

RECONSTRUÇÃO DO BALUARTE DO CAVALEIRO DA MURALHA DE CHAVES, PORTUGAL

Costa¹, A., Viana da Fonseca², A., Guedes³, J., Raposo⁴, N., Paupério⁵, E.

¹ Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, agc@ua.pt

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, viana@fe.up.pt

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, jguedes@fe.up.pt

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Viseu, Portugal, nraposo@dcivil.estv.ipv.pt

⁵ Instituto da Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, pauperio@fe.up.pt

RESUMEN

O presente artigo irá abordar os aspectos mais importantes do projecto de reconstrução da muralha de Chaves, Portugal, que foi levado a cabo em 2005. Após a ocorrência prévia de duas derrocadas (em 2001 e em 2004), cujas causas são sucintamente expostas, foi lançado um concurso para reconstrução da muralha tendo sido feita a adjudicação à empresa STAP, SA. Esta solicitou a colaboração do Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na avaliação dos condicionalismos geotécnicos e estruturais locais de modo a ser desenvolvida uma solução segura e mais adaptada ao cunho patrimonial da Muralha de Chaves. Através desta cooperação, foram desenvolvidos diversos estudos que, entre outros aspectos, permitiram a realização de análises quantitativas de caracterização dos condicionamentos locais da muralha, nomeadamente no que respeita aos materiais de aterro e às condições de fundação, fundamentais para a definição duma solução de reconstrução adequada da referida muralha.

Em termos gerais, salienta-se que a solução de reconstrução desenvolvida procurou utilizar o material da derrocada da muralha seguindo técnicas construtivas próximas do original: processo manual com escolha das pedras para um bom embricamento entre pedras e entre pedras e aterro, boa compactação e drenagem do aterro no tardo do muralha, boa drenagem dos terrenos envolventes e ligeira inclinação para o interior do aterro das pedras que executam a muralha.

Serão focados neste artigo os três diferentes níveis de análise directamente associados às condições existentes ou a implementar no local que estiveram envolvidos no desenvolvimento do projecto de reconstrução da muralha: verificação das condições de fundação da muralha; avaliação criteriosa das características dos materiais geotécnicos envolvidos; e concepção de uma solução estrutural que, enquanto cumprisse os requisitos de reposição patrimonial, satisfizesse as condições de segurança deste tipo de estrutura geotécnica. Assim, de modo a garantir a segurança desta estrutura de suporte, a solução desenvolvida envolveu o reforço das fundações, a selecção de materiais de aterro e drenantes que garantissem as características mecânicas e hidráulicas que confeririam impulsos consentâneos com a geometria apresentada, e a definição de uma estrutura de alvenaria e um processo construtivo compatíveis com as características da muralha. Serão abordados, no artigo, as características mais importantes destes três aspectos da solução de reconstrução.

BREVE RESENHA HISTÓRICA E DESCRIÇÃO DOS RECENTES ACONTECIMENTOS

Em 2001 parte do pano da muralha do baluarte do cavaleiro da cidade histórica de Chaves ruiu. Este património que hoje se conhece resulta da transformação da estrutura defensiva medieval que Duarte D'Armas ilustrou no Séc. XV (Figura 1) para uma estrutura abaluartada pela necessidade da defesa da fronteira após a Restauração. Sendo uma das principais praças de guerra do Norte de Portugal o actual traçado tem por base a técnica de Vauban e é atribuída ao francês Michel L'École. Segundo bibliografia, do castelo primitivo apenas a torre de menagem se apresenta facilmente identificável, tendo sido o restante das estruturas medievais derrubadas, reutilizadas e adaptadas ao novo sistema defensivo abaluartado que terá multiplicado por três o perímetro medieval fortificado existente [1, 2].

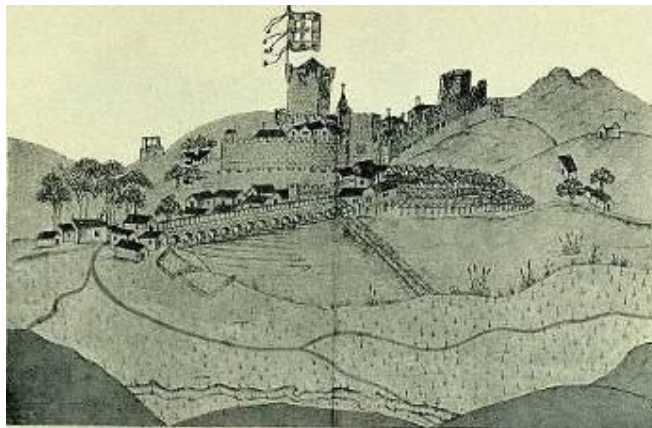


Figura 1. Chaves medieval – Ilustração do séc. XV de Duarte D'Armas.

