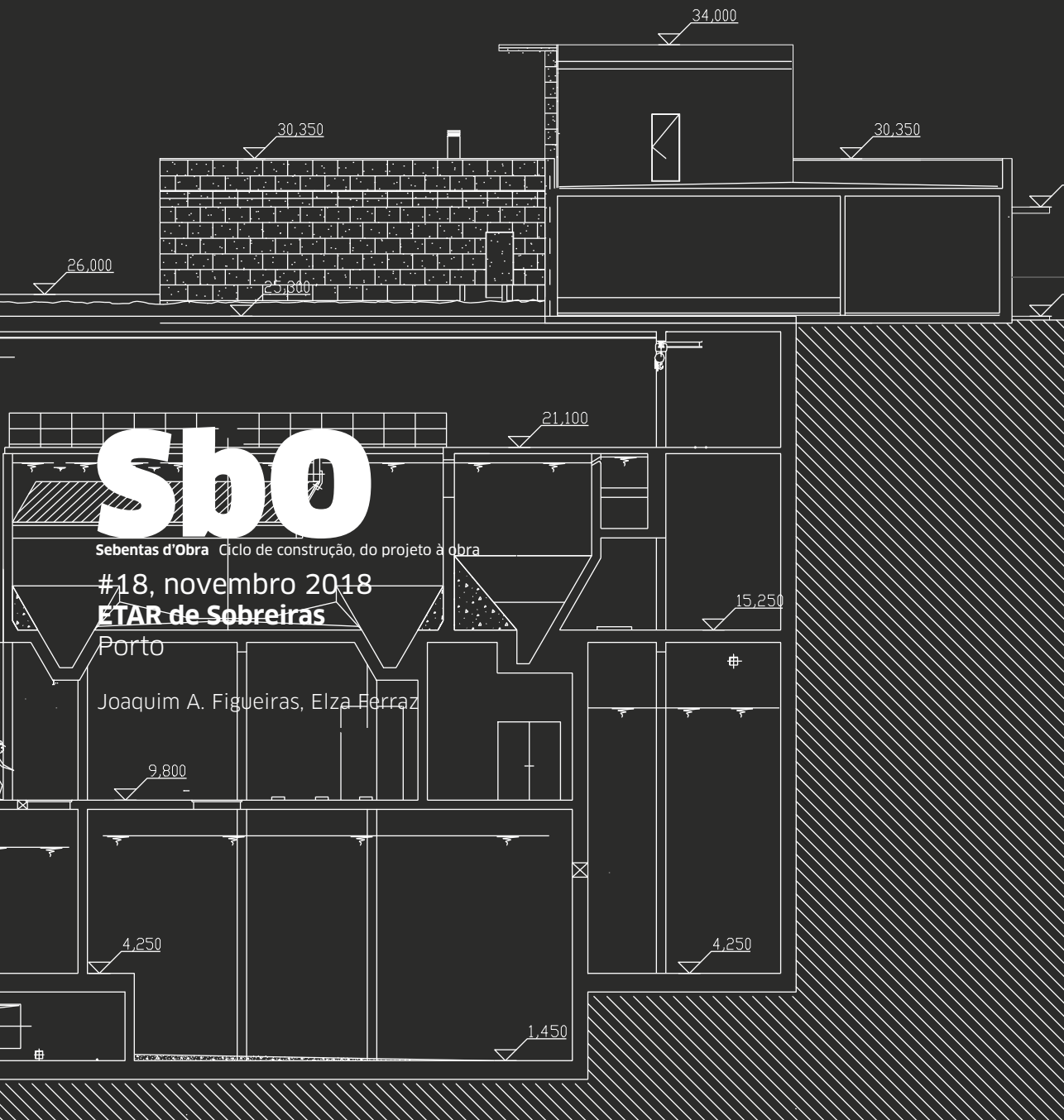




Sbo

Sebentas d'Obra Ciclo de construção, do projeto à obra

#18, novembro 2018

ETAR de Sobreiras

Porto

Joaquim A. Figueiras, Elza Ferraz

Editor

Cadernos d'Obra

Diretor

Vitor Abrantes

Coordenação Editorial

Bárbara Rangel

Comissão Editorial

Abel Henriques

Ana Sofia Guimarães

António Silva Cardoso

Joaquim Poças Martins (presidente da OERN)

Paulo Conceição

Rui Faria

Conceção Gráfica

Incomun

Textos

Elza Ferraz

Joaquim A. Figueiras

Créditos Fotográficos

Dos autores

Impressão

Rainho e Neves

2.ª edição, setembro 2019

Depósito legal: 336727/11

ISSN 2184-6065

Tiragem: 500 exemplares

Preço por número

4,50 euros

Publicação periódica

n.º 18. Ano IV, novembro 2018

Propriedade

FEUP/DEC

R. Dr. Roberto Frias s/n

4200-465 Porto

Portugal

Tel./fax: + 351 22 508 19 40

cdo@fe.up.pt

É proibida a reprodução sem a autorização escrita dos autores e do editor.

A exatidão da informação, os copyrights das imagens, as fontes das notas de rodapé, bem como a bibliografia, são da responsabilidade dos autores dos artigos, razão pela qual a direção da revista não pode assumir nenhum tipo de responsabilidade em caso de erro ou omissão.

Iniciativa e produção

Departamento de Engenharia Civil da FEUP

Com o apoio de

Universidade do Porto

Câmara Municipal do Porto

Ordem dos Engenheiros Região Norte

A iniciativa “Fora de Portas engenharia civil à mostra”, resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil da FEUP, a Mostra da UP e o Município do Porto. Realiza-se no contexto da iniciativa Porto Innovation Hub (PIH), que pretende envolver os cidadãos e visitantes da Invicta na descoberta da inovação que transformou a cidade nos últimos séculos. Através da visita a locais históricos e infraestruturas emblemáticas do Porto, procura-se demonstrar o impacto direto da inovação na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. O PIH é uma iniciativa do Município do Porto que pretende ser uma plataforma para o fortalecimento do ecossistema de inovação e empreendedorismo da cidade, contribuindo desta forma para que o Porto se possa destacar no panorama nacional e internacional como uma cidade inovadora e criativa. O PIH propõe a criação de um espaço de experimentação e laboratório vivo, potenciando cenários e oportunidades de desenvolver novos produtos, métodos ou conceitos à escala urbana, contribuindo, assim, para a cultura de transformação para a inovação.

Editorial. Nas edições anteriores, procuramos perceber como se faz o abastecimento de água na nossa cidade: no manancial de Arca d'Água vimos onde nasce e como, até ao século passado, este canal alimentava a cidade; no reservatório dos Congregados, vimos como hoje, apenas usando a força da gravidade, se distribui a água pelo Porto Gravítico, desde a sua área oriental à ocidental. Nesta edição, as Águas do Porto ajudam-nos agora a perceber como se “lava” a água no Porto, visitando a Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de Sobreiras em Lordelo do Ouro. Já lá vai o tempo em que a água voltava para o rio sem qualquer filtro, pondo em causa a qualidade da água consumida. Agora, a água sofre um conjunto de tratamentos de limpeza e depuração, para que, quando chega ao rio está suficientemente limpa para entrar novamente no processo de abastecimento.

Esta ETAR, assente numa área de 1,6 ha, por estar inserida numa zona urbana complicada, uma encosta densamente urbanizada, usa também como força motora para a limpeza da água a gravidade. Numa estrutura compacta distribuída por níveis, a água vai descendo da cota mais alta, passando por diferentes níveis a que correspondem distintas funções de limpeza até finalmente chegar novamente à cota do rio. Numa primeira fase, a linha líquida, faz-se a limpeza maior por vários processos de decantação. De seguida, por centrifugação, faz-se a remoção das lamas. No final, por se tratar de uma área habitacional, faz-se a purificação do ar resultante deste processo. Por se tratar duma estrutura de grandes dimensões que alberga grandes quantidade de água, o projeto de estruturas teve de ser especialmente cuidado. Desde 2003, por dia, é tratado nesta estrutura um caudal médio de 54 000 m³, corresponde aos efluentes de uma população de 200 000 habitantes.

A Eng.^a Elza Ferraz, responsável pelo funcionamento desta ETAR, explica-nos nesta **Sebenta d'Obra** como se processa esta limpeza e o Prof. Joaquim Figueiras, autor do projeto de Estruturas, dá-nos a conhecer a complexidade deste enorme “decantador”.

Bárbara Rangel
Porto, 4 novembro 2018

ETAR de Sobreiras





Breve descrição

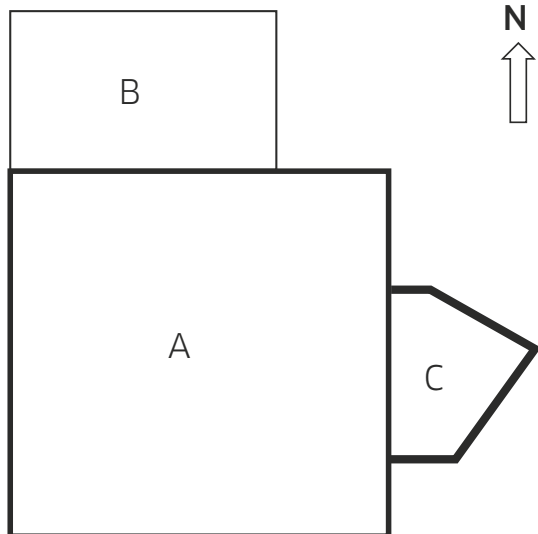
A ETAR de Sobreiras, localizada na freguesia de Lordelo do Ouro, é uma das duas ETAR existentes na cidade do Porto. Ocupa uma área de 1,6 ha e apresenta uma envolvente habitacional densa. Tendo sido iniciada a sua atividade no ano 2003, foi dimensionada para servir uma população equivalente de 200.000 habitantes e para tratar um caudal médio diário de 54.000 m³/dia. As características dos afluentes brutos consideradas no dimensionamento da ETAR, bem como a qualidade do efluente tratado são as que se apresentam no quadro seguinte:

Parâmetros/Unidade	Afluente	Efluente tratado
Sólidos suspensos totais, mg/L	400	25
Carência bioquímica de oxigénio, mg/L	309	25
Carência química de oxigénio, mg/L	626	125
Azoto total Kjeldahl, mg/L	71	15
Fósforo total, mg/L	14	10
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	10 ⁷	800

Processo de tratamento

De um modo global, pode dizer-se que o processo de tratamento preconizado para a ETAR de Sobreiras abrange três linhas fundamentais: a linha líquida, a linha de lamas e a linha de desodorização. As várias etapas de tratamento localizam-se e distribuem-se por três blocos, A, B e C, conforme indicado na figura ao lado.





