

AQUEDUTO DAS ÁGUAS LIVRES
SOBRE O PROLONGAMENTO DA
LINHA AZUL DO METROPOLITANO
DE LISBOA

Abril 2009

SOBRE AS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE E SEGURANÇA DO AQUEDUTO DAS ÁGUAS LIVRES NA ZONA DE CONSTRUÇÃO DA REDE DO METROPOLITANO DE LISBOA (REBOLEIRA)

1. INTRODUÇÃO

A construção da extensão da linha azul do Metropolitano de Lisboa, até à Reboleira, levanta a questão da influência que a mesma poderá ter, em fase de construção e de exploração, sobre a estrutura do Aqueduto das Águas Livres e de 4 ramais de captação que abasteciam esse Aqueduto, na zona em que o túnel passa exactamente sob e na proximidade desta estrutura.

Recorda-se que o Aqueduto das Águas Livres é uma importantíssima obra pública realizada essencialmente no reinado de D. João V, a partir dos anos 30 do século XVIII, tornando efectivo um velho sonho da cidade de Lisboa de ver resolvido de forma adequada à importância da cidade o gravíssimo problema do abastecimento de água que estava até então resumido a um conjunto de captações mais ou menos caóticas e a meia dúzia de chafarizes públicos que se iam revelando cada vez mais incapazes de satisfazer uma cidade em contínuo crescimento.

Pela sua extensão, pela qualidade da obra e pelo seu valor simbólico de um grande projecto concretizado pela engenharia portuguesa, o Aqueduto das Águas Livres merece o título destacado de Património Nacional e tem, na zona da Reboleira, um dos seus troços visitáveis mais importantes.

A movimentação de terras nas imediações de uma estrutura antiga representa sempre um potencial problema, na medida em que podem correr-se riscos de se introduzirem vibrações produzidas pelos equipamentos e meios usados nas escavações, de se originarem descompressões e movimentos do solo sob as fundações existentes e de se produzirem perturbações nos regimes de escoamento de águas subterrâneas a que podem seguir-se arrastamentos de solos e movimentos de assentamento; deve assinalar-se, desde já, que as condições hidro-geológicas do local permitem considerar que não existem riscos que possam ser

relacionados com a alteração de níveis freáticos com arrastamento de finos, pelo que esta questão não chega a ser abordada neste relatório.

São estas as questões que urge analisar em sede dos trabalhos acessórios à empreitada de construção desta obra de ampliação da rede do Metropolitano de Lisboa; neste relatório dá-se conta das análises e observações efectuadas tendo em vista a verificação dos riscos envolvidos, no que se refere às condições de preservação do monumento e a definição de algumas medidas cautelares a adoptar, quer na constante observação do Aqueduto quer na adopção de medidas de minimização de impactos.

2. OBSERVAÇÃO DO AQUEDUTO E SEUS RAMAIS

Foi realizada no dia 1 de Abril de 2009, a observação do Aqueduto na zona próxima da obra que vai ser realizada, sendo o critério usado para a observação o de considerar que as zonas mais relevantes, por serem as que potencialmente comportam maiores riscos; no que se refere ao Aqueduto, a zona crítica pode ser definida tendo como centro a zona de atravessamento do túnel do Metropolitano e uma extensão, para cada lado dessa zona, pelo menos igual à profundidade a que vai passar o túnel (na cota mais baixa).

No que se refere ao Aqueduto propriamente dito, foi realizada uma inspecção minuciosa, pelo exterior e pelo interior, na medida em que esta estrutura é totalmente acessível; já no que se refere aos ramais 1 a 4, apenas foi possível inspeccionar parcialmente o ramal nº 4, que é parcialmente acessível pelo interior e que se encontra quase sempre enterrado, como será de esperar em estruturas de captação de água. Os ramais 1 a 3 estão enterrados e não têm qualquer possibilidade de acesso, até porque as bocas de ligação ao Aqueduto estão encerradas com panos de alvenaria; em qualquer caso, deve assinalar-se que a distância da obra de escavação aos ramais 1 a 4, em quase toda a sua extensão, permite afirmar, sem mais análise, que aquela não poderá produzir impactos negativos na estabilidade e segurança desses ramais, apenas se justificando uma observação mais precisa quanto às zonas dos ramais 2 e 3, sob as quais passará o túnel do Metropolitano.

No anexo 3 deste relatório apresenta-se uma planta com a localização do Aqueduto, dos seus ramais de 1 a 4 e do túnel e estação da Reboleira do Metropolitano de Lisboa.

2.1 O Aqueduto

A visita de observação realizada em 1 de Abril de 2009 permitiu verificar a inexistência de problemas estruturais ao longo de todo o troço inspeccionado que acabou por ser observado numa extensão superior a 100m, por força da distância a que se encontra a entrada de acesso à zona crítica referida.

O Aqueduto tem, nesta zona, uma parte elevada que corresponde à transposição de um vale relativamente suave (sob a qual passam rodovias), após o que a estrutura mergulha no solo, adaptando-se à topografia da zona, sendo aí atravessada pela via férrea da Linha de Sintra, com uma passagem desnivelada que se encosta à estrutura do Aqueduto, em condições particularmente desfavoráveis ao enquadramento paisagístico do monumento..

A inspeção realizada pelo exterior evidencia a existência de um embasamento de pedra aparelhada, provavelmente constituindo uma forra de cerca de 0,40m de espessura de um maciço de alvenaria ordinária de pedra basáltica aglutinada com argamassa de cal, ao qual se sobrepõe a estrutura do canal do aqueduto, em alvenaria de pedra basáltica, não rebocada (admite-se que estas paredes tenham sido rebocadas de origem mas esses rebocos terão sido removidos, hipótese esta que se baseia no facto de se tratar de um aparelho de pedra muito irregular habitualmente destinado a ser rebocado), com cobertura de duas águas constituída por capa de argamassa sobre o enchimento de abóbadas de berço formadas por tijolo cerâmico maciço ao cutelo.

Em toda a extensão inspeccionada não se registou a existência de qualquer fendilhação, nem mesmo numa zona já distante da zona crítica da futura obra do Metro, na arcaria sob a qual passa a rodovia; mesmo nas zonas de aberturas para janelas de ventilação não há sinais de fendilhação que é característica de deficiente comportamento deste tipo de estruturas, quer no que se refere à acção de sismos como quanto a efeitos de assentamentos de fundações.

No interior verifica-se a existência dos elementos estruturais antes referidos, paredes e abóbadas que se apresentam por vezes rebocadas e, em algumas zonas, nuas desses rebocos; aí verificou-se a constituição das abóbadas, anotando-se a existência de zonas em que o fecho das abóbadas foi betonado, correspondendo essas zonas aos atravessamentos da via férrea. Verifica-se a existência de fendilhação que afecta essencialmente os respiradouros do Aqueduto, sendo as fendas de natureza dispersa e de pequena abertura, possivelmente devidas a retracções antigas das argamassas e ao efeito de variações de temperatura; essas fendas nunca têm expressão estrutural e não se transmitem para as abóbadas nem para as paredes do canal.