Tendo resistido às investidas espanholas e às invasões francesas o Baluarte do Cavaleiro da muralha de Chaves sucumbiu perante as fortes chuvadas do Inverno de 2001 que foi, como muitos bem lembrarão, particularmente agressivo, estando ainda presente o grave acidente da queda da Ponte Hintze-Ribeiro, em Entre-os-Rios, entre muitas outras perdas. Refira-se que o troço de muralha que ruiu possuía casas adossadas à muralha em toda a extensão da rua (Figura 2) tendo sido demolidas as construções afectadas pela primeira derrocada mantendo-se as que ficaram sem danos aparentes na primeira reconstrução [3].



Figura 2. Baluarte do Cavaleiro a) 1993: casas adossadas à muralha em toda a sua extensão [3] b) 2005: Após a primeira reconstrução só existiam casas adossadas em parte da muralha.

Após este primeiro acidente fez-se um levantamento das hipotéticas razões associadas a esta rotura, tendo-se subsquentemente desenvolvido um "projecto" de reconstrução, utilizando praticamente os mesmos materiais que haviam desmoronado e seguindo a mesma geometria expressa nas secções expostas do pano de muralha "esventrado". Nesta abordagem ao problema que se havia criado, faltou, então, o desenvolvimento de estudos quantitativos de caracterização dos materiais de aterro e da alvenaria de pedra dos paramentos, bem como de identificação e caracterização das condições de fundação, em particular dos maciços terrosos/rochosos subjacentes. Em 2004, contemporaneamente à conclusão da "reconstrução", ou seja, com a cota mais alta atingida, dá-se nova ruína do mesmo paramento (Figura 3). Foi então constituída uma comissão pericial, de que fez parte o Departamento de Geotecnia do LNEC, tendo sido identificados alguns problemas de concepção da reconstrução e processo construtivo que explicam em boa medida a reincidente ruína.



Figura 3. Segunda derrocada da muralha de Chaves (2004).

NOVA ABORDAGEM AO PROBLEMA E SOLUÇÃO ADOPTADA

Em vista dos desenvolvimentos, a Câmara Municipal de Chaves lançou novo concurso para reconstrução da muralha tendo sido feita a adjudicação à empresa STAP, SA. Esta solicitou ao Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (IC-FEUP), em particular aos seus núcleos de Geotecnia e de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património, colaboração para a avaliação dos condicionalismos geotécnicos e estruturais para a escolha de uma solução segura e mais adaptada ao cunho patrimonial da Muralha de Chaves alterando-se a solução aprovada de muro de betão revestido a pedra [4].

Aspectos Principais Associados ao Projecto

O projecto de reconstrução da muralha envolveu três níveis diferentes de análise directamente associados às condições existentes ou a implementar in-situ:

- i. verificação das condições de fundação da muralha, por análise da prospecção geotécnica existente e outra complementar, solicitada para ser realizada no decurso do estudo, que permitisse compatibilizar uma solução estrutural alternativa ao projecto base, tanto em termos de capacidade de carga como de resistência ao deslizamento por secções na base da muralha e subjacente, bem ainda como na garantia da admissibilidade da tensão de contacto em planos a esse nível, em estados de serviço;
- ii. avaliação dos materiais (solos) que deveriam compor o aterro de tardo e dos que constituiriam os septos drenantes, bem como as telas que serviriam de filtro;
- iii. concepção de uma solução estrutural que, enquanto cumprisse os requisitos de reposição patrimonial, satisfizesse as condições de segurança de estruturas geotécnicas deste tipo, tendo em vista o derrubamento, o deslizamento e um estado de tensão compatível em todas as secções do muro.

