas VPE ou esforços significativos de flexão e corte nos septos que as interligam que foram necessariamente atendidos na disposição, traçado e valor a adoptar para os respectivos pré-esforços.

A avaliação do efeito destas acções sobre a estrutura foi feita recorrendo-se a modelos globais e locais de elementos finitos, cujos resultados foram assimilados num modelo plano de barras que permitiu um estudo mais racional das VPE por si só, sobretudo no que à aplicação do pré-esforço diz respeito. Estes modelos foram também importantes pela aferição mútua que permitiram, apesar das diferentes formas de neles se exprimirem algumas das acções ou singularidades estruturais. Citem-se, por exemplo, o efeito das variações diferenciais de temperatura como esforços axiais no modelo plano, bem como a adequada consideração da rigidez dos grandes pilares intermédios na progressão dos esforços de flexão das VPE tomadas como vigas planas.

As acções aplicadas e os correspondentes esforços e tensões foram obtidos na sequência que simula a da construção. Houve também o cuidado de validar a sequência da construção, verificando a entrada em serviço das diversas fases da evolução da estrutura, com as acções inerentes ao seu peso próprio e aos pré-esforços aplicados em cada fase. Esta análise permitiu, aliás, simplificar um pouco a sequência inicialmente prevista como provável.

A ponderação do diagrama de esforços considerando as previsíveis migrações no tempo, em virtude da acomodação da estrutura na fase contínua devida à fluência do betão com o seu cálculo efectuado sobre a estrutura total final, face aos esforços obtidos considerando no cálculo a sequência da construção, foi feita de forma paritária. Este facto não se reveste, no entanto, da importância usual, dada a proximidade dos diagramas de esforços, nas duas circunstâncias.

4. ACÇÕES E VERIFICAÇÕES CONSIDERADAS

As acções consideradas foram avaliadas de forma tão abrangente quanto possível:

- Peso próprio (PP) dos elementos estruturais em betão armado ou pré-esforçado, aplicado na sequência: apoios, vão central, vão de equilíbrio, septos, lajes de ligação
- Pré-esforço (PE), de acordo com os seguintes parâmetros, por strand:
Área = 1.4 cm²; F_i = 200 kN; Entrada das cunhas = 5mm
Perdas instantâneas em linha: Coef. de atrito = 0.2; Desvio angular parasita = 0.0125 (rad)/m
Perdas elásticas iniciais e diferidas por fluência do betão e relaxação das armaduras: Valor estatístico obtido a partir de cálculo iterativo: -20% - Note-se que o pré-esforço médio

*Igreja da Santíssima Trindade - Santuário de Fátima:
Concepção tendo em vista a durabilidade*

adoptado, de valor elevado, conduziu a perdas diferidas superiores ao usual, o que também influenciou o seu valor inicial.

- Peso próprio da cobertura: estrutura metálica, lajes alveoladas, revestimentos e equipamentos
- Sobrecargas e Neve na cobertura
- Retracção do betão: -25° (embora se exija um betão com -10°)
- Variação uniforme e diferencial de temperatura das vigas
- Variação diferencial de temperatura entre vigas: equivalente a uma tracção de 14 MN ou a uma compressão de 33 MN.
- Levantamento de um aparelho de apoio, para manutenção (5 mm)
- Vento transversal às vigas, Sismo longitudinal e transversal às vigas