Observam-se zonas, nas paredes e no intradorso das abóbadas em que ocorre o descolamento com empolamento de rebocos, de forma irregular e claramente devidos ao efeito de humidificação das paredes e abóbadas; em algumas zonas as paredes e abóbadas apresentam-se erodidas, sendo especialmente relevante o caso de alguns tijolos das abóbadas que apresentam uma perda significativa de secção.

Pelo interior foi ainda possível verificar que as aduções de água pelos ramais 1 a 4 se encontram encerradas, verificando-se ainda que se continua a dar um escoamento significativo através do canal do Aqueduto mas sendo a água lançada na rede de esgotos pluviais, onde corre abundantemente; numa zona verifica-se ainda a infiltração de águas negras, decerto provenientes de ligações ou de roturas de redes de esgotos residuais, o que se detecta pela coloração negra da água e pelo cheiro desagradável associado.

Em geral pode considerar-se o estado de conservação do Aqueduto, ao longo de toda a zona inspeccionada, como muito bom, apenas se salientando alguns problemas secundários que afectam essencialmente rebocos interiores.

No anexo 2 deste relatório apresenta-se uma reportagem fotográfica que ilustra os principais aspectos observados no Aqueduto durante a visita realizada.

2.2 Os ramais 1 a 4

Como antes se referiu estes ramais estão quase totalmente enterrados e inacessíveis, com excepção de parte do ramal 4. Este tem acesso ainda possível e franco até à zona de bifurcação que dá origem aos sub-ramais 4.1 e 4.2; trata-se de estruturas de alvenaria de muito menor dimensão do que as que correspondem ao Aqueduto, com paredes de alvenaria ordinária e cobertura constituída por lajetas de pedra colocadas em V invertido, recobertas a argamassa de cal e areia (no final do anexo 2 apresenta-se um conjunto de fotografias do interior e do exterior do ramal 4, recolhidas durante a visita de observação realizada a 1 de Abril de 2009).

O estado de conservação, exterior e interior destas estruturas pode considerar-se muito bom, admitindo-se que nas zonas a montante, mais próximas das captações de água, possam existir zonas aluídas, como aliás sucederá com os ramais 1 a 3 mas trata-se de conjecturas face à impossibilidade prática de fazer a observação.

Deve notar-se que, relativamente ao ramal 4, a grande distância a que se encontra da obra (poço de ventilação a cerca de 97m de distância e término do túnel da estação a 29,4m) permite considerar que serão nulas as consequências da movimentação de solos a que a obra obriga.

Os ramais 1 a 3 estão em quase toda a sua extensão muito distanciados da obra de escavação do túnel e estação da Reboleira do Metropolitano de Lisboa; exceptua-se o caso dos ramais 1 e 2 que na zona próxima da sua inserção no Aqueduto se encontram sobre um troço do túnel a escavar. Considerando que as cotas a que se encontram estes troços dos ramais 1 e 2 são superiores às do próprio Aqueduto, entende-se que serão válidas para essas estruturas secundárias, e por analogia, as conclusões que se irão extrair da análise estrutural realizada para o Aqueduto e que adiante se apresentará.

3.CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE, DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL E DE FUNCIONALIDADE DO AQUEDUTO

As muito boas condições de conservação da estrutura do Aqueduto, a sua constituição estrutural de grande robustez e as excelentes condições de fundação nos maciços basálticos locais são a melhor garantia de resistência das estruturas do Aqueduto, quer durante a fase de construção da obra, quer em fase de exploração da linha do Metropolitano; esta expectativa é fundamentada pelo muito bom desempenho que estas estruturas têm evidenciado face a condições muito severas de exploração, quer pela passagem de uma rodovia sob a sua arcaria, quer pelo tráfego de comboios pesados sobre estas estruturas.

Numa obra com mais de 250 anos, a constatação do seu excelente estado de conservação estrutural indicia que os efeitos sobre a estrutura das acções que nela se vêm exercendo ao longo do tempo não tem tido repercussões negativas nessa estrutura, as quais se traduziriam, nomeadamente, em desnivelamentos, desaprumos e fendilhações.

Este bom desempenho estrutural deve-se, repete-se à excelência dos materiais e processos construtivos usados e às muito boas condições de fundação de toda a estrutura do Aqueduto nas zonas visitadas. Aliás, o aspecto fundamental que se refere às condições de fundação é facilmente perceptível através da observação dos cortes geológicos disponíveis, que evidenciam a forma como as fundações do Aqueduto mobilizam estratos de solo de grande competência, incluindo os maciços rochosos basálticos.

Naturalmente, as condições de estabilidade, segurança e funcionalidade do Aqueduto podem ser afectadas por novas obras a realizar nas proximidades, como é o caso das obras de escavação para o túnel e Estação da Reboleira do Metropolitano de Lisboa.

A análise destas condições passa, por um lado, pela existência de referências bem definidas sobre a geometria e topografia do Aqueduto e das suas zonas envolventes, o que está garantido pelos levantamentos especificamente realizados pelo ACE construtor desta obra, pela existência de um plano de instrumentação, monitorização e observação das estruturas do Aqueduto ao longo de todo o tempo da obra (o que está já traduzido na proposta de instrumentação e

monitorização desenvolvida pelo ACE, a qual se baseia, correctamente, na colocação de alvos topográficos ao longo do comprimento do Aqueduto na sua zona crítica, os quais devem ser objecto de leituras com periodicidade, em princípio, semanal, mas que pode ser alterada em função dos resultados da monitorização).

Anote-se que, em complemento desta instrumentação, deve proceder-se à observação (2 vezes por semana ou mesmo diárias na fase mais crítica da obra, quando o túnel a escavar se aproxima mais do Aqueduto, a menos de 20m do seu eixo), cuidada e exaustiva das estruturas do Aqueduto, exterior e interiormente, de modo a verificar imediatamente o aparecimento eventual de qualquer sinal de fendilhação estrutural, que será o efeito mais visível de eventuais assentamentos de fundações que ultrapassem os valores estimados pelo projectista da obra.

O processo construtivo que se prevê aplicar contempla a escavação em túnel com meios mecânicos, incluindo o uso de martelos pneumáticos, seguida da gunitagem das superfícies de escavação anterior à construção das estruturas de betão armado que formarão as estruturas definitivas do túnel, é o adequado à situação existente, nomeadamente à natureza dos solos a escavar, correspondendo a um procedimento que pode ser considerado convencional e tecnicamente aconselhado.