Bloco A: Tanques de tratamento biológico; Decantadores secundários.

Bloco B: Desengorduradores/ desarenadores; Decantadores primários; Reatores biológicos de gorduras; Filtros de areia; Bacias de armazenamento de água; Bacias de armazenamento de lama; Canal de desinfecção UV; Canal de bypass;

Sala de compressores; Sistema de água industrial; Salas de quadros elétricos.

Bloco C: Obra de entrada e elevação inicial; Centrifugas de desidratação de lama; Torres de desodorização; Zona de armazenamento de produtos químicos e subprodutos

A) Linha líquida

A linha líquida é constituída por gradagem, desarenamento, desengorduramento, decantação primária lamelar, tratamento biológico por lamas ativadas, filtração terciária em areia e desinfecção UV.

As águas residuais são conduzidas para a ETAR através de dois interceptores, interceptor marginal (Douro) e interceptor litoral (orla atlântica ou Foz), e um coletor geral, coletor geral da zona Norte.

A.1 Tratamento preliminar e tratamento primário



Chegadas à ETAR, as águas residuais sofrem uma gradagem, com vista à remoção dos detritos mais grosseiros de forma a proteger os equipamentos a jusante.

A gradagem funciona em três canais em paralelo (um deles em reserva), cada um comportando uma grelha vertical de acionamento mecânico.

Os efluentes provenientes da gradagem seguem para um poço de bombagem, local onde ocorre a elevação inicial para tratamento, através de três bombas submersíveis pertencentes a um conjunto de quatro, e dimensionado para um caudal de 4500 m³/h (caudal de ponta do projeto).

O efluente elevado é submetido ao um triplo tratamento contemplando remoção de areias (desarenamento), remoção de óleos e gorduras (desengorduramento) e decantação primária. Esta remoção é realizada em órgãos de tratamento denominados de "SEDIPAC 3D®".

O seu funcionamento caracteriza-se pela combinação das diferentes etapas em três zonas distintas:

- Desarenamento – através de rampas de difusão de ar comprimido equipadas com difusores de bolha média é assegurada a separação das areias da matéria orgânica que as envolve. Cada Sedipac 3D® está equipado com quatro fossas de extração de areias, sendo estas extraídas de cada uma dessas fossas graviticamente para um coletor comum, e enviadas para um classificador de areias mecanizado situado no hangar de lamas.



em suspensão. As lamas decantadas são raspadas por intermédio da ponte raspadora de fundo para quatro fossas situadas junto aos cantos da zona de decantação e encaminhadas para a bacia de mistura de lamas. O efluente depurado é recolhido por transbordo sobre caleiras na parte superior e é enviado para tratamento secundário ou biológico enquanto as lamas se vão acumular na parte inferior do decantador.



Desengorduramento - esta operação desenrola-se em quatro cubas por Sedipac 3D®, as quais são atravessadas pelo efluente em fluxo ascendente. Cada uma das cubas está equipada com um arejador mecânico submersível de bolha fina. A conjugação de duas correntes ascendentes (ar e água) permite uma maior facilidade de “aprisionamento” das gorduras pelas bolhas de ar, favorecendo a flotação. Uma vez chegadas à superfície, as gorduras flotadas são conduzidas, pela corrente criada, para uma caleira pivotante de recolha motorizada, a qual as encaminha para um poço. Daqui as gorduras são enviadas graviticamente para o tratamento biológico das gorduras.



A.2 Tratamento biológico das gorduras

O tratamento das gorduras é realizado em 2 reatores biológicos aeróbios segundo um processo de patente Degremont: o Biomaster®.

O princípio do Biomaster® é o mesmo de uma lama ativada clássica: as gorduras recolhidas na zona do desengorduramento dos Sedipac 3D® são enviadas para uma caixa de entrada. Dessa caixa as gorduras passam por descarga superficial para os reatores biológicos, onde entram em contacto com a biomassa depuradora. Esta biomassa é particularmente adaptada à degradação de gorduras (substrato carbonado), transformando-as em água e anidrido carbónico.

A.3 Tratamento secundário/biológico

A depuração biológica do efluente, após tratamento primário, realiza-se em dois “Reatores de Biomassa

Dispersa” funcionando num regime de baixa carga.

Esta etapa do tratamento é, certamente, uma das mais importantes na cadeia de depuração; com efeito, neste estágio ocorre:

- a eliminação das poluições carbonáceas (expressas sob a forma de CBO_5 e CQO),
- a eliminação das poluições azotadas através da sua conversão em diferentes formas de azoto (nitratos e, em seguida, azoto gasoso),
- a eliminação, por assimilação, da poluição proveniente do fósforo,
- a retenção das poluições coloidais existentes nas matérias em suspensão sob as três formas anteriores.



Este tipo de tratamento permite o funcionamento dos reatores biológicos de biomassa dispersa em função da evolução das cargas.

A.4 Decantação secundária



Após sofrer um processo de desgaseificação o efluente seguirá graviticamente em direção aos decantadores secundários.

Os decantadores secundários (quatro) são do tipo retangular (com fundo sem inclinação longitudinal) e estão equipados com pontes raspadoras individuais.

A equi-repartição dos efluentes nos quatro órgãos de decantação é feita por um conjunto de descarregadores.

Os efluentes clarificados são recolhidos na parte superior dos decantadores através de um conjunto de tubos perfurados e são enviados graviticamente para filtros de areia.

A.5 Filtração terciária em areia

À saída do tratamento biológico, as águas clarificadas sofrem um tratamento terciário.

Este tratamento, composto por 4 filtros de areia abertos, aumenta o rendimento de remoção de matérias em suspensão e, por consequência, o rendimento de remoção de CBO_5 . Por outro lado, a retenção das matérias em suspensão no filtro permite aumentar a transmitância da água filtrada, o que favorece o tratamento de desinfeção por ultravioletas.

A água filtrada sai do filtro através de uma tubagem localizada sob o fundo falso de cada filtro e é encaminhada para desinfeção.

A.6 Desinfecção UV



A desinfecção por raios ultravioletas utiliza a propriedade que possuem os UV, no comprimento de onda de 254 nm, de destruir os microrganismos por rutura das cadeias de ADN portadoras da informação genética.

A água filtrada entra graviticamente num canal equipado com o sistema de desinfecção, passando posteriormente em direção a uma Cisterna de Água Tratada, que representa uma reserva de água desinfetada e que pode ser utilizada para irrigação dos espaços verdes, lavagem das redes viárias da estação e das viaturas ou para qualquer outra necessidade de água não potável.

As águas tratadas são encaminhadas para o meio recetor, rio Douro, através do emissário subestuarino existente.

B) Linha lamas

O tratamento de lamas consiste num espessamento das lamas brutas realizado em dois órgãos distintos:

- espessamento por flotação das lamas biológicas em excesso,
- mistura e homogeneização das lamas biológicas espessadas com as lamas primárias, seguido de uma desidratação mecânica, estabilização química e armazenamento.

B.1 Espessamento de lamas biológicas



As lamas em excesso de cada uma das linhas de tratamento biológico são extraídas ao nível dos órgãos de desgaseificação por dois grupos eletrobomba em direção a um flotador de lamas (flotação de lamas).

As lamas flotadas são removidas do efluente, através de um sistema de insuflação de ar a alta pressão. Este quando entra no flotador vai descomprimir dando origem à libertação de microbolhas que, ao seguirem o seu movimento ascensional em direção à superfície arrastam consigo as partículas de lamas. O resultado é a formação de uma espessa camada de material flutuante, a qual será raspada permanentemente por uma ponte raspadora e descarregada para uma cuba apropriada.

B.2 Bacia de mistura de lamas

Na bacia de mistura de lamas, as lamas primárias (extraídas na decantação lamelar do tratamento primário) são misturadas com as lamas biológicas flotadas através de um agitador submersível.

B.3 Desidratação, estabilização e armazenamento de lamas



As lamas homogeneizadas na bacia de mistura de lamas são desidratadas em duas de três centrífugas, existindo uma terceira como reserva mecânica das outras duas.

Esta operação tem como objetivo reduzir o teor de humidade das lamas até aproximadamente 25% de matéria seca.

Com recurso ao doseamento de cal viva as lamas desidratadas provenientes da centrífuga, são estabilizadas quimicamente. Esta etapa ao elevar o pH das lamas permite fazer a higienização das mesmas.

Antes de se proceder ao transporte a destino final, as lamas são armazenadas em dois silos com uma capacidade de aproximadamente 270 m³.

C) Linha de desodorização

Dadas as características da instalação e da envolvente habitacional, o ar poluído é tratado em torres de lavagem química.

A ETAR de Sobreiras está equipada com uma linha de tratamento de odores constituída por um circuito de extração generalizada do ar viciado do interior de todos os órgãos de tratamento, conduzindo-o a um sistema específico.



O processo de desodorização aplicado na estação de tratamento é do tipo adsorção gás-líquido. Os lavadores utilizados são torres de enchimento plástico que funcionam em contracorrente, com a adição de reagentes de neutralização (ácido sulfúrico, hipoclorito e soda).