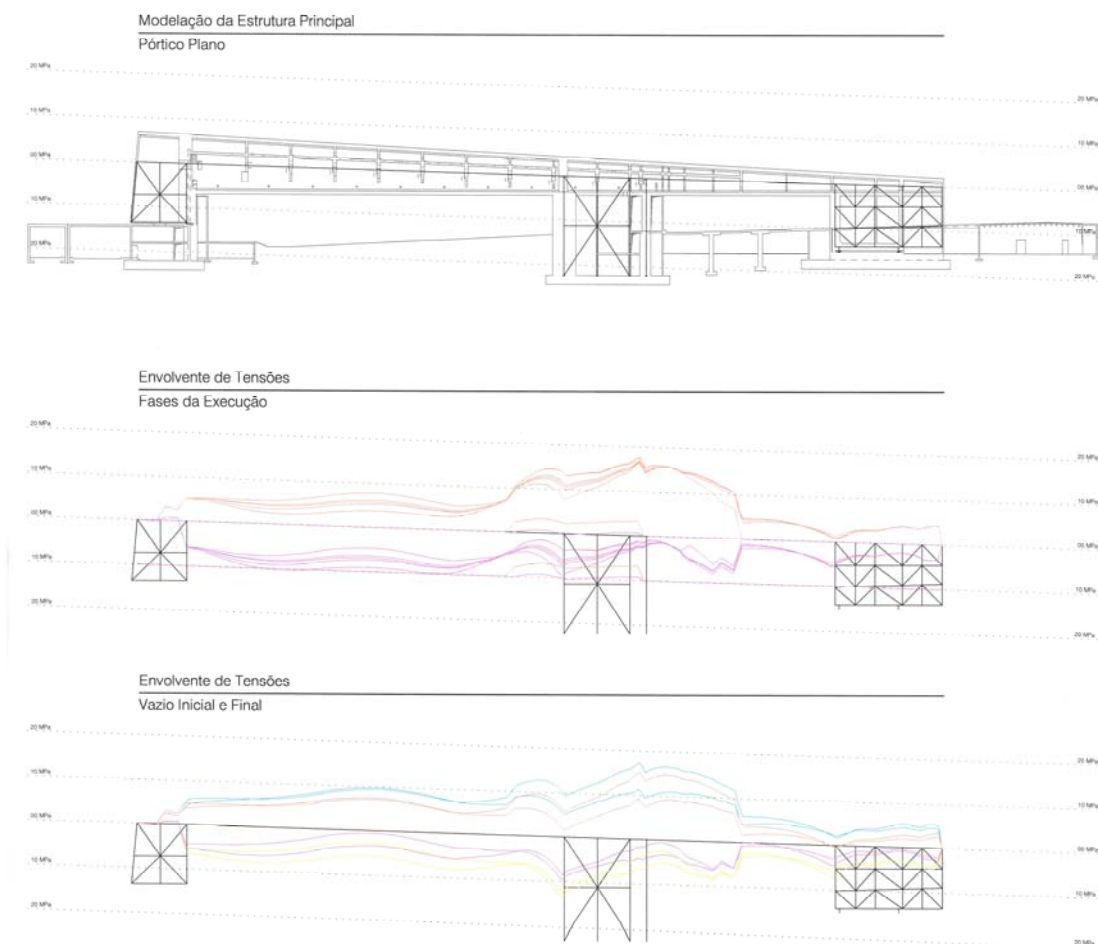


Figura 5: VPE – Diagramas de Tensões

A Fig. 5 ilustra o modelo de cálculo em pórtico plano e dois exemplos da configuração dos diagramas de tensões, a envoltória das fases da construção e as tensões em vazio, sem e com as perdas diferidas do pré-esforço (as tensões de compressão da fibra superior representam-se para cima e as da inferior para baixo do eixo da peça).

Estes diagramas mostram o modo como, adoptando critérios de verificação mais exigentes do que os habitualmente considerados, com destaque para as condições de serviço das secções de betão, tanto no que respeita às tensões aplicadas como à verificação dos estados limites associados à fendilhação, se condicionou significativamente o nível de pré-esforço adoptado, conseguindo-se a ausência de tensões de tracção com significado mesmo em combinações frequentes e de valor reduzido, não atingindo f_{ctk} , para as situações de carregamento extremo (combinações raras).

Assim, na linha do defendido por alguns autores, respeitaram-se os estados limite referentes às estruturas situadas em ambiente muito agressivo, relativos tanto quanto às armaduras ordinárias como

às de pré-esforço e aos respectivos recobrimentos - indo-se assim ao encontro das considerações feitas actualmente sobre condições de exposição e durabilidade na recente regulamentação europeia e nacional, que aumentam a classificação de uma estrutura em função da sua importância, dos dados que possa causar e da sua durabilidade pretendida.

5. DISPOSIÇÕES DE PROJECTO E SUA APLICAÇÃO

5.1 Pré-Esforços

O pré-esforço foi a grande ferramenta para se conseguir atingir este objectivo, procurando atender-se não só aos esforços principais como também aos efeitos das acções secundárias e à existência de zonas com variações significativas do estado de tensão, como sejam as juntas do faseamento construtivo, os cachorros de apoio da cobertura, as extremidades em consola das vigas VPE, os septos transversais, as lajes transversais e suas aberturas, para o que se dispuseram diversos sistemas específicos de cabos, evitando-se a fissuração que pudesse ocorrer em serviço e reduzindo a expressão da que pudesse ocorrer durante a execução da obra.