O estudo realizado quanto ao efeito que as vibrações associadas ao desmonte e escavação de solos de natureza diversa, incluindo bancadas rochosas alteradas evidencia que este processo construtivo por analogia com o que tem ocorrido em obras de natureza similar, não produzirá vibrações significativas que possam, por si mesmas, provocar danos nas estruturas do Aqueduto; acresce, para fundamentar esta convicção, a circunstância de o Aqueduto já ser sujeito diária e regularmente a vibrações intensas associadas sobretudo ao tráfego ferroviário, sendo perceptível o nulo efeito que as vibrações associadas a este tráfego têm produzido nas estruturas construídas.

Tendo em conta tudo isto procedeu-se à análise estrutural do troço do Aqueduto potencialmente mais afectável pelas obras de escavação do túnel, usando como dados de referência as características geométricas e mecânicas da estrutura do mesmo e como acção de base os

movimentos de assentamento que podem ocorrer no maciço de terras envolvente do túnel a escavar (ver anexo 1).

Os dados geométricos considerados são os que resultam do levantamento realizado pelo ACE e disponibilizado; as características mecânicas dos materiais constituintes das alvenarias com que foi construído o Aqueduto foram consideradas de acordo com o que se podem considerar características de referência em alvenarias de natureza similar às que foram usadas no Aqueduto; os movimentos de assentamento, considerados como deformações impostas na base do Aqueduto, são os que resultam do estudo geotécnico do maciço envolvente do túnel elaborado pelo ACE construtor e que estabelecem como limite máximo para os valores dos deslocamentos verticais do maciço 3,2mm, na vertical do atravessamento do Aqueduto pelo túnel do Metropolitano.

As estruturas definidas a partir desta informação de base foram modeladas, em modelos bi e tri-dimensionais e analisadas através da aplicação do programa SAP2000, constando a respectiva informação detalhada do anexo que se apresenta.

Os resultados da análise, apresentados detalhadamente no anexo 1, permitem constatar que não existem quaisquer riscos de instabilidade, de segurança e de funcionalidade das estruturas do Aqueduto; face às condições em que a análise foi realizada (utilizando os dados de base referenciados e recorrendo a análises lineares), verifica-se que não existe risco de fendilhação transversal das abóbadas de cobertura do Aqueduto, em função do desenvolvimento de esforços de tracção cujo valor máximo não ultrapassará a resistência à tracção das alvenarias existentes.

Estes esforços são devidos ao efeito de assentamentos diferenciais longitudinais no solo de fundação do Aqueduto, em que de acordo com o estudo geotécnico realizado, se verificam os maiores valores de assentamento na zona correspondente ao local de atravessamento do túnel do Metropolitano (3,2mm), valores esses que se vão reduzindo à medida que aumenta a distância a esta zona; como consequência ocorre a flexão longitudinal do Aqueduto, como o de uma viga elástica assente no solo, com esforços de tracção na base das fundações na zona sobre o túnel e nas abóbadas de cobertura do Aqueduto a cerca de 15m do eixo do túnel e para cada lado deste.

Os esforços de tracção na base das fundações não constituem problema, já que se trata de estruturas maciças de alvenaria, de que resulta que as tensões máximas de tracção na alvenaria nunca atingem os valores máximos admissíveis nesta; mesmo no que se refere às tracções na zona superior do Aqueduto, em que esses esforços são aplicados numa estrutura de pequena espessura (as abóbadas de berço existentes de alvenaria de tijolo), resultam tensões de tracção instaladas que se mantêm inferiores aos valores máximos admissíveis neste material.

Isto significa que, nas condições estabelecidas pelo projectista em relação ao processo construtivo do túnel e aos resultados do estudo do comportamento geotécnico do maciço envolvente, e tendo em conta as características estruturais do Aqueduto, os esforços de tracção que podem ocorrer nas coberturas em abóbada do Aqueduto não se traduzirão na sua fendilhação; mesmo no caso de poder verificar-se pontualmente a ocorrência de esforços de tracção superiores à resistência da alvenaria das abóbadas (por exemplo, se existir nestas uma zona fragilizada não detectada na inspecção realizada), isso traduzir-se-á em anomalias irrelevantes e facilmente solúveis, bastando para isso que se adoptem medidas adicionais que adiante se referirão como possibilidades a analisar pelo projectista da obra e pelo ACE construtor, devendo anotar-se que não se considera viável a apresentação de qualquer solução que passe por intervenções ao nível da estrutura do Aqueduto.

Note-se que foi realizada uma análise de sensibilidade da estrutura do Aqueduto em relação a uma característica mecânica fundamental que é o módulo de elasticidade a considerar para as alvenarias; fez-se variar esse módulo entre 1 e 2GPa, valores razoáveis para as características reconhecidas das alvenarias existentes e verificou-se uma redução muito relevante dos esforços de tracção máximos na alvenaria para os valores mais baixos do módulo de elasticidade.

Registe-se que o valor adoptado foi de 1GPa o qual corresponde ao limite máximo recomendado em bibliografia especializada, a qual apresenta como limites de referência valores entre 0,5GPa e 1GPa; é certo que se tivesse sido adoptado o valor mais baixo os esforços de tracção instalados na estrutura seriam francamente mais baixos, como é sabido e, aliás, é o que sucederá caso se inicie o processo de fendilhação das abóbadas, no início do qual, mesmo para valores incipientes e quase não detectáveis em observação directa, ocorrerá um efeito

equivalente ao de uma redução do módulo de elasticidade. Os valores obtidos para os esforços de tracção permitem mesmo, nestas condições, considerar dispensável o recurso a modelos de análise não linear, cujo uso seria muito interessante e vantajoso no caso de se atingirem, na análise linear tracções superiores aos máximos admissíveis para as alvenarias constituintes do Aqueduto.

4. MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO DE IMPACTOS A CONSIDERAR

Face ao exposto, e tendo em conta as características específicas da obra de construção do túnel e estação da Reboleira do Metropolitano de Lisboa, considera-se que devem ser adoptadas medidas de minimização de riscos e de impactos no comportamento das estruturas do Aqueduto das Águas Livres, na zona de influência da construção desta obra, mas apenas no caso de se vir a verificar, durante a obra e de acordo com os dados da instrumentação e da observação do Aqueduto, a invalidade de algum dos pressupostos em que se baseou este estudo.

Tendo em conta que não se considera viável a realização de intervenções de reforço das estruturas do Aqueduto, nem mesmo de consolidação directa das suas fundações, entende-se que as medidas de minimização, em fase de construção, a terem que ser consideradas, devem passar por soluções que permitam garantir a minimização dos assentamentos do maciço envolvente do túnel, especialmente na vertical deste.

Estas medidas de minimização de movimentos de assentamento do solo sob as fundações do Aqueduto podem passar, por um lado, por adaptações e ajustamentos do processo construtivo, por exemplo com maiores limitações em relação à dimensão máxima e faseamento dos troços a escavar e em relação ao processo de consolidação e estabilização das superfícies de escavação.