O processo consiste na instalação de três colunas de absorção com enchimento – igualmente denominadas

torres de lavagem – de tipo vertical, com escoamento em contracorrente, nomeadamente:

- lavagem ácida (primeira torre) com ácido sulfúrico, consiste numa reação de neutralização, a qual elimina o amoníaco e as aminas.
- lavagem oxidante (segunda torre) com hipoclorito de sódio, elimina o sulfureto de hidrogénio, os sulfuretos orgânicos, os mercaptanos, mas também o amoníaco e as aminas.
- lavagem alcalina (terceira torre) com soda elimina os ácidos carboxílicos, o sulfato de hidrogénio, os mercaptanos e também em parte o CO₂.

O ar, após tratamento, é lançado no exterior, de forma controlada, sem emissão de odor desagradável.



Elza Ferraz

Conceção estrutural: especificidades do projeto e da construção

Sumário

A ETAR de Sobreiras, em exploração há 15 anos, é uma ETAR compacta em que os vários órgãos e reservatórios se encontram num mesmo edifício dispostos em diferentes níveis de forma a otimizar os processos de tratamento das águas residuais. É composta por três corpos com funções diferenciadas e separados estruturalmente por juntas de dilatação sendo o Corpo A, de 61x63 m² de planta e 15 metros de altura constituído por 2 pisos de reservatórios sobrepostos, e o Corpo B, de 27x45 m² em planta e 20 metros de altura composto por 7 níveis com funções diversificadas, sendo estes dois os corpos mais relevantes em termos estruturais.

Neste documento é efetuada uma descrição sumária da obra de Engenharia Civil e discutidas as principais opções que foram tomadas no desenvolvimento do projeto de estruturas tendo em conta a estabilidade do edifício e o seu desempenho e durabilidade na fase de exploração. Na análise e discussão do presente documento deve ser tido em conta que o projeto de execução da ETAR de Sobreiras foi desenvolvido há cerca de 18 anos. São ilustrados alguns elementos do projeto e de fases da construção, bem como do estado de conservação da estrutura de betão observado durante a visita realizada em setembro de 2018.

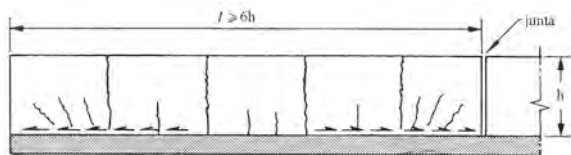
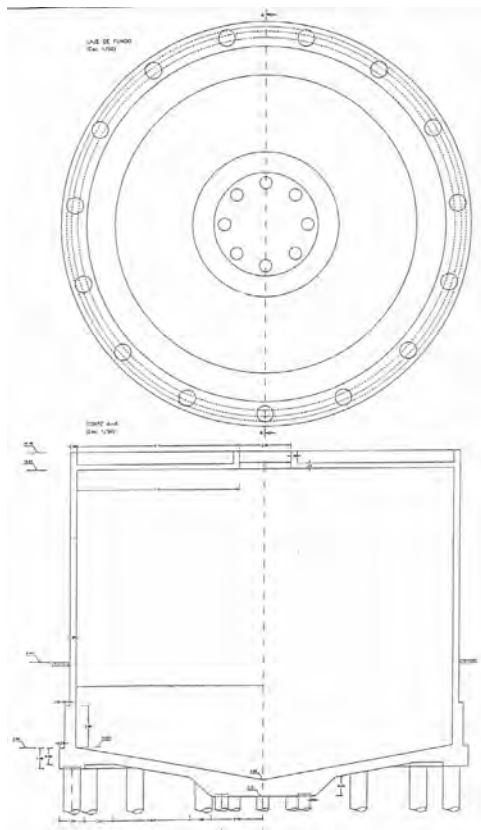
1. Introdução

No início do século XXI assistimos, em Portugal, a um incremento significativo na construção de Estações de Tratamento de Águas (ETAs e ETARs) que consistem em geral em estruturas de grandes dimensões, com elevado

grau de monolitismo e essencialmente constituídas por elementos de betão com comportamento bidimensional. Os órgãos fundamentais destas construções são reservatórios cilíndricos ou retangulares de dimensões significativas formados por estruturas laminares de betão armado e pré-esforçado.

Na conceção e dimensionamento da estrutura de betão das Estações de Tratamento de Águas (ETAs) e de Águas Residuais (ETARs) são três as questões mais relevantes que se podem colocar à generalidade dos projetistas. A opção pelo tipo de fundação a utilizar e a sua implicação no custo e no comportamento global da obra é a primeira das questões. São, pela sua função, construções muitas vezes implantadas em solos aluvionares e heterogéneos. Os reservatórios são por outro lado órgãos muito sensíveis a assentamentos diferenciais, daí que a opção por fundações diretas possa constituir um risco acrescido para garantir a durabilidade da obra. A opção por fundações indiretas (por estacas) se diminui este risco encarece significativamente a estrutura da base do reservatório sujeita a elevadas pressões do líquido (Fig. 1).

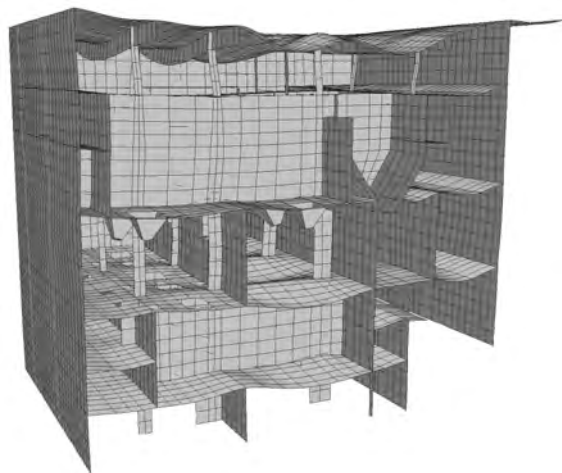
A segunda questão que nos referimos diz respeito ao controlo e dimensionamento da estrutura para as ações indiretas – deformações impostas. Sendo estruturas de elevado grau de monolitismo e em que o controlo da fendilhação tem de ser apertado para garantir estanqueidade e durabilidade, os esforços induzidos pelas variações térmicas e pela retração do betão assumem um papel de relevo na conceção e no dimensionamento das ETARs (Fig. 2). Os problemas relacionados com a composição e maturação do betão, e com o faseamento construtivo adquirem importância significativa na



qualidade e durabilidade deste tipo de estruturas.

A terceira e última questão refere-se à análise e dimensionamento das estruturas laminares de betão armado e/ou pré-esforçado que constituem os órgãos das estações de tratamento. No nosso meio técnico é reconhecida a dificuldade adicional para proceder à análise e dimensionamento de estruturas laminares de betão não só pela acrescida complexidade que este tipo estrutural apresenta, mas sobretudo pela deficiente

formação de base ministrada nos cursos de engenharia e pela ausência de regras normativas para a análise e dimensionamento de estruturas laminares de betão. De facto, a regulamentação nacional (REBAP) [1] e as Escolas de Engenharia tratam de forma detalhada a análise e o dimensionamento de vigas e pilares (estruturas porticadas) de betão armado e pré-esforçado e omitem ou reduzem à expressão mais simplista o tratamento das lajes, das paredes e das cascas de betão (Fig. 3). A utilização da nova regulamentação europeia, nomeadamente do Código Modelo CEB-FIP [3] e do Eurocódigo 2 [4], tem vindo a mitigar este problema.



2. ETAR de Sobreiras – conceção estrutural

A ETAR de Sobreiras junto à Foz do Rio Douro pode ser vista como um edifício diferenciado com cobertura ajardinada e cercado de árvores, inserido numa zona habitacional do Porto junto à margem do rio perto da foz (Fig. 4). Contrariamente à maioria das ETARs, que apresentam os vários órgãos em construções separadas e ao mesmo nível, a ETAR de Sobreiras é uma ETAR compacta em que os vários órgãos e reservatórios se encontram num mesmo edifício, dispostos em diferentes níveis de forma a otimizar os processos de tratamento das águas residuais. O efluente que chega à cota baixa é inicialmente elevado para a cota alta, sendo a partir daí a circulação gerada pela ação da gravidade

Fig. 1. Reservatório circular da ETAR do Freixo com a base assente em estacas sujeita à pressão do líquido com 18 metros de altura.

Fig. 2. Fendilhação em parede de betão, ligada à fundação ou a etapa prévia de betonagem, devida à deformação impedida.

Fig. 3. Ilustração do modelo (deformado por ação das cargas) usado na análise do Corpo B da ETAR de Sobreiras, observando-se o monolitismo e complexidade da estrutura constituída por elementos laminares de betão.

desnívelando sequencialmente os diferentes órgãos intervenientes no processo.

O edifício da ETAR de Sobreiras tem a sua estrutura separada por juntas de dilatação formando 3 corpos (ou edifícios) com funcionamento estrutural independente, 3 edifícios esses que acomodam órgãos com funções diferenciadas no processo de tratamento e por isso são naturalmente separados. A Fig. 5 ilustra a separação nos 3 corpos, bem como uma planta e um corte dos desenhos de projeto.

O maior edifício da ETAR, o Corpo A, é basicamente constituído por dois níveis de reservatórios, sobrepostos em planta de 63x61 m². O tanque superior desenvolve-se a partir da cota 13,40 até à cobertura (cota 20,45), com cerca de 7 m de altura de líquido. O tanque inferior, com menor altura de líquido, desenvolve-se desde a laje de fundo (cota 5,40), até à cota 10,00, apresentando as paredes de separação (PAR5 a PAR7) grandes aberturas na parte superior. As paredes à cota superior, PAR8 a PAR12, servem de apoio (suspendem) a laje intermédia e suportam a laje de cobertura, apoiando-se nas intersecções com as paredes PAR5 a PAR7. Estas intersecções, dada a sua configuração em planta e as elevadas cargas a serem transmitidas, constituem zonas críticas do dimensionamento estrutural deste corpo.