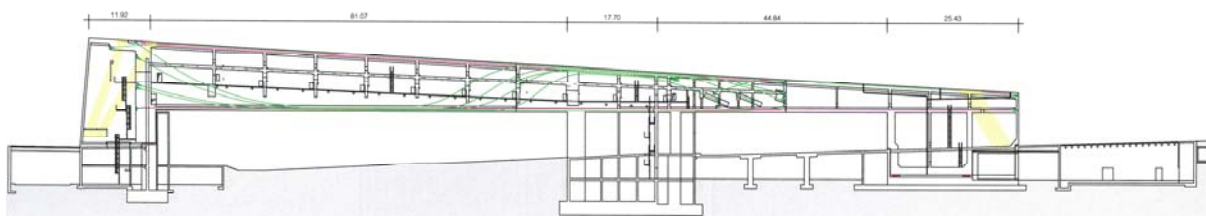


Figura 6: VPE – Esquema geral do Pré-esforço

Houve ainda um cuidado acrescido na pormenorização das zonas mais sensíveis da obra, tanto procurando para as peças geometrias que melhorassem o seu comportamento e exequibilidade e detalhando-se algumas zonas, com pormenorização individualizada de todos os varões e peças do pré-esforço.

5.2 Betão e sua aplicação

Sendo a execução uma oportunidade única de se intervir ao nível da qualidade dos betões, tanto quanto à elevada resistência e compacidade, baixa permeabilidade e retracção controlada, estes foram ainda dotados de agentes de protecção anticorrosiva, com efeitos tanto na reacção catódica como anódica do processo electroquímico da corrosão.

A execução destes elementos em betão branco impôs a utilização de medidas especiais na sua produção, aplicação e cura. A composição, produção e aplicação do betão foram sendo ajustadas com a execução de ensaios e protótipos à escala real, de forma a garantir a obtenção das características especificadas no projecto, tanto no que respeita ao seu aspecto final como às características mecânicas, de compacidade e permeabilidade avaliadas sobre carotes daí obtidas, como ainda da adequabilidade dos moldes e meios de vibração do betão atendendo às suas características de trabalhabilidade, fluidez e homogeneidade, das condições de aplicação e vibração - altura de descarga, espessura das camadas a vibrar atendendo ao tempo de espera entre elas, preenchimento das cavidades e zonas de maior densidade de armaduras ou bainhas de pré-esforço, tudo isto para se obter um betão sem segregação ou "chochos", pelo menos aparentes.

*Igreja da Santíssima Trindade - Santuário de Fátima:
Concepção tendo em vista a durabilidade*