Em termos gerais, procurou-se uma solução de reconstrução que utilizasse o material da derrocada da muralha seguindo técnicas construtivas próximas do original: processo manual com escolha das pedras para um bom embricamento, boa compactação e drenagem do solo no tardo do muralha, boa drenagem dos terrenos envolventes e ligeira inclinação para o interior do aterro das pedras que executam a muralha. Tendo-se constatado, pelos registos das caracterização geotécnica (sondagens e ensaios in situ e de laboratório – descrição abaixo), que o maciço de fundação possuía camadas sensíveis a eventuais mobilizações de planos de corte (deslizamento), recorreu-se a uma técnica de reforço que materializasse colunas de maior resistências ao corte, que simultaneamente transmitissem as cargas da estrutura para camadas inferiores mais competentes (substrato rochoso). Para tal foi proposto o recurso à técnica de jet-grouting, que se ilustra na Figura 4.



Figura 4. Colunas de jet-grouting armadas para reforço das fundações da muralha de Chaves.

Durante a obra, a monitorização dos alvos topográficos situados no paramento e no coroamento foi realizada pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douros (UTAD) [5]. Este plano de monitorização foi particularmente importante para avaliar as implicações dos trabalhos de reconstrução na estabilidade da muralha e cunhais existentes. Nos pontos seguintes serão apresentados os aspectos particulares relativos aos diferentes elementos

envolvidos no projecto de reconstrução da muralha: fundação, estrutura da muralha, aterro de enchimento e sistema de drenagem.

Fundação

Problemas de Fundação: Surpresa ou Confirmação

A análise das patologias que se identificaram na alvenaria da muralha arruinada – nomeadamente fissuras sub-horizontais e abaulamento do pano (Figura 5), condicionado por sinais de preocupação sobre as características competentes do maciço para suporte da muralha, manifestados inicialmente no relatório da comissão de arbitragem após acidentes e pelos resultados das sondagens realizadas na proximidade do muro pelo Laboratório de Materiais e Solos da UTAD, induziram a realização de novas sondagens, agora no alinhamento do muro.



Figura 5. Disposição da ruína, decorrente de mecanismos indiciadores de subsidência da fundação.

A prospecção realizada pelo Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN (LGMC) [6], confirmou as suspeitas da presença de solos de características mecânicas insuficientes para garantia de segurança ao nível e logo abaixo da base da fundação da muralha, ela também agora confirmada à cota de cerca de -5m da superfície do terreno, que é, aliás, a do arruamento adjacente. Confirmou-se a prevalência de depósitos aluvionares de terraços até horizontes relativamente profundos, de média consistência (compacidade), com valores de N_{SPT} inferiores a 30, e de constituição areno-siltosa com "passagens argilosas" (Figura 6).

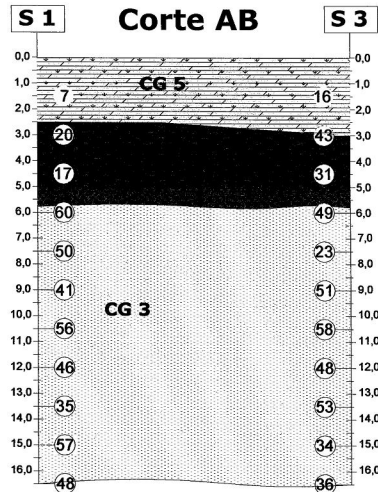


Figura 6. Log esquemático decorrente das sondagens realizadas para identificação (e confirmação) de estratos plásticos e inconsistentes.

A avaliação geotécnica destes últimos horizontes preocuparam porque na descrição das duas sondagens mais profundas, estavam bem identificadas entre as profundidades de 5 e 6m no log da sondagem S1 e 5 a 7m no log da S2. Nesta última, o horizonte entre 6 e 7m foi classificado como plástico!

Reconhecendo-se a instabilidade destes horizontes, pela sua sensibilidade às oscilações hidrológicas e hidrogeológicas, com potencial expansibilidade induzida, admitiu-se que estes estariam associados aos assentamentos sub-horizontais e processos de subsidência que teriam originado o colapso de 2001 (nessa ocasião, terá sido identificada a afluência de finos na base da muralha). Estes resultados conduziram à formulação da inevitabilidade de se proceder a reforço dos maciços de fundação a este nível. É de admitir, ainda assim, que se esse fenómeno não ocorreu antes, e só se manifestou em 2001, pode-se dever a uma eventual danificação de parte da estrutura de alvenaria induzida por ocupação abusiva das casas existentes adossadas no pano da muralha, ao longo dos últimos anos.