As quatro paredes exteriores apresentam uma geometria idêntica, com uma espessura entre a fundação e a laje intermédia de 0,50 m e entre esta e a laje de cobertura uma espessura linearmente variável entre 0,50 e 0,30 m. A solução assim obtida apresenta uma elevada rigidez às ações horizontais necessitando, no entanto,

de um cuidadoso controlo da deformação e fendilhação devida aos efeitos de flexão e aos efeitos das deformações impedidas.

O corpo B da ETAR de Sobreiras tem uma geometria retangular em planta (cerca de 27x45 m²) sendo formado por vários pisos que se sobrepõem em altura, existindo em alguns deles tanques que irão conter líquidos. O edifício desenvolve-se desde a cota 1,45 até à cota 21,30, estando ainda parcialmente implantado sobre ele o Edifício Administrativo da ETAR. A cobertura do Corpo B situada à cota 25,30, serve também numa área localizada, de laje de piso do Edifício Administrativo.

Na zona adjacente à parede exterior da fachada norte do Corpo B, foi realizada uma contenção definitiva do solo com uma cortina de estacas moldadas com ancoragens definitivas (Fig. 6). Não sendo depositadas terras entre essa contenção e a parede do edifício, existe um fosso que será coberto à cota 25,30, sendo para isso prolongada a laje de cobertura do Corpo B até ao maciço de estacas, que limita a contenção de terreno. Para que possíveis deslocamentos da cortina de estacas da contenção não exerçam uma ação (que seria obviamente nefasta) sobre o edifício, o apoio da laje no maciço de estacas será deslizante (por intermédio de apoios de neoprene). Nas paredes laterais do Corpo B o solo foi contido provisoriamente por muros de Berlim pelo que, após a construção, o impulso das terras atua favoravelmente sobre próprio edifício aplicando as forças F de compressão (Fig. 6).

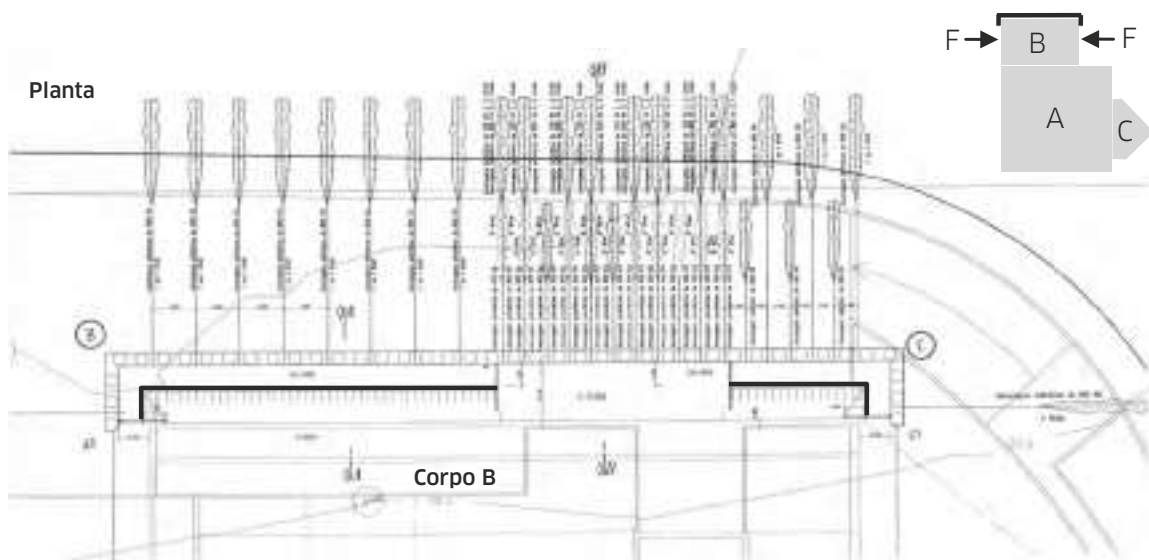
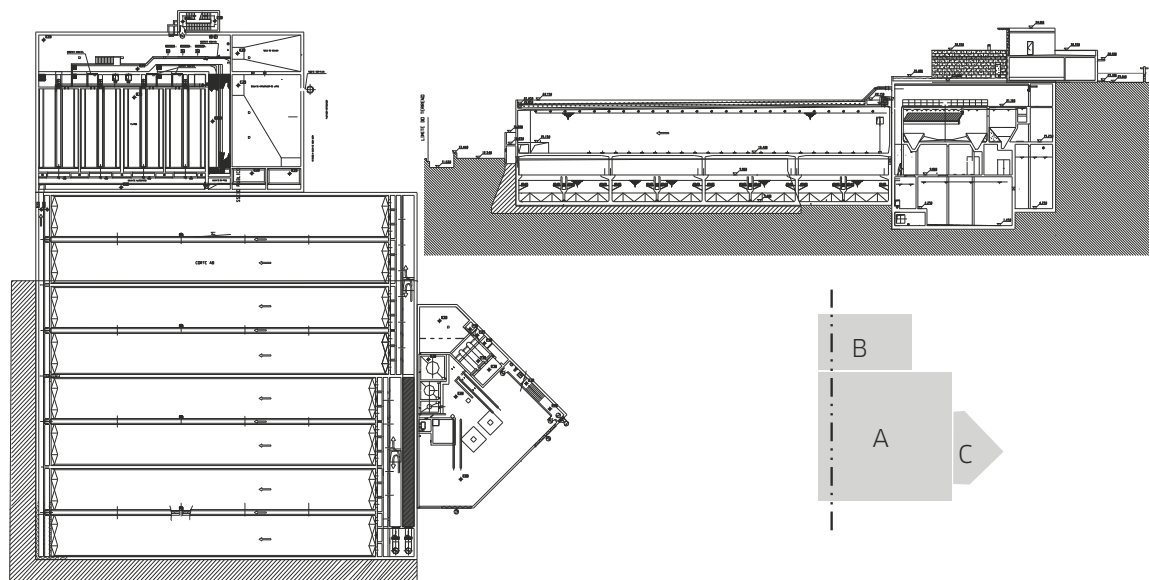
O projeto de execução foi elaborado a partir dos desenhos fornecidos pelo consórcio tendo em conta a capacidade exigida para os reservatórios, os espaços especificados para o funcionamento de todas as zonas e os pormenores ditados pelos fornecedores dos vários equipamentos. A geometria de algumas zonas mais irregulares foi definida em conjunto com os técnicos das empresas construtoras tendo em vista a funcionalidade, o comportamento estrutural e a boa exequibilidade construtiva dos vários elementos. As fundações do edifício são diretas sendo esta opção justificada pela natureza do solo de fundação expressa nos estudos geotécnicos efetuados e que constam nos respetivos relatórios.

2.1 Materiais, durabilidade e controlo da fendilhação

O material estrutural utilizado na obra, objeto deste estudo, é essencialmente o betão armado e o betão



Fig. 4. Vista aérea do edifício da ETAR de Sobreiras, inserida numa zona habitacional, cercada de árvores e com cobertura ajardinada.



armado pré-esforçado. A classe de betão e de aço a serem utilizados foram objeto de grande ponderação tendo em atenção a experiência neste tipo de obras e os estudos efetuados para este caso específico. Para além da segurança estrutural, sabemos como é importante garantir a adequada durabilidade do betão quando em contacto com líquidos e outros agentes agressivos. É um aspeto fundamental a ter em conta pelo dono de obra, pois se o material adequado pode exigir um ligeiro aumento de custo inicial, garante uma estrutura de

Fig. 5. Ilustração geral do edifício da ETAR de Sobreiras com a separação dos 3 corpos por juntas de dilatação, planta e corte de desenhos do projeto.

Fig. 6. Cortina de estacas moldadas com ancoragens definitivas de contenção da escavação junto à parede norte do Corpo B.

qualidade e reduzido ou nulo custo de conservação. Um betão compacto (de baixa porosidade) e com um controlo apertado da fendilhação é essencial para não permitir a entrada de agentes agressivos nos órgãos a eles sujeitos, suportando as ações ambientais e protegendo eficazmente as armaduras contra a corrosão.

O betão a utilizar é da classe C30/37 de acordo com a NP EN 206 e que corresponde à classe B35 de betões especificada no REBAP e será um betão com resistência a agentes agressivos. Deve ser utilizado um cimento composto de presa normal ou lenta e que desenvolva baixo calor de hidratação (cimento tipo II classe 32,5). A dosagem mínima de cimento é de 330 kg por m³ de betão e a relação água/cimento não deve ultrapassar 0,45. Garante-se assim um betão compacto e de alta qualidade para estruturas de betão armado.

Os varões de aço a utilizar são da classe A500 nervurados, fabricados pelo processo Tempcore. Embora na generalidade dos reservatórios o controlo da abertura de fendas a valores de cerca de 0,15 mm, e sempre inferiores a 0,20 mm, exija uma taxa de trabalho do aço em serviço relativamente reduzida (160 a 240 MPa), é possível tirar partido da maior resistência deste aço em elementos comprimidos e sujeitos a esforços de corte, o que torna o seu emprego vantajoso, atendendo aos atuais preços de mercado.

O pré-esforço das paredes e lajes de betão armado pré-esforçado será realizado por meio de cordões auto embainhados não aderentes com ancoragens apenas nas extremidades. O uso deste tipo de pré-esforço parcial não aderente permite aumentar o espaçamento ou, mesmo eliminar a necessidade de juntas de dilatação/ contração e melhor controlar a fendilhação, não exigindo o controlo específico dos estados limites próprios das estruturas com pré-esforço aderente.