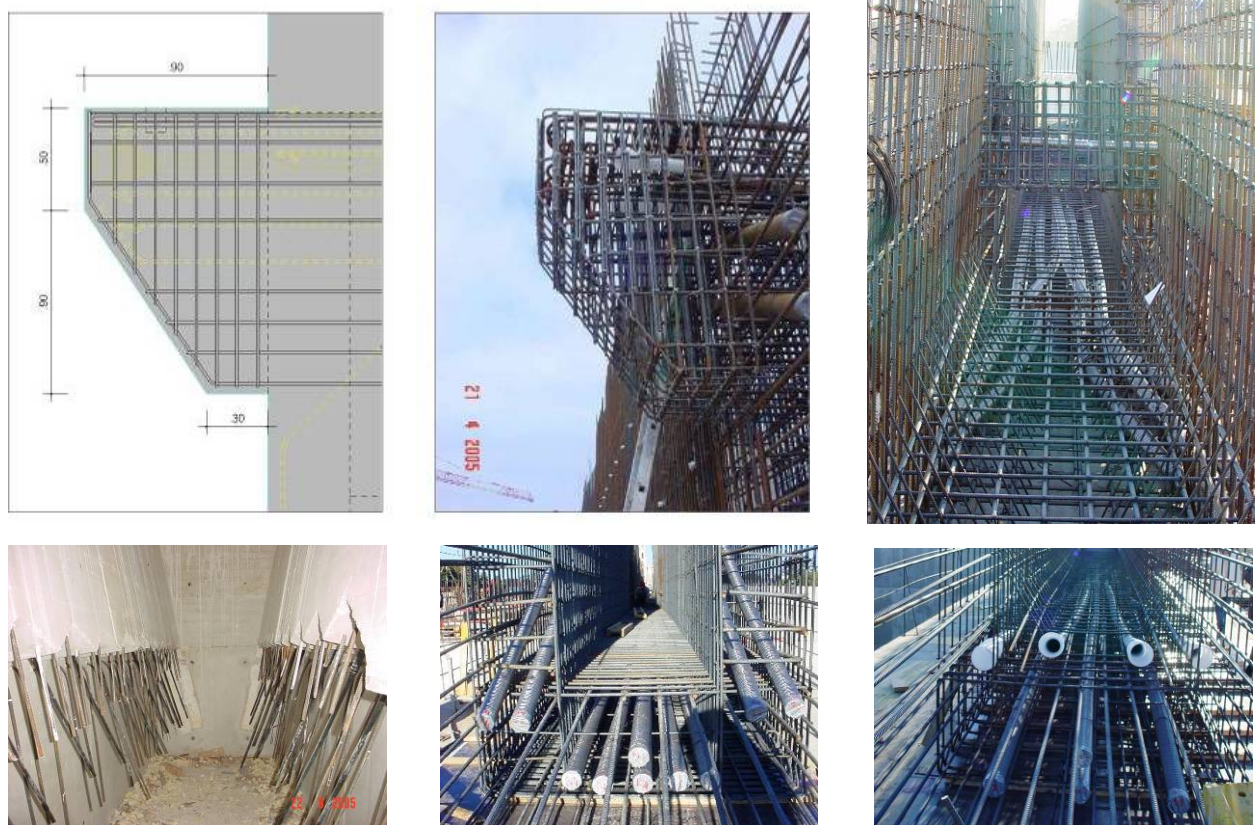


Figura 7. Aspectos particulares do Pré-Esforço:

Cachorros de apoio da Estrutura da Cobertura; Pré-esforços das Vigas e Septos; Pré-esforços de sustentação das consolas extremas

Outros cuidados, como o revestimento temporário com geotêxtil para evitar a dessecação e a exposição ao Sol mantendo a humidade superficial e protegendo-se da agressão de elementos da própria obra, ou então o prolongamento generoso das armaduras para lá das juntas de betonagem, também foram adoptados.

Realçam-se os cuidados com a cofragem, a criteriosa sequência de execução e a utilização de meios especiais para controlo da temperatura de aplicação do betão, de modo a cumprir o estipulado no projecto, limitando-se a 20 ° a temperatura de aplicação do betão para ter em conta o elevado calor de hidratação do cimento branco e a volumetria das peças. Dos procedimentos sugeridos o Empreiteiro recorreu com êxito, mesmo no período estival, ao arrefecimento do betão por azoto líquido à saída da central de produção, processo entre nós e na altura ainda pouco comum.

Este procedimento suscitou dúvidas quanto à possível formação de cristais de gelo que pudessem pôr em causa a uniforme cristalização e endurecimento do betão e, em consequência, as suas características finais. Por este motivo, foram sendo efectuados ensaios de comparação em diversas fases da obra, não se verificando diferenças nas características obtidas, o que permitiu neste caso, nestas condições específicas de produção e aplicação do betão, ultrapassar as



Figura 8: Aplicação de Azoto Líquido

reservas iniciais (validação que se recomenda seja efectuada, em cada caso).

A aferição da necessidade deste arrefecimento foi efectuada com base no acompanhamento de alguns termopares (sensores de temperatura) embebidos no betão, nas peças das primeiras fases de execução no montante de apoio central que apresentassem geometrias e massividades semelhantes às das vigas, sendo colocados com embebimentos correspondentes uns a meia espessura das paredes e outros a meia espessura dos banzos: Pode verificar-se no registo respectivo a importância da massividade da peça em causa e da temperatura inicial do betão no valor máximo atingido (esta diferença excede significativamente a da temperatura inicial!), que se verifica após as 24h, bem como o atraso relativamente uniforme da resposta ao ciclo da temperatura ambiente, que evidencia uma certa uniformidade também na temperatura de cada peça e portanto condutividades significativas: parece assim que o calor de hidratação terá sido gerado de forma decrescente por um período significativamente superior a um ou dois dias.