Solução de Reforço da Fundação

Das soluções que se consideraram para este efeito, a de jet-grouting foi considerada a mais apropriada. De facto, o jet-grouting é uma técnica de melhoria de solos realizada directamente no interior do terreno sem escavação prévia, utilizando-se para tal um ou mais jactos horizontais de grande velocidade - cerca de 250m/s - que aplicam a sua elevada energia cinética na desagregação da estrutura do terreno natural (que é tanto mais desagregado quanto mais fraco for) e na mistura de calda de cimento com as partículas de solo desagregado. Dá-se assim origem a um material de melhores características mecânicas – boa resistência ao corte e rigidez à compressão – do que o inicial. A sua menor permeabilidade poderia ser óbice se fossem constituídas colunas contíguas, o que, para manter o regime hidrológico natural, se desaconselharia neste caso, pelo que desenvolveu a solução que se descreve abaixo. Das opções disponíveis, designadas por sistema de jacto simples, ou JET1, sistema de jacto duplo, ou JET2, e sistema de jacto triplo, ou JET3, a primeira ajustava-se bem às condições locais.

Na solução a implementar, apontavam-se algumas particularidades:

- i. A pré-furação deveria ser conduzida sempre até entrar claramente (mínimo de 2 metros) nos horizontes arenosos compactos subjacentes aos argilosos acima identificados e deveria ter que ser caroteada nos primeiros metros; admitia-se que este caroteamento se devia prolongar até ao máximo de 5m de profundidade, até onde se supunha terem sido colocadas lajetas para fundação da muralha original;
- ii. A zona "jacteada" deveria incluir sempre todo o horizonte "fino e argiloso", com "engajamento" para baixo (nos maciços arenosos compactos) e para cima (no próprio alicerce da muralha) de, pelo menos, 1m;
- iii. Recomendava-se a selagem do furo como uma armadura (um perfil HEB), criando assim um "coluna armada";
- iv. Apontava-se como princípio de projecto, a realização de colunas de 800mm de diâmetro com os centros espaçados de 1,6m; garantia-se desta forma a permeabilidade do maciço.

ESTRUTURA DA MURALHA

Solução Estrutural

A solução estrutural foi desenvolvida no Instituto da Construção da FEUP, com a colaboração do Sr. Eng. Nuno Raposo, enquadrado pelos signatários. O perfil transversal do muro proposto afigura-se como sendo o mais adequado para o problema em questão: uma muralha de alvenaria de pedra, que vence um desnível de aproximadamente 12,5m. Este perfil é apresentado no esquema da Figura 7.

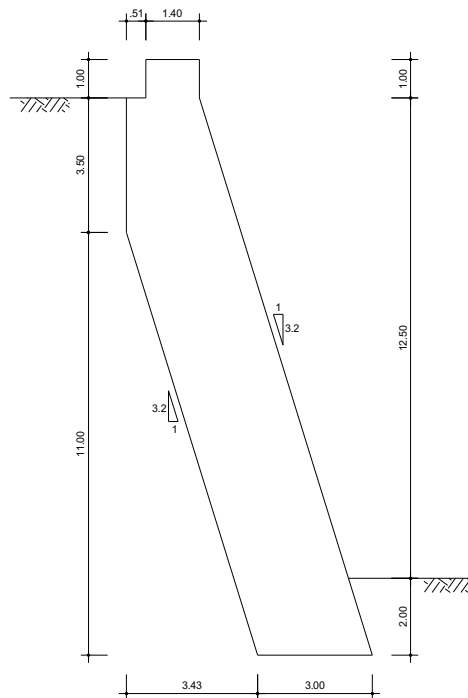


Figura 7. Perfil esquemático do novo muro em alvenaria (projecto IC/FEUP).

A inclinação projectada para o tardo do muro teve como objectivo diminuir o impulso activo, bem como criar uma excentricidade do peso próprio do muro contrária àquela provocada pelo impulso activo do solo suportado. Conseguiu-se desta forma uma solução que, por um lado, minimizava o volume de pedra e que, por outro, evitava tracções em secções horizontalis do muro, facto importante por se tratar de um muro de alvenaria de pedra, com resistência à tracção muito reduzida. A inclusão de um eficiente sistema de drenagem levou à não consideração do impulso da água (Figura 8); considerou-se o peso volúmico saturado do solo suportado, já que em condições de pluviosidade intensa, apesar da pressão de água nos poros ser próxima de zero junto do tardo do muro, o solo estará próximo da saturação, já que se admite o desenvolvimento de redes de percolação estabelecidas no maciço de tardo.