A garantia de durabilidade é conseguida pelo betão de boa qualidade e baixa permeabilidade, a ser utilizado em obra com um processo de compactação e cura adequado, e pelo recobrimento conveniente das armaduras. Será exigido um recobrimento mínimo a cumprir para todas as armaduras, $c = 35$ mm, e um recobrimento nominal, $c = 40$ mm, a ser executado com um controlo apertado. Os níveis de tensões do betão e das armaduras em serviço são controlados de acordo com as disposições da Pré-norma Europeia, Eurocódigo 2.

A fendilhação em todos os elementos e órgãos da ETAR, em contacto com águas residuais e outros agentes agressivos, será controlada de forma a que a abertura característica das fendas que se formem resulte por volta de 0,15 mm e nunca ultrapasse 0,2 mm. Sabemos que o controlo apertado da fendilhação devida a deformações impostas é mais exigente, em quantidade de armaduras, quando o betão é de melhor qualidade (maior resistência à tração), mas a garantia de boa durabilidade exige um betão da classe apontada. Também não devem ser utilizados varões de diâmetros pequenos, pois embora levem à redução da abertura de fendas em termos de modelos de cálculo, não são vantajosos em termos de corrosão e durabilidade geral da estrutura. A estratégia seguida para um controlo eficiente da abertura de fendas consistiu no uso de uma percentagem moderada a elevada de armadura (ou pré-esforço parcial), que garanta uma distância entre fendas pequena e simultaneamente uma tensão instalada na armadura de valor reduzido.

2.2 Juntas de dilatação e faseamento construtivo

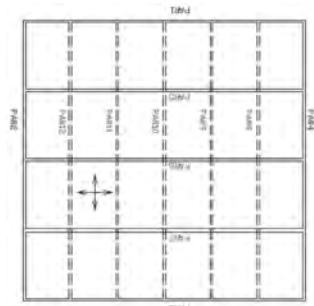
A separação do edifício da ETAR nos corpos A, B e C, com funções e organização diferenciadas já existia à partida. A questão a resolver no projeto de estabilidade é se seria ou não aconselhável introduzir juntas de dilatação na estrutura dos próprios corpos A e B dadas as suas dimensões e grau de monolitismo.

Ponderadas as alterações que seria necessário introduzir na estrutura para a realização de juntas de dilatação neste edifício, e, principalmente, devido à falta de garantia de que uma solução com juntas resultaria mais adequada em termos de estanqueidade e durabilidade num horizonte médio/longo prazo, foi decidido o não uso de juntas de dilatação adicionais. Documentação técnica sobre este tipo de estruturas (*Environmental Engineering Concrete Structures*, ACI 350 R-89), refere que já foram construídas estruturas de tanques com juntas de dilatação espaçadas até 75 m. A seleção de um betão de baixo calor de hidratação e de baixa retração e a utilização de pré-esforço parcial também favorecem a opção tomada. Não é de esquecer, igualmente, que uma estrutura deste género, sem variações de temperatura significativas, vai estar sujeita ao longo da sua vida a ambientes húmidos e/ou saturados, o que por si só reduz ou mesmo reverte os efeitos da retração, após o início de funcionamento.

Para que a não introdução de juntas de dilatação não acarrete problemas funcionais na estrutura, é necessário um planeamento/faseamento construtivo muito cuidadoso, bem como a disposição de armadura suficiente para que, sob a ação de deformações impedidas, a abertura de fendas característica se situe em cerca de 0,15 mm, nunca ultrapassando o valor de 0,2 mm (limite para que a estrutura seja considerada estanque). Fator bastante importante para a diminuição dos efeitos da contração térmica inicial e da primeira secagem é a manutenção permanente com elevado grau de humidade de todas as superfícies após a betonagem e durante um tempo de cura prolongando.

Assim, deve adotar-se o seguinte faseamento construtivo para os elementos estruturais do Corpo A (Fig. 7), que deve ser analisado pelo Diretor da Obra e propor eventuais alterações.

1. Betonagem das sapatas corridas e arranques das paredes da laje de fundo, por troços até 15,0 m



de comprimento. Depois de se dar a retração inicial, betonar painéis da laje com aproximadamente $15 \times 10 \text{ m}^2$ (estando já as sapatas corridas betonadas).

2. Betonagem das 4 paredes exteriores (PAR1 a PAR4) e das 3 paredes interiores (PAR5 a PAR7) até à cota aproximada de 13,00 metros. Esta betonagem poderá ser realizada por painéis com comprimento de 10 a 15 metros e com altura total ($\approx 7,5 \text{ m}$), deixando um espaço de cerca de 10 cm entre os painéis. Prevê-se o uso de juntas verticais de estanqueidade (tipo *Water-Stop*) entre painéis adjacentes. Enchimento dos espaços entre painéis de parede (10 cm) com argamassa (betão) não retrátil.
3. Betonagem da laje à cota 13,60 por áreas com cerca de $15 \times 60 \text{ m}^2$. A laje fica apoiada nas 3 paredes PAR5 a

PAR7 (terá que ser escorada a zona entre pilares destas 3 paredes) e nas paredes exteriores PAR1 e PAR3. Pré-esforço da laje na direção Y (das faixas) após o qual se poderá retirar a cofragem da faixa correspondente. Repetir o processo para as restantes 3 faixas. Pré-esforçar as paredes na direção Y (PAR2 e PAR4).

4. Betonagem das paredes exteriores até à cota inferior da laje da cobertura, seguindo um processo idêntico ao descrito em 2, bem como das paredes PAR8 à PAR12. Pré-esforço da laje intermédia direção X-X, paredes PAR5 a PAR7 e paredes exteriores PAR1 e PAR3 (até 13,60) e PAR8 a PAR12.
5. Betonar a laje de cobertura em faixas de $15 \times 60 \text{ m}$ (orientação X-X) e pré-esforçar a laje nessa direção XX, bem como PAR1 e PAR3 (a cofragem poderá ser retirada da faixa já pré-esforçada e ser usada na outra). Pré-esforçar as paredes 1 e 3 troço superior na mesma altura em que é pré-esforçada a faixa da laje (correspondente) nessa direção. Pré-esforço da laje de cobertura na direção YY ao mesmo tempo que as paredes 2 e 4 (troço superior).

No caso do Corpo B, face à geometria muito irregular da estrutura necessária ao funcionamento da ETAR, tornou-se evidente que seria muito complicada a realização de juntas de dilatação neste edifício, para além de que a sua introdução poderia causar problemas de estanqueidade e durabilidade num horizonte médio/longo prazo. Um outro motivo que aconselhava o não uso de juntas de dilatação é a existência de terras nas duas fachadas mais afastadas entre si, uma vez que os impulsos das mesmas são transmitidos às paredes e lajes de todo o edifício obtendo-se assim esforços de compressão, ou seja, na direção correspondente à maior dimensão do edifício em análise. Estas ações têm um efeito semelhante ao do pré-esforço, comprimindo o edifício e reduzindo, logicamente, os efeitos das deformações impostas.

2.3 Ações. Modelos de cálculo

Na análise estrutural e dimensionamento efetuados foram tidos em consideração não só as ações diretas, ou seja, as forças aplicadas diretamente à estrutura, mas também, as deformações impostas, em especial a contração de origem térmica inicial, a retração e variações de temperatura. Se no cálculo aos estados limites

Fig. 7. Representação esquemática, em planta, dos elementos estruturais do Corpo A.

últimos de resistência as cargas aplicadas e as suas combinações são determinantes do dimensionamento, já nas condições a verificar para um adequado funcionamento em serviço e durabilidade as ações indiretas (deformações impostas) combinadas com cargas aplicadas são essenciais, condicionando, no presente caso, a quantidade e disposição de armadura.

Neste tipo de estruturas, constituídas em grande parte por elementos laminares de betão, tem grande importância a consideração das deformações impedidas iniciais (1 a 3 dias após a betonagem) devidas à perda do calor de hidratação e à primeira secagem. A esta ação vem adicionar-se ações do mesmo tipo, de retração e de variação de temperatura do betão, já numa fase de maturidade avançada do material. Os efeitos destas ações, de grande importância na verificação da segurança em condições de serviço, correspondem à introdução de esforços internos de tração com a consequente fendilhação dos elementos de betão. Devido à aleatoriedade do valor deste tipo de ações, considerou-se que o betão poderia sempre fendilhar devido a deformações impostas tendo de ser feito o controlo adequado da fendilhação.

No que se refere às ações diretas, de quantificação mais precisa e, em geral, mais conhecidas, foram consideradas as ações permanentes e as ações variáveis. As ações permanentes incluem o peso próprio do material estrutural, o peso e o impulso das terras e o peso do líquido e de outros materiais de revestimento e de enchimento utilizados. Para quantificação do peso volúmico destes materiais recorreu-se ao RSAEEP, às Tabelas Técnicas e a bibliografia especializada. As cargas de todos os equipamentos a instalar foram tidas em conta de acordo com as indicações fornecidas pelos respetivos fabricantes.

Do lado das ações variáveis foi considerada uma sobrecarga adicional (referente a pessoas) de $2,0 \text{ kN/m}^2$ na cobertura e de 10 kN/m^2 em zonas de circulação de pessoas. Nas zonas onde é possível a circulação de equipamento, em regra foi considerada uma sobrecarga de 10 kN/m^2 para dimensionamento dos pavimentos. Nas zonas em que haja aberturas com gradil, foi considerada a sobrecarga de 3 kN/m^2 . A pressão e os impulsos hidrostáticos dos líquidos foram tidos em conta em todos os reservatórios e canais de circulação para a cota máxima de enchimento indicada nos desenhos de funcionamento. O peso volúmico das águas residuais

foi considerado com o valor de $10,5 \text{ kN/m}^3$, valor limite este que em geral não é atingido.