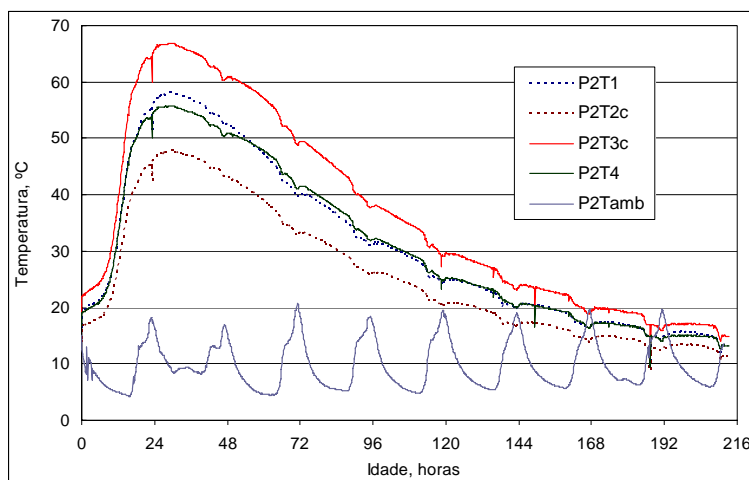


Figura 9: Evolução da temperatura no interior do betão

Este controlo da temperatura teve assim benefícios tanto na retracção como na durabilidade, praticamente eliminando os perigos do futuro desenvolvimento de reacções álcalis-agregados, expansivas (procurando que não se atingissem temperatura de 65°C ou superiores, conforme aliás a Especificação LNEC E 461:2004) e reduzindo a probabilidade de fendilhação devida à retracção e arrefecimento iniciais.

aplicado, que superam as requeridas, tanto no Módulo de Elasticidade como nas tensões resistentes à tracção e à compressão, verificou-se que no caso de surgimento de fendas estas teriam uma expressão significativa, o que chegou a ocorrer ainda nas primeiras peças, logo na fase inicial do seu endurecimento.

Considere-se uma avaliação do estado de tensão do betão devido ao seu arrefecimento e retracção iniciais, calculada de forma incremental para ter em conta a evolução com o tempo das grandezas intervenientes (módulo de elasticidade, resistência à tracção, arrefecimento retracção), obtidas a partir

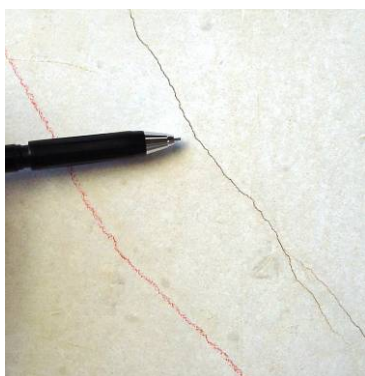


Figura 10: Exemplo de Fenda surgida na fase inicial

dos próprios elementos da obra, atendendo ao faseamento de betonagem que também foi avaliado nesta óptica. A fase considerada mais desfavorável foi a 11ª, por ser a fase superior do troço mais alto já com restrições anteriores à deformação. Aplicou-se um arrefecimento de 5° a este troço, para diferentes valores do seu módulo de elasticidade, obtendo-se tracções tanto na ligação ao painel da esquerda como, cobretudo, ao inferior.

Admitiu-se que o arrefecimento total, 30°C se dava em 6 dias, considerando o efeito favorável do aquecimento conferido pela reacção de presa também ao betão adjacente (5°C). Evitou-se o maior aquecimento que se produziria na massa de betão superior, betonando a parte central numa fase posterior.

Para a retracção admitiu-se uma lei bilinear com um valor inicial próximo de 1°C/dia nos 3 primeiros dias reduzindo-se a 0.2°C/dia nos seguintes. Considerou-se que a partir do 15º dia a retracção remanescente se dá uniformemente em toda a peça, não gerando portanto tensões internas significativas.