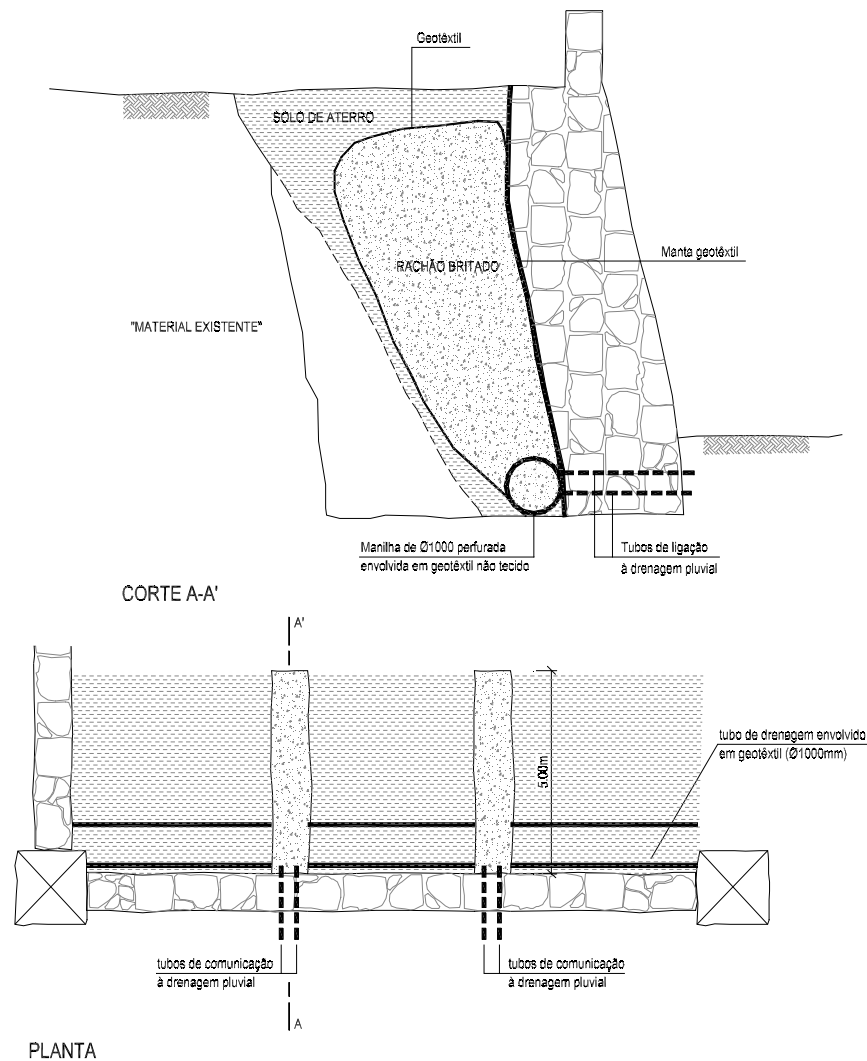


Figura 8. Sistema de projectado: valas com brita e geotêxtil manilhas e tubos de escoamento.

Processo Construtivo

Em estruturas de grande porte como esta, é particularmente importante estabelecer um processo construtivo eficaz e que permita compatibilizar os diferentes elementos estruturais envolvidos, nomeadamente a alvenaria de pedra da muralha, o aterro e os elementos de drenagem no tardo. No caso em estudo, preconizou-se a construção da muralha em simultâneo com a execução do aterro, com a compactação a ser efectuada patamar a patamar [7]. Entre os dois materiais foi colocada uma manta de geotextil e procurou-se que a pedra a utilizar na reconstrução da muralha fosse a existente aconselhando-se a reutilização de pedra resultante da derrocada. Escolheu-se para tal pedra do remate superior da muralha. Previu-se ainda a construção de uma base de cantaria de boa qualidade e pedras de dimensões apropriadas, assente na fundação da muralha, com largura semelhante a esta e altura de 1,0m, de modo a constituir uma boa base de apoio e ligação aos restantes troços em alvenaria. Procurou-se um bom embricamento entre pedras e entre estas e o aterro de tardo, devidamente compactado, em socalcos desfasados entre camadas de pedra, de forma a evitarem-se linhas sub-horizontais preferenciais de rotura.