No desenvolvimento do projeto de estruturas o cálculo dos esforços foi efetuado, inicialmente, recorrendo a métodos e regras simplificados que permitiram uma avaliação segura dos esforços condicionantes para o dimensionamento dos elementos estruturais. Posteriormente, o estudo foi realizado recorrendo a um modelo baseado num programa de cálculo de estruturas porticadas de betão armado que analisa e dimensiona os elementos estruturais discretizados como barras. As estruturas laminares foram igualmente analisados com recurso às técnicas dos elementos finitos, obtendo-se para além das tensões os mapas de esforços (esforços axiais e transversos, e momentos flettores). Adicionalmente foram desenvolvidos programas para o cálculo automático e dimensionamento de armaduras em estruturas laminares.

3. Corpo A – pré-esforço e especificidades do projeto

Como já referido o Corpo A da ETAR de Sobreiras compreende um conjunto de reservatórios de grandes dimensões ($61 \times 63 \text{ m}^2$ em planta) em dois níveis sobrepostos (15 m de altura), com lajes de grandes vãos e sujeitas a cargas elevadas, e paredes sujeitas a esforços de tração necessitando de elevadas percentagens de armadura para controlo da fendilhação. Embora conhecendo as condições de ambiente agressivo pouco propício à utilização de armaduras de pré-esforço, a exploração da ação de pré-esforço (Fig. 8) com o uso de aço de alta resistência (4 a 5 vezes a resistência da armadura ordinária) será muito favorável não só na economia de materiais (aço e betão) mas também no controlo da fendilhação. Assim, foi considerado vantajoso pré-esforçar a generalidade dos elementos estruturais do Corpo A.

O pré-esforço das paredes e lajes de betão armado pré-esforçado será realizado por meio de cordões auto embainhados não aderentes, com ancoragens apenas nas extremidades. O uso deste tipo de pré-esforço parcial não aderente permite economizar no aço e no betão e melhorar o controlo da fendilhação, não exigindo o controlo específico dos estados limites próprios das estruturas com pré-esforço aderente.

No caso de reservatórios circulares a aplicação do pré-esforço é frequente e o efeito da sua ação é clara e compreensível como está ilustrado na Fig. 9, e na Fig. 10 exemplificada a sua aplicação com cordões de pré-esforço não aderente a reservatórios da ETAR do Freixo, no Porto. Mais difícil é conceber o pré-esforço para reservatórios de configuração retangular e em analisar a eficiência da sua ação. As aplicações práticas de pré-esforço a reservatórios retangulares são escassas, e na altura do projeto da ETAR de Sobreiras (ano 2000) não foram encontrados quaisquer documentos ou publicações sobre o assunto. O betão só estará em boas condições para receber as cargas, as pressões do líquido, e as deformações impostas se todo o bloco (paredes e lajes) do edifício for comprimido (Fig. 11).

3.1 Lajes do Corpo A

A laje de cobertura apresenta dimensões em planta cerca de 61x63 m² e tem como apoios, para além das quatro paredes exteriores, cinco paredes interiores (PAR8 a PAR12), paralelas entre si e distanciadas de cerca de 10,5 m (Fig. 7 e 12). Assim, a laje funciona essencialmente numa direção (direção do vão de apoio de 10,5 m). Para permitir a drenagem das águas pluviais sem dispor de enchimentos significativos, a laje apresenta uma inclinação constante de norte para sul de cerca de 1%.

Foram criadas, nas zonas de ligação com os apoios (paredes PAR8 a PAR12 e paredes exteriores) zonas de maior espessura para atender aos momentos negativos e ao esforço transverso, apresentando a laje uma espessura

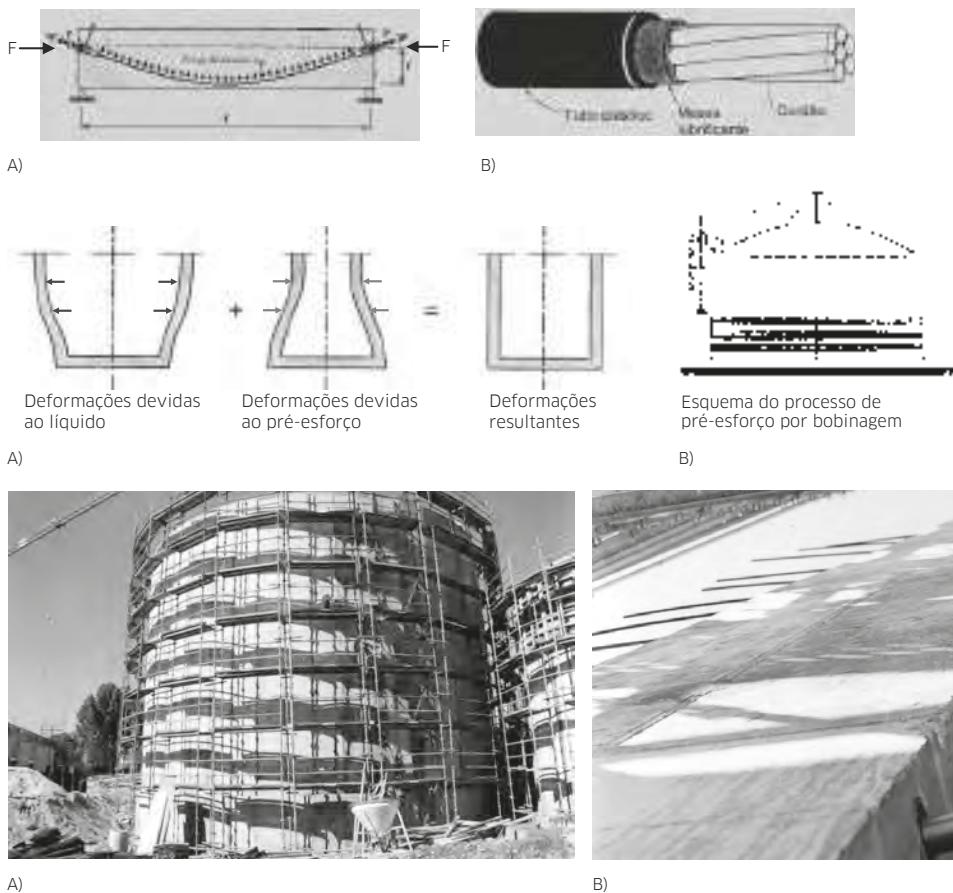
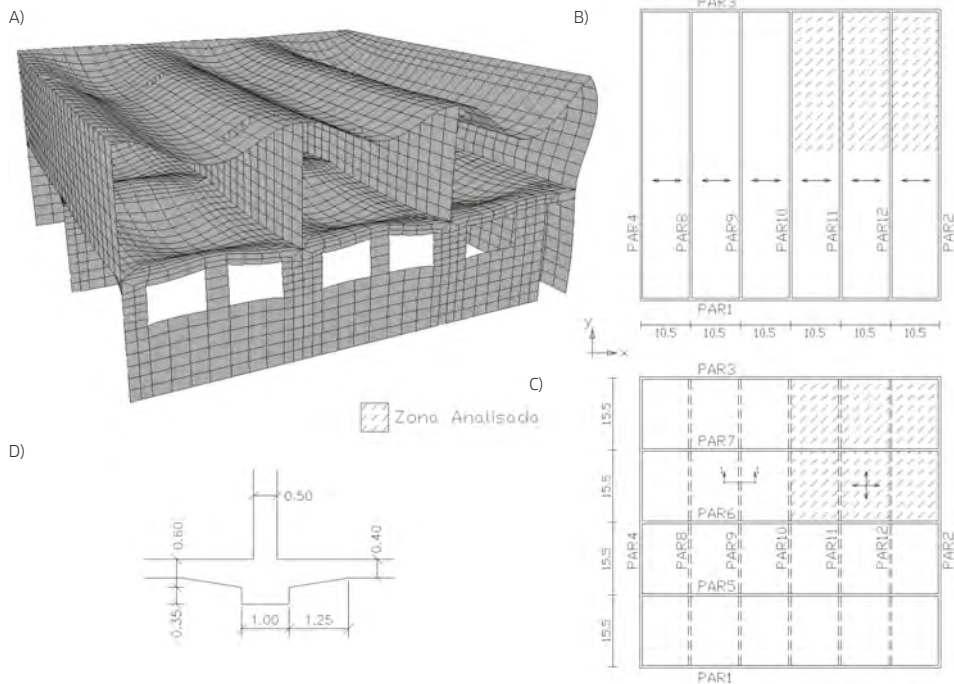
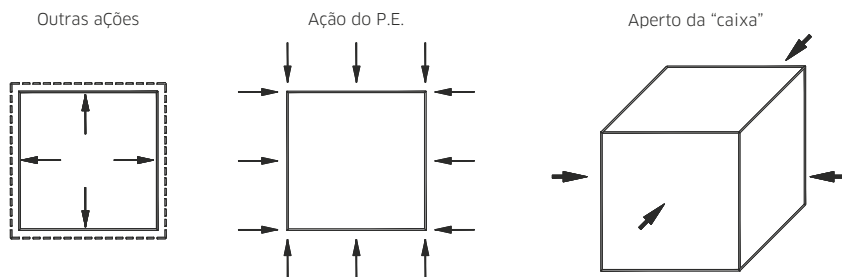


Fig. 8. Ação equivalente ao pré-esforço para um cabo de traçado parabólico (a); cordão não aderente com proteção exterior (b).

Fig. 9. Ação equivalente ao pré-esforço em reservatórios de paredes cilíndricas (a); aplicação de pré-esforço por bobinagem em reservatório cilíndrico.

Fig. 10. Aplicação de pré-esforço às paredes de reservatórios cilíndricos da ETAR do Freixo: reservatórios circulares (D = 21 m, H = 18 m) em construção (a); ancoragem dos monocordões (b)



de 0,25 m (nas zonas do vão) e entre 0,25 e 0,45 m junto aos apoios. O pré-esforço aplicado corresponde a 4 cordões de 0,6" por metro, de traçado parabólico, na direção do vão de apoio (direção x) e de 4 cordões por metro de 0,6", de traçado retilíneo centrado, na direção ortogonal (direção y). As ações consideradas, para além do peso próprio e da ação do pré-esforço, são 10 kN/m² de sobrecarga da terra vegetal (0,5 m de altura), 1,5 kN/m² de revestimentos e 2,0 kN/m² de sobrecarga.