Outra possibilidade corresponde à adopção de medidas de reforço passivo das características do solo de fundação sob o Aqueduto, numa extensão de cerca de 15m a 20m centrada sobre a zona de implantação do túnel quando este cruza o Aqueduto; as melhorias de características do

solo sobre o túnel e sob o Aqueduto, tal como as que resultariam de um refinamento do processo construtivo, permitirão reduzir os deslocamentos máximos do maciço envolvente do túnel.

Admite-se como possível que a instrumentação e monitorização da escavação e do Aqueduto possam ir fornecendo, quase em tempo real, informação acerca dos movimentos do solo e sobre o comportamento da estrutura do Aqueduto que, em princípio tornará dispensável a adopção destas medidas de minimização .

Em fase de exploração admite-se que o impacto sobre o Aqueduto não seja relevante, mas considera-se que deve ser recomendada a adopção de medidas minimizadoras que passam pela garantia de redução das vibrações produzidas pela passagem das composições, com intervenções ao nível da via, da sua base ou dos carris.

5. CONCLUSÕES

Foram verificadas as condições actuais de conservação e segurança de um troço do Aqueduto das Águas Livres, na zona de influência potencial da obra de construção do túnel e estação da Reboleira do Metropolitano de Lisboa, tendo-se constatado a excelência dos materiais e processos construtivos usados e o muito bom estado de conservação destas estruturas, apenas se evidenciando a existência de anomalias não estruturais que afectam rebocos e sinais de infiltrações e repasses de água do exterior para o interior do Aqueduto e fugas deste para o exterior.

A análise estrutural realizada para essa zona do Aqueduto, tendo em conta os dados resultantes do estudo geotécnico sobre o comportamento do maciço envolvente do túnel permitiu constatar a inexistência de risco de que venham por esse efeito a ocorrer esforços de tracção na estrutura do Aqueduto que possam originar fendilhação das abóbadas de alvenaria de tijolo que cobrem o Aqueduto, ou das suas fundações e paredes.

Este estudo aponta assim para a adequação da solução estrutural e do processo construtivo do túnel; porém, caso eventualmente se verifique desajustamentos pontuais dos pressupostos que

serviram de base este estudo, o que não é previsível nesta data, poderá haver necessidade de introduzir ajustamentos ao processo construtivo do túnel, o que passará pela adopção de medidas de consolidação do solo sobre o túnel na zona de atravessamento do Aqueduto.

Além disso, o plano de monitorização proposto e que se considera adequado, à custa de colocação de alvos topográficos no Aqueduto, bem como a instrumentação específica da obra geotécnica a realizar, a par de uma observação cuidada e constante da estrutura do Aqueduto, irão dar informação preciosa sobre o comportamento do maciço envolvente do túnel a escavar e sobre as estruturas do Aqueduto que permitirá tomar atempadamente as medidas minimizadoras que sejam as adequadas à correcta preservação deste elemento patrimonial.

6. FICHA TÉCNICA

Avaliação Estrutural:

Eng. João Appleton
Eng. Nuno Travassos

Desenho:

Luís Oliveira

Informática:

Pedro Almeida

Secretariado:

Isabel Costa
José Pinto

Lisboa, 2009, Abril, 13



João Appleton

ANEXO 1

AQUEDUTO DAS ÁGUAS LIVRES SOBRE O
PROLONGAMENTO DA LINHA AZUL DO
METROPOLITANO DE LISBOA

Verificação da Segurança da Estrutura Existente

Abril 2009

ÍNDICE

1. ACÇÕES	2
1.1. Acções Permanentes	2
1.1.1. Peso Próprio.....	2
1.1.2. Deslocamentos impostos	2
2. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO AQUEDUTO	3
2.1. Materiais	3
2.2. Modelos de Cálculo	3
2.3. Combinações de Acções.....	5
2.4. Verificação da Segurança	5
2.4.1. Verificação aos Estados Limites de Utilização	5
2.4.2. Verificação aos Estados Limites Últimos	6
3. CONCLUSÕES	9
4. FICHA TÉCNICA	10

1. ACCÇÕES

1.1. Accções Permanentes

1.1.1. Peso Próprio

O peso próprio da alvenaria foi considerado tomando para peso específico $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$.

1.1.2. Deslocamentos impostos

Por forma a simular o efeito do assentamento da fundação no Aqueduto considerou-se um deslocamento imposto na estrutura do Aqueduto, com valor variável ao longo do mesmo, de acordo com o diagrama fornecido pelo projectista do túnel, o qual é apresentado em seguida, assim como os valores de deslocamentos considerados. Refira-se que o deslocamento máximo é de 3.20 mm, quando o Aqueduto passa sobre o eixo do túnel.

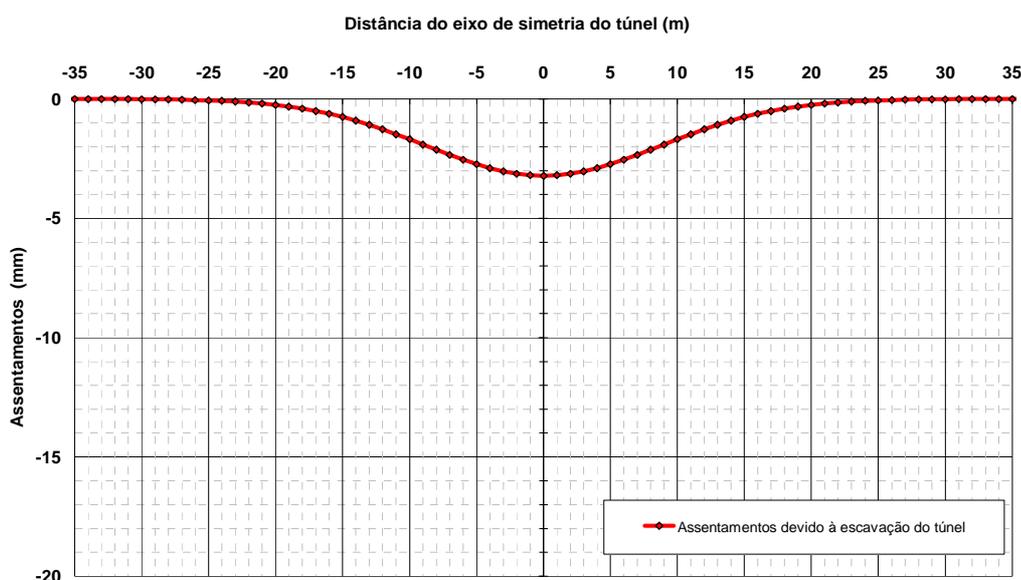


Figura 1 – Assentamentos devidos à escavação do túnel estimados pela

CJC Engenharia e Projectos Lda

2. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO AQUEDUTO

2.1. Materiais

Considerou-se as seguintes propriedades para a alvenaria do Aqueduto, tendo em conta as suas características conhecidas:

- $f_k = 3000 \text{ kN/m}^2$ (compressão) e $\gamma_m = 3$, ou seja, $f_d = 1000 \text{ kN/m}^2$;
- $E = 1 \text{ GPa}$.