Refere-se ainda como aspecto importante do projecto, a necessidade de se efectuar uma boa ligação entre a muralha antiga e a muralha nova. A zona de muralha a reconstruir deveria imbricar com a muralha existente, tendo para isso no desmonte sido deixada uma superfície irregular que permitisse "coser" as duas alvenarias. Sugeriu-se ainda a incorporação de varões metálicos (varões Ø20 em aço inox 316L) que funcionassem como gatos na ligação dos dois troços. Estes varões, seriam chumbados com um sistema tipo "Cintec" na alvenaria existente e embutidos na alvenaria a executar (Figura 9).



Figura 9. Pormenores do encastramento do novo pano de muralha com o já existente: varões selados com grout.

Ensaios de argamassas

Foram ainda efectuados na FEUP [8], ensaios de corte nas juntas de pedra granítica com argamassas de diferentes traços e dois níveis de tensão de confinamento, normal à junta, de forma a definir o traço da argamassa a utilizar. Para tal recorreu-se a um equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da FEUP, que se ilustra na Figura 10.



Figura 10. perspectiva da máquina de deslizamento de diáclases (foto gentilmente cedida pelo Prof. Quintanilha de Menezes, responsável por este equipamento).

A identificação das amostras, dos diferentes traços ensaiados, carga normal associada e resultados obtidos são apresentados no Quadro I.

Quadro I. Identificação dos ensaios efectuados

Ensaio	Amostra	Traço	Cimento Portland:Inerte: Cal hidráulica	Inerte	Carga normal (kN/m ²)	Tensão de corte (kPa)
1ª série	A1	T1	1:3	Areia fina	250	1323
	A3	T1	1:3		120	971
	A4	T2	1:3:1		250	768
	A5	T1	1:3		120	880
2ª série	2A1	T _{2A1}	1:4:0,5	Meia areia	120	1033
	2A2	T _{2A1}	1:4:0,5		250	1634
	2A3	T _{2A2}	1:5:0,5		120	896
	2A4	T _{2A2}	1:5:0,5		250	1478
	2A5	T _{2A3}	1:6:0,5		120	834
	2A6	T _{2A3}	1:6:0,5		250	948

A Figura 11 apresenta os gráficos da tensão de corte versus deslocamentos obtidos nos ensaios de corte para as amostras ensaiadas.