A laje intermédia, um dos elementos mais sensível deste corpo A, com dimensões de cerca de 61x63 m², apresenta o esquema de funcionamento ilustrado no Fig. 7. Na direção do menor vão (10,5 m) apoia-se indiretamente (por suspensão) nas PAR8 a PAR12, (que, por sua vez, vão descarregar nas paredes exteriores e nas paredes PAR 5 a PAR7 através de pilares de grandes dimensões 3,0x0,5 m²), e na direção do maior vão apoia-se nas paredes PAR5 a PAR7, funcionando em duas direções, mas

Fig. 11. Ilustração do efeito do pré-esforço aplicado a reservatório retangular, comprimindo as paredes que são tracionadas (e fletidas) por efeito das outras ações.

Fig. 12. a) Geometria de ¼ do Corpo A com indicação da malha de elementos finitos e da deformada; b) Planta esquemática da laje de cobertura; c) Planta esquemática da laje intermédia; d) Corte 1-1 da laje intermédia.

pré-esforço, conseguiu-se diminuir a espessura geral para 0,40 m, economizando no betão e na quantidade de armadura, e comprimindo a laje nas duas direções, o que é significativamente favorável para o comportamento em serviço do edifício do Corpo A. A atuação do pré-esforço foi simulada através da aplicação de cargas equivalentes, seja ações uniformemente distribuídas atuando de baixo para cima, seja as forças de desvio aplicadas nas extremidades do piso.

A Fig. 13 ilustra pormenores da distribuição da armadura ordinária e de pré-esforço considerada para a laje intermédia à cota 13.40 m.

As paredes PAR8, PAR9, PAR10, PAR11 e PAR12 (Fig. 7) apresentam uma espessura de 0,5 m e localizam-se entre a laje intermédia e a cobertura, dividindo os tanques de arejamento em 6 células com comunicação



permanente 3 a 3, ou seja, dois tanques independentes. A sua função estrutural é a de, por um lado, suportar a laje de cobertura que se apoia nestas 5 paredes (e nas paredes exteriores), e, por outro, suspender a laje intermédia que descarrega uma carga muito elevada, 870 kN/m, devido a servir de laje de fundo de reservatório elevados de cerca de 7 metros de altura de água. Estas paredes funcionam na prática como vigas de grande altura, vigas-parede de 15 metros de vão, e apoiam-se em panos das paredes ortogonais inferiores com 3 m de comprimento e 0,5 m de espessura (Fig. 14).

Visto que os tanques de arejamento apresentam dois módulos independentes (cada módulo ocupa 3 células com comunicação permanente entre si), a parede divisória central, PAR10, além das funções atrás descritas, irá também estar sujeita ao impulso de líquido apenas num dos lados, o que não acontece com as restantes

4 paredes. As paredes PAR9 e PAR12 apresentam duas grandes aberturas na zona de ligação com a parede exterior.

Como já referido, as paredes, PAR8 a PAR12, funcionam como vigas de grande altura recebendo a laje de cobertura e sujeitas a elevada carga suspensa (cerca de 870 kN/m), apresentando algumas delas aberturas significativas. O seu projeto e construção revestiu-se de grande cuidado e de alguma complexidade. O recurso ao pré-esforço, quer na direção vertical quer na direção horizontal, tornou-se incontornável para o dimensionamento racional das paredes de betão destes reservatórios, solicitadas à flexão e a deformações impedidas que impõem trações na direção horizontal e a elevada carga suspensa que traciona na vertical (Fig. 15). Foram utilizados 6 cordões de 0,6" por metro (3 por face) na direção vertical para suspender a carga, e o mesmo número de cordões

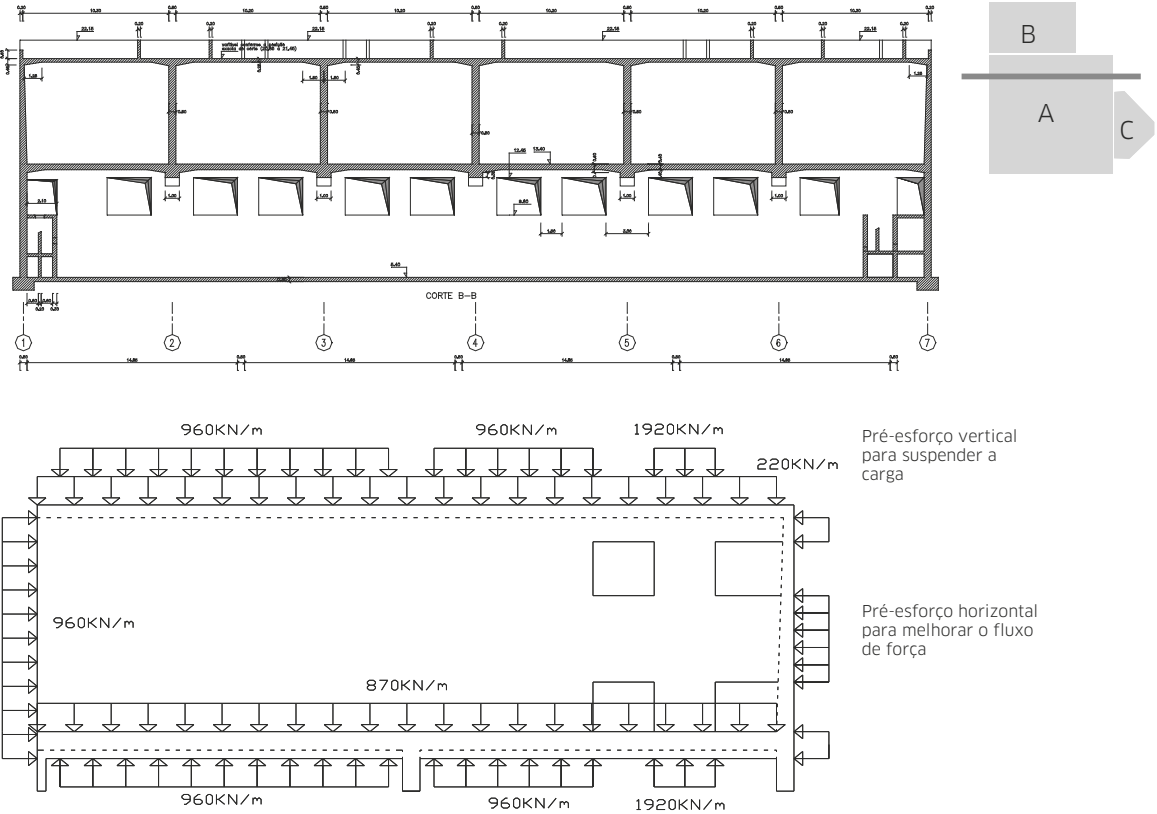
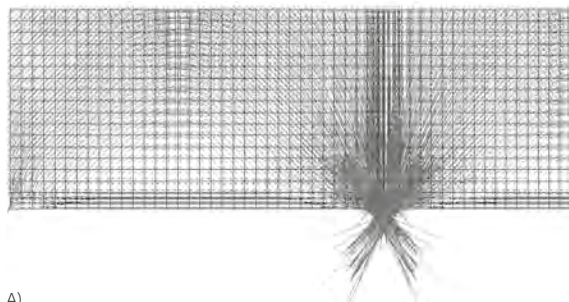
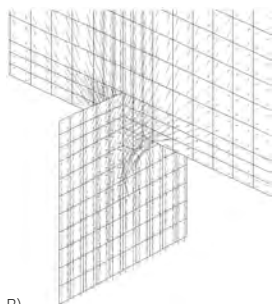


Fig. 14. Paredes interiores em betão armado pré-esforçado (0.50 de espessura) entre o piso intermédia e a cobertura, com vãos de 15m e sujeitas a elevada solicitação dos tanques de arejamento.

Fig. 15. Ilustração esquemática de 2 vãos extremos da parede PAR9 (com aberturas) com representação das ações aplicadas pela laje intermédia e laje de cobertura, e as ações equivalentes ao pré-esforço.



A)



B)

na horizontal para melhorar o fluxo de forças para os apoios, diminuindo as trações e mitigando a fendilhação.

Adicionalmente, os apoios intermédios destas paredes, de 0,5 m de espessura, descarregam em panos de parede perpendiculares também de 0,5 m de espessura uma ação quase permanente que atinge os 20 000 kN, tornando esta região de apoio de comportamento crítico atendendo por um lado ao comportamento reológico do betão, e por outro à sensibilidade destas vias-parede a assentamentos diferenciais de apoios. A Fig. 16 ilustra a análise de pormenor do fluxo de tensões que teve de ser efetuada para melhor conceber a região de apoio das paredes, e que impôs a necessidade de dotar o apoio de esquadro de reforço.