Considerou-se ainda ser aceitável o surgimento de tensões de tracção na alvenaria até 100 kN/m^2 com carácter local.

2.2. Modelos de Cálculo

Na zona em análise, o Aqueduto é composto por dois alinhamentos de paredes (hasteais) em alvenaria de pedra com 0.90 m de espessura cada, apoiados sobre uma soleira da mesma natureza com 3.40 m de largura e 1.50 m de altura. A cobertura é constituída por uma abódada com espessura variável entre 0.60 m nos arranques e 0.30 m ao centro. O traçado do prolongamento da linha do Metropolitano faz um ângulo de cerca de 54° em planta com o eixo do Aqueduto, pelo que existe um efeito de distorção no sentido transversal do Aqueduto, motivado pelo facto de a parede norte ter, em cada secção transversal, um assentamento diferente da parede sul. Todavia após análise desta situação através de um modelo 3D, conclui-se que esta situação não produz esforços relevantes no sentido transversal ao eixo de desenvolvimento do Aqueduto. No sentido longitudinal, este modelo 3D é equivalente a um modelo 2D, com o qual se desenvolveu em seguida esta análise, o qual é apresentado em seguida.

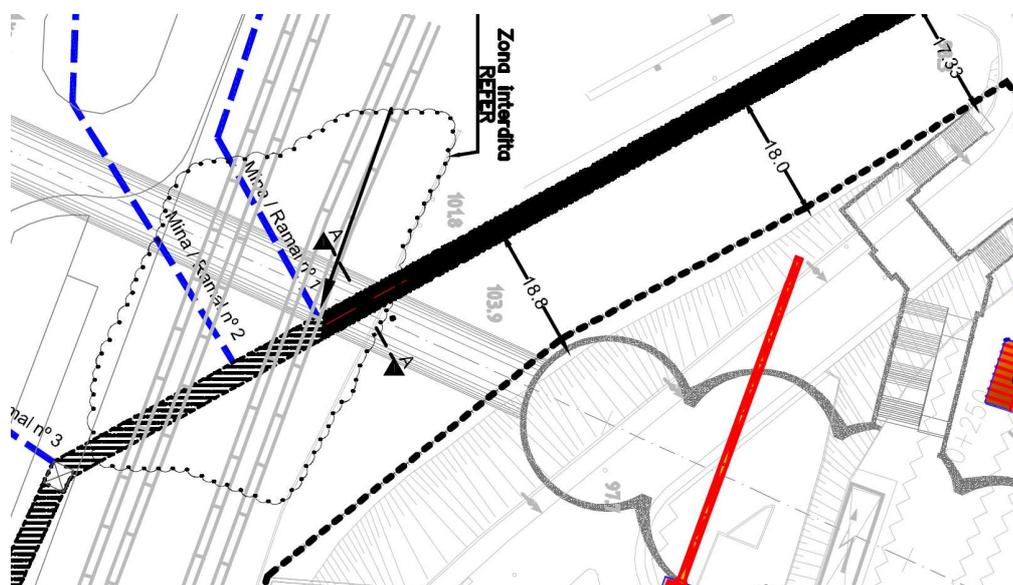


Figura 2 – Sobreposição em planta do traçado da linha de Metropolitano e do Aqueduto -
Extracto do desenho DES-MERE-AMB-001 da CJC Engenharia e Projectos Lda

Foi adoptado um modelo bidimensional para simular uma das paredes do Aqueduto, cuja discretização está representada nas páginas seguintes. Todos os elementos do Aqueduto foram simulados com elementos finitos de casca de quatro nós (“shell”), com as respectivas espessuras. A existência de deslocamentos impostos não uniformes (deslocamentos diferenciais) segundo o alinhamento longitudinal do Aqueduto, está na origem do surgimento de esforços nas paredes do mesmo. De acordo com o diagrama de deslocamentos impostos atrás apresentado, a extensão de Aqueduto na qual se fazem sentir o efeito do assentamento do solo de fundação é de 30 metros para cada lado do eixo do futuro túnel do Metropolitano. Para além destes 60 metros de Aqueduto simulou um desenvolvimento adicional em cada um dos lados desta zona, correspondente a um modelo com 90 metros. Considerou-se que as condições de fundação, no que respeita a tipo de terreno e seu desempenho, eram semelhantes nestes 90 metros simulados no modelo. Refira-se que esta simplificação é aceitável já que se pretende apenas analisar o efeito dos novos deslocamentos impostos.

O modelo adoptado está representado em seguida.

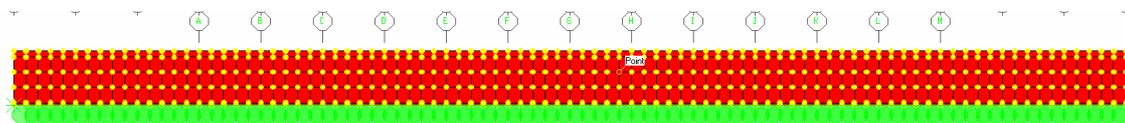


Figura 3 – Alçado do modelo bidimensional 2D

Foram calculados os esforços máximos através de análises estáticas lineares. O programa de cálculo automático utilizado foi o SAP2000.

2.3. Combinações de Acções

Realizaram-se duas verificações. Uma análise de deformações tendo em conta unicamente o efeito dos novos deslocamentos impostos e uma análise de esforços (tensões). Esta última verificação deve ser feita considerando a actuação simultânea do peso próprio da estrutura e o efeito dos deslocamentos impostos, tendo-se em conta esforços para a combinação de acções em Estado Limite Ultimo (ELU). Neste caso o efeito do peso próprio é favorável, pelo foi majorado com factor unitário. O deslocamento imposto foi considerado igualmente com factor unitário, de acordo com o Eurocódigo 1. Deste modo, a combinação em ELU resulta igual a 1.0 x Peso próprio e 1.0 x Esforços devidos aos deslocamentos impostos.

2.4. Verificação da Segurança

2.4.1. Verificação aos Estados Limites de Utilização

2.4.1.1. Estado Limite de Deformação

A verificação do estado limite de deformação foi feita tendo em conta os deslocamentos impostos, uma vez que interessa unicamente analisar os novos efeitos na estrutura, já que a mesma se encontra presentemente em serviço em condições aceitáveis. Não interessa por este motivo a avaliação de deslocamentos devidos ao próprio.

A deformação a ter em conta é por conseguinte a fornecida pelo projectista do túnel, reproduzida na figura 1 deste documento. Nesta pode-se concluir que existe uma

deformação diferencial de 3.20 mm num desenvolvimento de 30 metros. Admitindo um limite máximo igual a $L/1000$ (indicado pelo próprio projectista como sendo o valor até ao qual a deformação é irrelevante para estrutura), conclui-se para L igual a 30 metros um limite de 0.03 m, em relação ao qual os 3.20 mm estão francamente abaixo, pelo que seriam aceitáveis.

No sentido transversal, tendo em conta que o Aqueduto não faz um ângulo de 90 graus como atrás indicado, resulta um assentamento diferencial de 1mm entre a parede norte e a parede sul nas secções mais condicionadas. Tendo em conta que o Aqueduto tem uma largura de 3.40 m, o limite de $L/1000$ é igual a 3.4 mm, valor que por conseguinte não é superado pelo assentamento de 1 mm atrás referido, pelo que também no sentido transversal a deformação seria aceitável por este critério.

2.4.2. Verificação aos Estados Limites Últimos

A verificação aos estados limites últimos foi feita através do cálculo das tensões máximas, considerando a actuação simultânea do peso próprio da estrutura e o efeito dos deslocamentos impostos, tendo-se em conta esforços para a combinação ELU de acções como foi atrás explicada, com 1.0 x Peso próprio e 1.0 x Esforços devidos aos deslocamentos impostos.

As tensões existentes na estrutura do Aqueduto, antes da obra do Metropolitano com direcção horizontal (F11), são aproximadamente nulas, enquanto no sentido vertical (F22) são as decorrentes do peso próprio do Aqueduto. Apresenta-se, em seguida, os respectivos diagramas de forças, para a acção do peso próprio, para o efeito dos deslocamentos impostos e para a acção conjunta dos mesmos. O efeito dos deslocamentos impostos é significativo tanto na direcção horizontal como vertical, essencialmente devido as tracções que surgem em sua consequência, havendo o efeito atenuador do peso próprio apenas no sentido vertical.

Apresenta-se em seguida apenas os diagramas de F11 e F22, já que se observou que as forças F12 não são significativas.

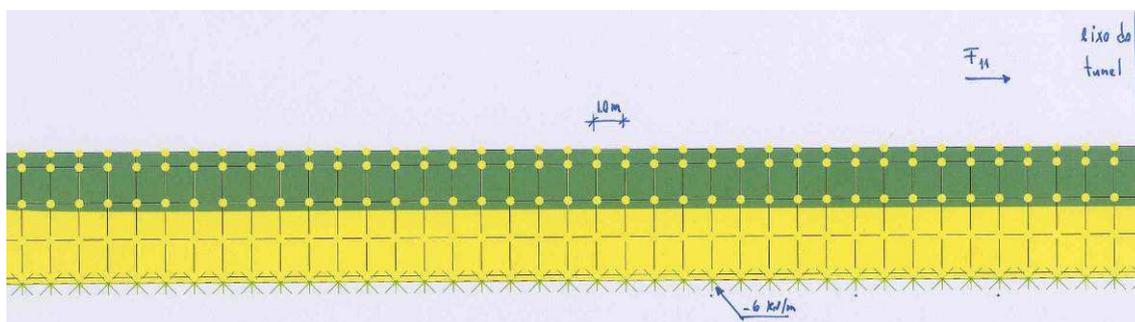


Figura 4 – Forças na direcção horizontal F11 para a acção do peso próprio

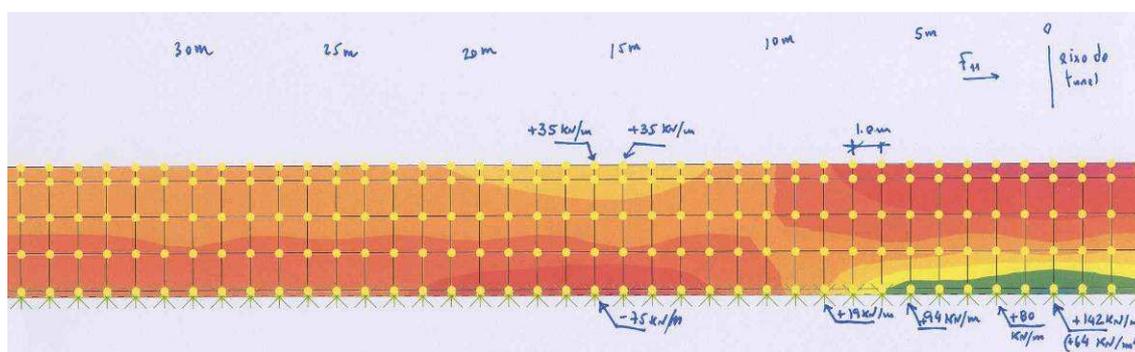


Figura 5 – Forças na direcção horizontal F11 para o efeito dos deslocamentos impostos

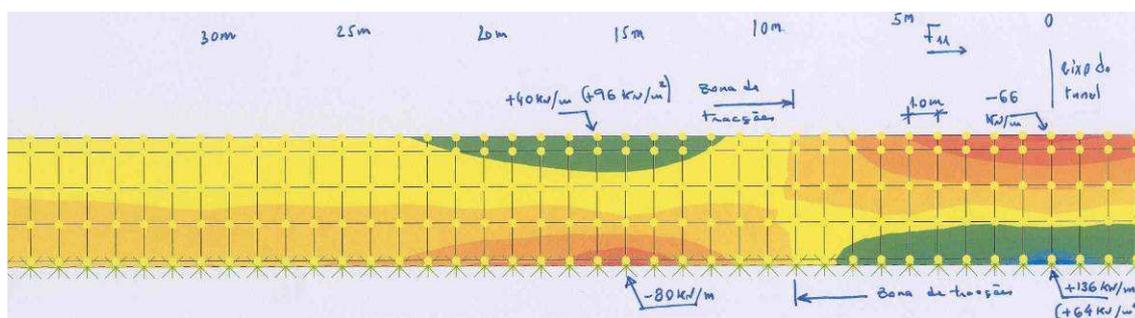


Figura 6 – Forças na direcção horizontal F11 para acção conjunta do peso próprio e do efeito dos deslocamentos impostos

Na direcção horizontal o resultado de conjunto não difere de forma significativa do resultado do efeito dos deslocamentos impostos. Conclui-se a existência de tensões de tração máximas no sentido longitudinal do Aqueduto ao nível da soleira de 64 kN/m² e de 96 kN/m² ao nível da cobertura a cerca de 15 m do eixo do túnel do Metropolitano, estando por conseguinte abaixo do valor admissível de 100 kN/m². As tensões de compressão máximas estão muito abaixo do valor admissível de 1000 kN/m².