*Igreja da Santíssima Trindade - Santuário de Fátima:
Concepção tendo em vista a durabilidade*

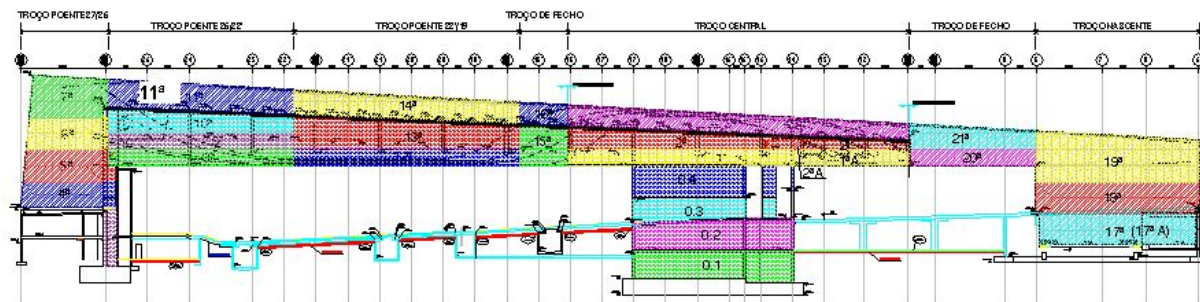


Figura 11: Fases da betonagem de cada VPE

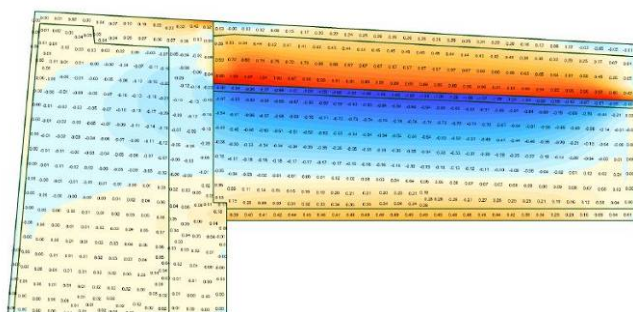


Figura 12: Tensões para um arrefecimento de 5°C do painel superior já endurecido ($E=43\text{GPa}$)

Consideraram-se a concorrência de alguns efeitos favoráveis: A instalação de uma tensão inicial de compressão devida ao peso do betão (50% da "hidrostática"), a participação da fluência já nesta fase, avaliada em 5.4% por dia de vida de cada acréscimo de tensão, o contributo das armaduras e sobretudo a deformação da própria peça anteriormente betonada, conforme obtido do cálculo efectuado sobre um modelo de elementos finitos.

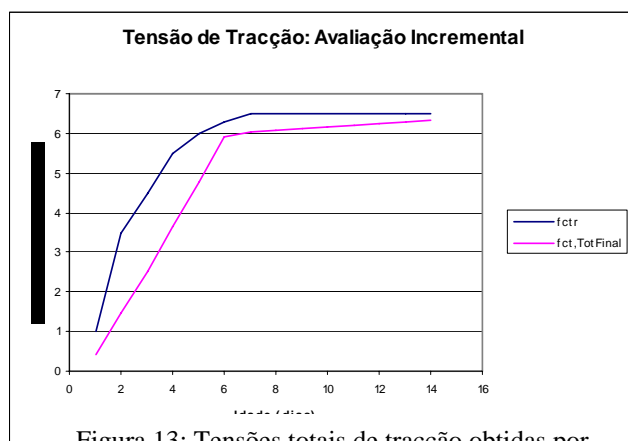


Figura 13: Tensões totais de tracção obtidas por avaliação incremental e comparação com a tensão resistente de tracção do betão.

O resultado obtido, ilustrado na figura, com um traçado das tensões actuates e resistentes muito próximo, realça a importância de todos os cuidados que foram postos nesta obra, como descrito. Foi assim possível executar a obra sem fendilhação ou fissuração significativas, com um acréscimo limitado do custo da obra e certamente com um impacto positivo na sua qualidade plástica perceptível no contacto directo com o usufruto público, e no prolongamento da sua vida esperada.

AGRADECIMENTOS

Pelas indicações dadas para a elaboração deste artigo, agradecemos a colaboração da Profª Engª Ana Mª Proença, da FEUP, e da Engª Ângela Nunes, da Secil.