3.3 Paredes exteriores

Estas paredes que se desenvolvem desde a fundação até à cobertura passando pela laje intermédia, perfazem

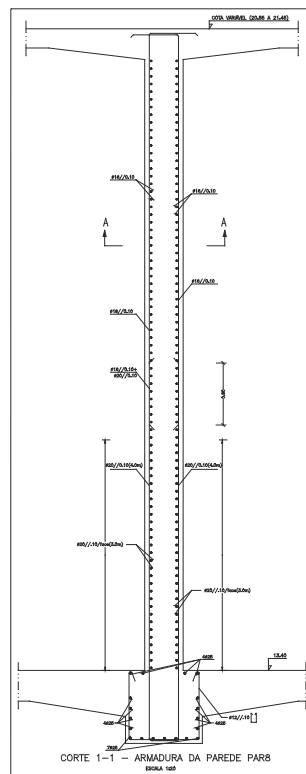
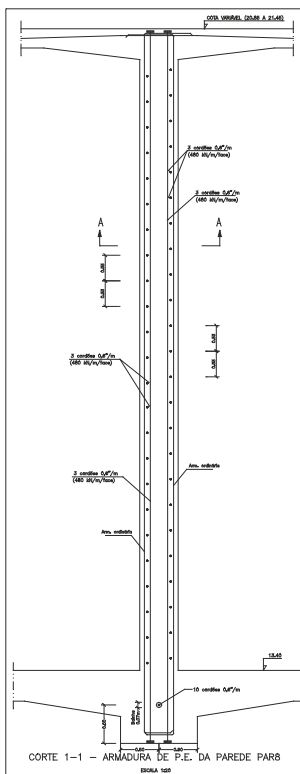
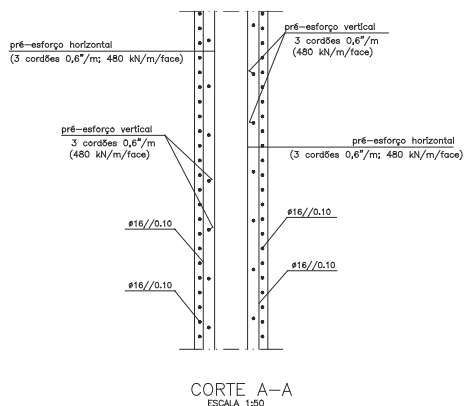


Fig. 16. Análise estrutural de pormenor da zona crítica dos apoios intermédios das paredes PAR8 a PAR12: a) Tensões principais na parede; b) zona de contacto parede/pilar.

Fig. 17. Cortes com o pormenor das armaduras do projeto, de execução da parede PAR9: armaduras ordinárias e de pré-esforço.

o contorno exterior do Corpo A. A sua função estrutural, para além de dar suporte à laje intermédia, à laje de cobertura e servir de apoio às paredes PAR8 e PAR12, é a de retenção dos líquidos existentes nos tanques principais (clarificador e tanque de arejamento), bem como a de suportar as terras exteriores. As quatro paredes apresentam uma geometria idêntica, com uma espessura entre a fundação e a laje intermédia de 0,5 m e entre esta e a laje de cobertura uma espessura linearmente variável entre 0,5 e 0,3 m.

No dimensionamento destas paredes foram consideradas as ações dos líquidos existentes no interior do corpo A com alternância de sobrecarga sempre que se revelou condicionante, e também o impulso de terras exteriores. Para obter as situações mais desfavoráveis, consideram-se combinações de ações em que o impulso do líquido e impulso de terras exterior pudessem ocorrer sem a presença um do outro.

As paredes exteriores do Corpo A estão sujeitas à ação de deformações impedidas significativas na direção horizontal, especialmente na ligação à fundação que impede a livre retração e contração térmica dos panos de parede verticais. O controlo da fendilhação devido a estas deformações impedidas é muito exigente em termos da quantidade de armadura horizontal a dispor. Segundo a expressão do Eurocódigo 2 [4], para controlar a abertura máxima de fendas a 0,2 mm, resultaria para as paredes de 0,50 m de espessura e para o tipo de aço e de betão utilizados, a seguinte quantidade de armadura horizontal:

$$A_s = K_c K_{ct} \frac{f_{ct,ef}}{\sigma_s} = 1,0 \times 0,8 \times 50 \times 100 \times 3 / 160 = 75 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Armadura horizontal: seja $\phi 25//,125$ / face ($A_s = 39,3 \text{ cm}^2/\text{m}$)

Em vez da utilização desta elevada quantidade de armadura ordinária, optou-se por usar uma parte de armadura ativa de pré-esforço, comprimindo as paredes de betão na direção horizontal com 3 cordões de pré-esforço não aderente de 0,6" por face, num total de 6 cordões por metro linear de parede. A utilização de expressão equivalente do Eurocódigo 2, tendo em conta a força de compressão aplicada pelo pré-esforço, resulta apenas na necessidade de utilizar, $\phi 16//,15/\text{face}$ para controlar a abertura máxima

de fendas a 0,2 mm como pretendido. Embora a aplicação da armadura de pré-esforço seja mais cara que a mesma quantidade de armadura ordinária (cerca de 2,5 vezes), foi possível com o uso de pré-esforço reduzir a área de armadura horizontal para metade, e reduzir de forma significativa o custo total.

Note-se que para concluir o *aperto* total do edifício do Corpo A, pré-esforçando todos os elementos estruturais, faltaria pré-esforçar a fundação. No entanto a laje de fundação está assente e encaixada diretamente num solo rijo, sendo por isso a aplicação do pré-esforço pouco eficiente já que grande parte da compressão aplicada ao betão migraria para o solo de fundação. Assim, a fundação não foi pré-esforçada, mas foi adotado um faseamento construtivo para as paredes (betonagem por troços de 15 m e juntas de contração com selagem posterior) que garante maior efetividade do pré-esforço horizontal das paredes (ver Secção 2.2 – faseamento construtivo).

4. Aspetos da obra

4.1 Fase de construção (2000/01)

Nesta Secção ilustram-se algumas fotos selecionadas da fase de construção da ETAR de Sobreiras.



Fig. 18. Aspeto geral da envolvente da ETAR no início da construção (ano 2000)

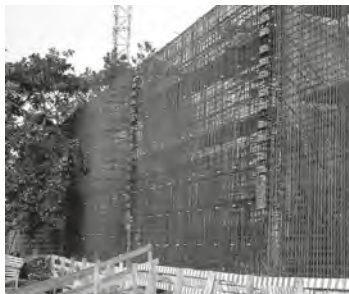
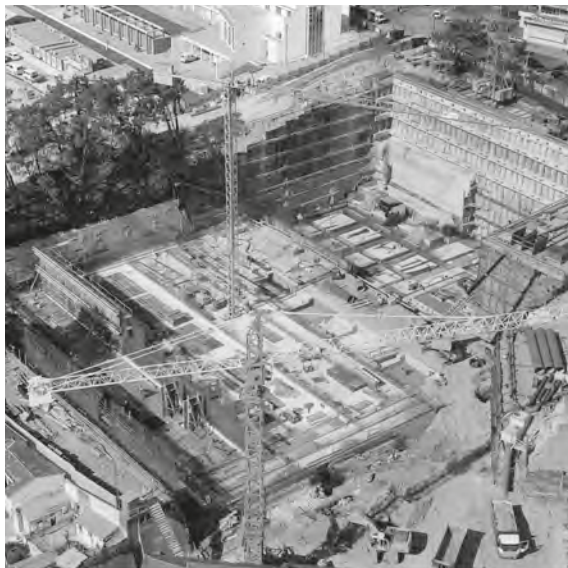


Fig. 19. Site da construção com a execução das fundações, arranque das paredes, e com as contenções já executadas.

Fig. 20. Contenção definitiva e construção da parede norte do Corpo B. Pode observar-se o gap entre a contenção e o edifício do Corpo B.

Fig. 21. Paredes do Corpo A entre a fundação e o piso intermédio. Observe-se a concentração de armadura nos pontos de apoio dos reservatórios entre o piso superior e a cobertura.

Fig. 22. Preparação da armadura da laje intermédia do Corpo A e

arranque de parede interior com os cordões de pré-esforço já ancorados na face inferior e enrolados para posterior posicionamento na vertical.

Fig. 23. Interior de um dos seis tanques elevados na fase de instalação do equipamento.

Fig. 24. Aspeto da armadura da parede exterior entre o piso intermédio e a cobertura.

Fig. 25. Geometria de um dos pontos de apoio crítico das paredes dos reservatórios superiores.

4.2 Fase de Exploração (2018)

Fotos da fase de exploração da obra obtidas durante a visita efetuada em setembro de 2018.



Fig. 26. Vista dos reservatórios inferiores do Corpo A. Atente-se ao aspeto excelente do betão 15 anos após o início da exploração.

Fig. 27. Aspeto recente de um dos pontos de apoio crítico das paredes dos reservatórios superiores.

Fig. 28. Vista da parede exterior do Corpo A (ângulo sul/poente) coberta de vegetação.

5. Notas finais

Os principais pressupostos tidos em conta no desenvolvimento do projeto de execução de estruturas e fundações da ETAR de Sobreiras, realizado há cerca de 18 anos, foram apresentados neste documento. Descreveram-se alguns elementos da conceção estrutural desta ETAR compacta, com reservatórios de grandes dimensões desnivelados, e a vantagem da utilização de pré-esforço para garantir maior economia e durabilidade da obra.

Numa visita sumária efetuada em setembro de 2018, após 15 anos de exploração da obra, foi possível observar que a estrutura de betão se apresenta, em geral, com aspeto muito satisfatório e bom estado de conservação apesar da agressividade do ambiente interior. Não se conhecem as inspeções técnicas entretanto efetuadas à obra de construção civil, sendo de qualquer modo recomendável a realização de ensaios que afirmem o estado da camada de recobrimento do betão e do potencial de corrosão das armaduras, no sentido de garantir maior durabilidade e de estender a vida útil da obra com qualidade e economia.

Referências

- [1] REBAP, *Regulamento para Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado*, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 1983.
- [2] Figueiras, A. et al. - "Sobre o dimensionamento de estruturas laminadas de betão", *Encontro Nacional Betão Estrutural 1994*, 1994, p. 359-372.
- [3] CEB-Comité Euro-Internacional do Betão, CEB-FIP Model Code 1990, BI n.º 195, 196-First Draft, 1990.
- [4] ENV 1992-1-1- *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios*, 1991.
- [5] Alves, Rui - Estrutural: "Análise por elementos finitos orientada a objectos", FEUP 1999.

Agradecimentos

Agradece-se a colaboração essencial do gabinete de projetos, Newton - Consultores de Engenharia, das empresas construtoras, Engil (Mota-Engil) e Soares da Costa, e do dono de obra, SMAS - Serviços Municipalizados de Água e Saneamento do Município do Porto.

Joaquim A. Figueiras,
Prof. Catedrático Aposentado da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto