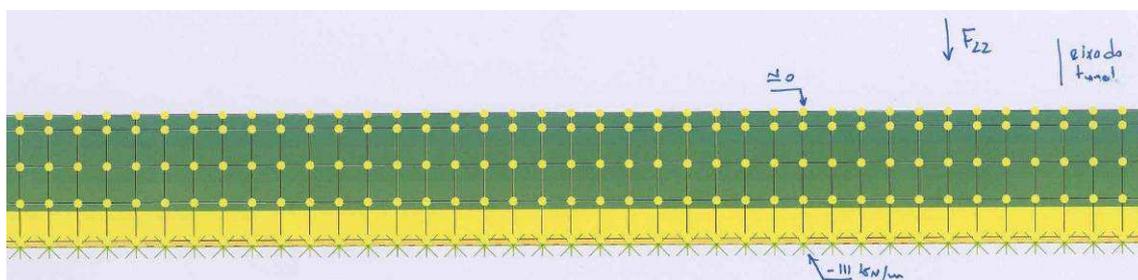


Figura 7 – Forças na direcção horizontal F22 para a acção do peso próprio

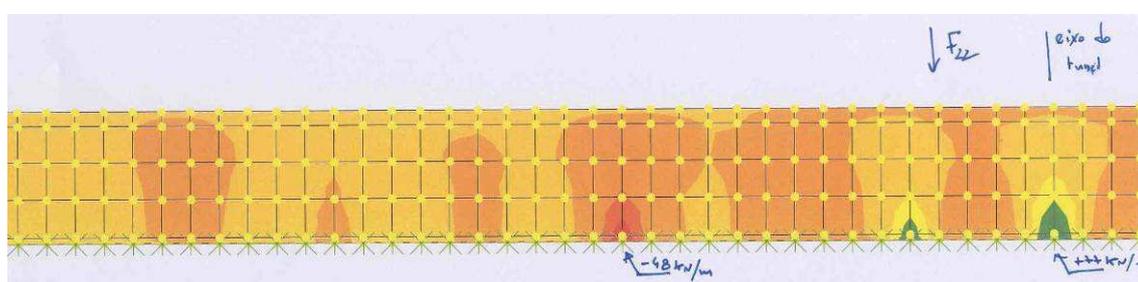


Figura 8 – Forças na direcção horizontal F22 para o efeito dos deslocamentos impostos

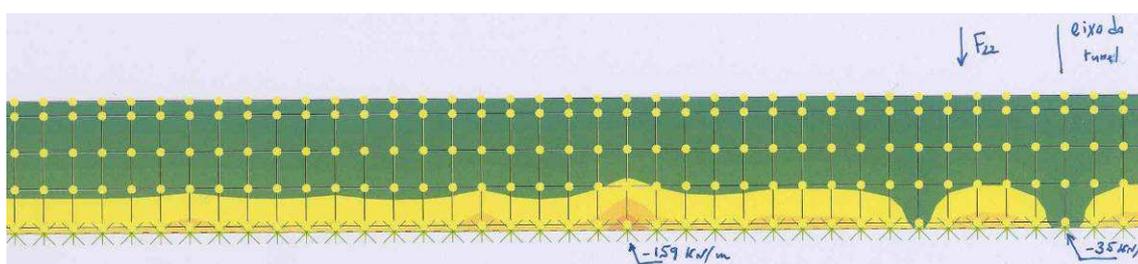


Figura 9 – Forças na direcção horizontal F22 para acção conjunta do peso próprio e do efeito dos deslocamentos impostos

Na direcção vertical o resultado de conjunto difere de forma significativa do resultado do efeito dos deslocamentos impostos, já que existe o efeito atenuador do peso próprio no sentido vertical. Conclui-se a existência de tensões de tracção máximas no sentido vertical muito abaixo do valor máximo admissível de 100 kN/m². As tensões de compressão máximas estão muito abaixo do valor admissível de 1000 kN/m².

3. CONCLUSÕES

O estudo permite concluir que, para os níveis de deslocamentos do solo indicado no capítulo 1, irão surgir tracções ao nível da cobertura do Aqueduto, ainda que com valor aceitável. Conclui-se assim que não deverá surgir fendilhação, a qual apresentaria sentido transversal ao eixo longitudinal do Aqueduto ao nível da sua cobertura nas zonas a cerca de 15 m de cada lado do eixo do futuro túnel do Metropolitano. Igual conclusão pôde ser obtida ao nível da soleira do Aqueduto na zona sobre o atravessamento do futuro túnel.

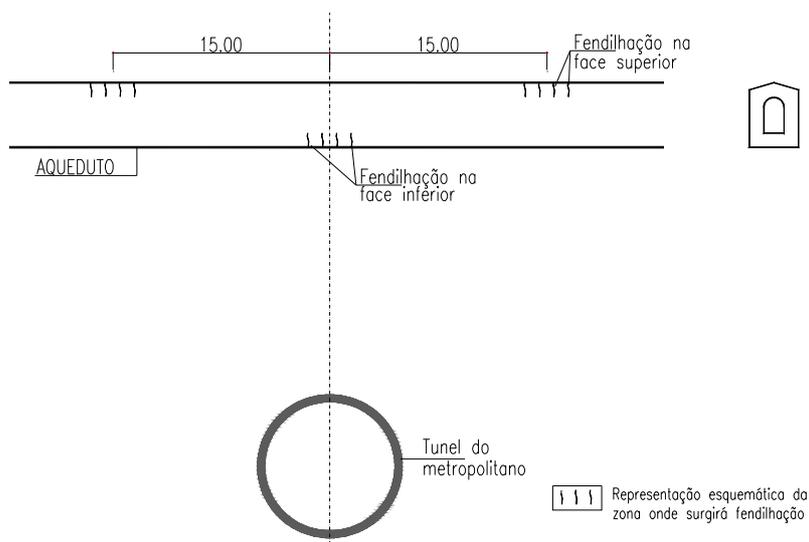


Figura 10 – Representação esquemática da localização da eventual fendilhação no Aqueduto - Alçado

4. FICHA TÉCNICA

Avaliação Estrutural

João Appleton

Nuno Travassos

Desenho

Luís Oliveira

Informática

Pedro Almeida

Secretariado

Isabel Costa

José Pinto

Lisboa, 2009, Abril, 13



João Appleton

ANEXO 2

AQUEDUTO DAS ÁGUAS LIVRES
LEVANTAMENTO FOTOGRÁFICO
TROÇO PRINCIPAL – VISTAS EXTERIORES



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4



Fig. 5



Fig. 6



Fig. 7



Fig. 8



Fig. 9



Fig. 10

AQUEDUTO DAS ÁGUAS LIVRES
LEVANTAMENTO FOTOGRÁFICO
TROÇO PRINCIPAL – VISTAS INTERIORES

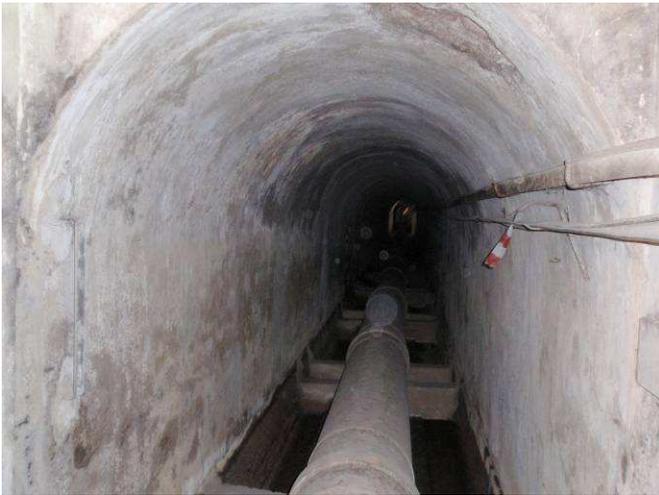


Fig. 1



Fig. 2

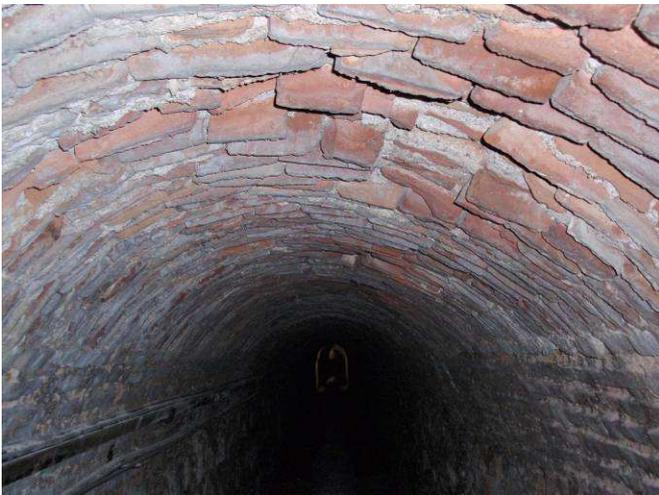


Fig. 3



Fig. 4



Fig. 5



Fig. 6



Fig. 7



Fig. 8



Fig. 9



Fig. 10



Fig. 11



Fig. 12



Fig. 13



Fig. 14



Fig. 15



Fig. 16



Fig. 17



Fig. 18



Fig. 19



Fig. 20



Fig. 21

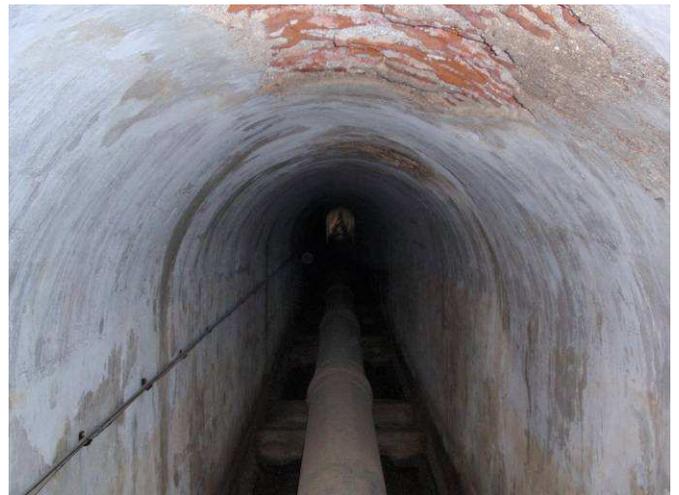


Fig. 22



Fig. 23



Fig. 24



Fig. 25



Fig. 26



Fig. 27



Fig. 28



Fig. 29



Fig. 30



Fig. 31



Fig. 32

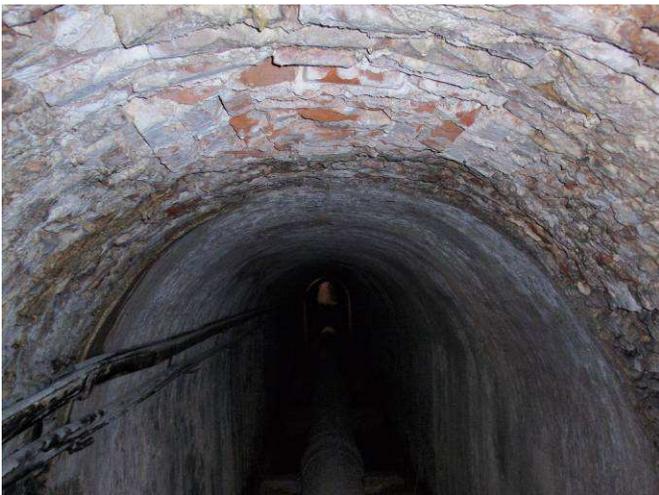


Fig. 33



Fig. 34



Fig. 35



Fig. 36



Fig. 37



Fig. 38



Fig. 39

AQUEDUTO DAS ÁGUAS LIVRES

LEVANTAMENTO FOTOGRÁFICO

RAMAL 4



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

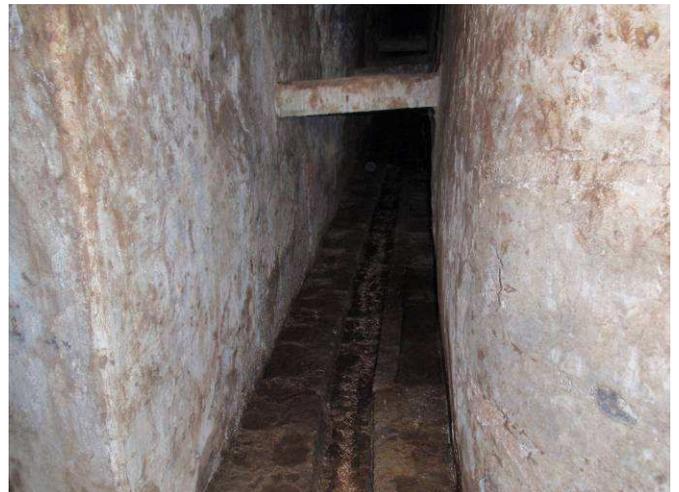


Fig. 4



Fig. 5



Fig. 6

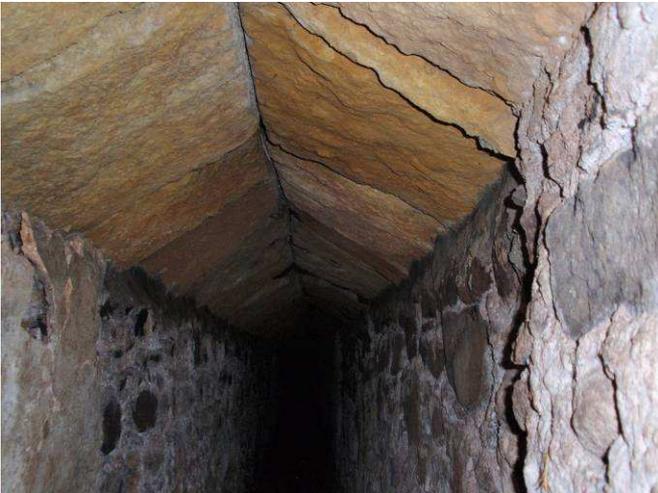


Fig. 7



Fig. 8

ANEXO 3