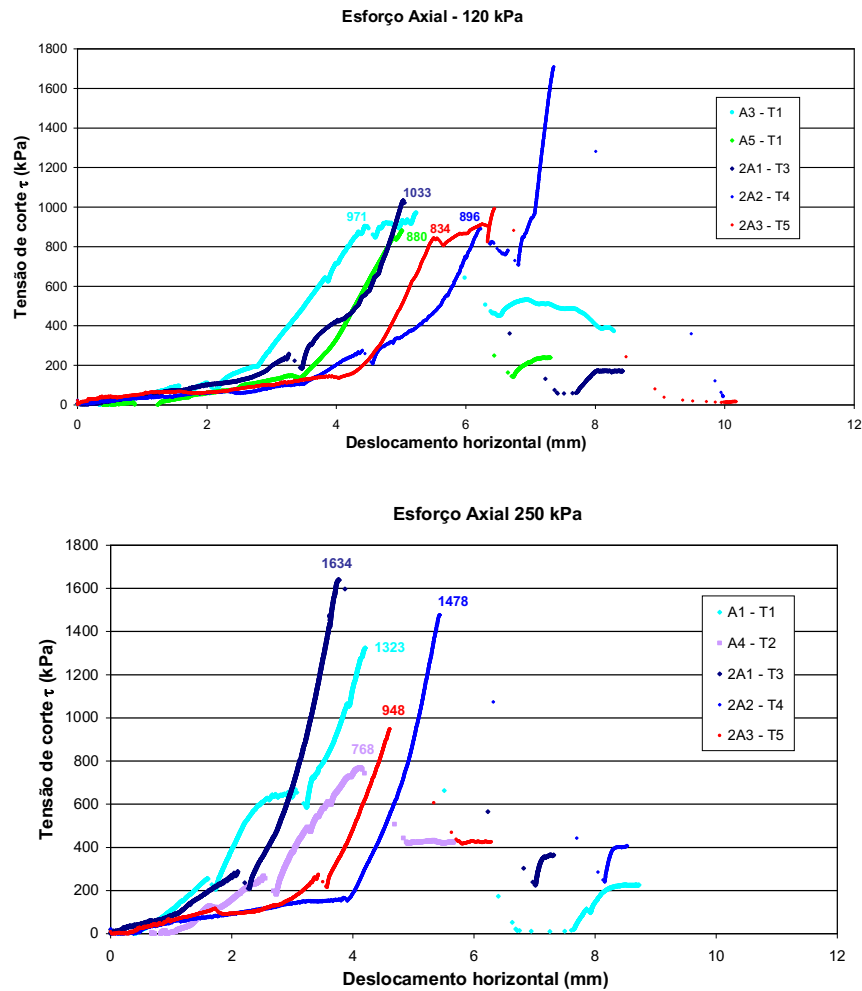


Figura 11. Tensão de corte obtida nos provetes ensaiados para 2 níveis diferentes de carga normal.

Os dois níveis de carga normal considerados correspondem à acção gravítica da muralha ($l=3,0m$) sobre as juntas, supostas horizontais, a meia altura ($h = 7,5m$) e na base ($h = 11,5m$). A análise dos resultados mostra que, apesar do traço da argamassa da 1ª série (ensaios Ai-Ti) ser mais forte (mais cimentícia) do que o da 2ª série (ensaios 2Ai-Ti), a utilização de um inerte mais fino resultou numa argamassa com menor resistência ao corte na junta. Na 2ª série de ensaios observa-se a diminuição da resistência ao corte com a diminuição do ligante. Por outro lado, para o mesmo traço o valor da resistência ao corte aumenta naturalmente com o aumento da carga normal.

O cálculo estrutural do muro mostrou que é expectável na base uma tensão característica transversal ao muro $\tau_{sk} = 230 / 3 = 77kPa$ e a meia altura $\tau_{sk} = 110 / 3 = 37kPa$. Admitiu-se como valor da acção de cálculo o valor característico multiplicado pelo coeficiente de majoração $\gamma_s = 1,5$, ou seja $\tau_{sd} = 115kPa$ na base e $\tau_{sd} = 55kPa$ a meia altura. Considerando-se que na construção do muro apenas 50% da secção transversal do muro se encontra argamassada, a tensão nas juntas sofre um incremento de cerca de 100%. Para que se verifiquem as condições de segurança será necessário que os valores da resistência de cálculo sejam superiores às acções de cálculo, $\tau_{sd} \leq \tau_{rd}$. Supondo que os valores da

resistência de cálculo resultam da redução dos valores característicos de um coeficiente $\gamma_r = 1,5$, tem-se para valores característicos da resistência os seguintes valores mínimos:

- A meia altura do muro: $\tau_{rk} \geq 2 * \tau_{sd} * 1,5 = 165\text{kPa}$
- Na base do muro: $\tau_{rk} \geq 2 * \tau_{sd} * 1,5 = 345\text{kPa}$

Comparando os valores característicos resistentes exigíveis mínimos com os valores dos ensaios, verifica-se que qualquer um dos traços ensaiados resulta em valores de resistência superiores a 2,5 vezes os valores exigíveis. No entanto os ensaios não são totalmente representativos da situação real e o número de amostras ensaiadas não permite efectuar um estudo estatístico aos valores resistentes. Por este motivo e porque a execução da argamassa em obra não foi alvo do mesmo controlo de qualidade realizado em laboratório, adoptou-se um dos traços da primeira série 1:4:0,5 para a argamassa a utilizar na reconstrução da muralha.



Figura 12. Pormenores dos blocos ensaiados na máquina de deslizamento de diáclases (foto gentilmente cedida pelo Prof. Quintanilha de Menezes, responsável por este equipamento).

ATERRO DE ENCHIMENTO E SISTEMA DE DRENAGEM

Seleção de Materiais

Sendo o muro em causa uma estrutura “não corrente”, todos os dispositivos construtivos recomendados foram cuidadosamente seleccionados e criteriosamente verificados. A qualidade dos solos a aterrar foi, neste caso, determinante para que se garantisse os pressupostos de cálculo que foram assumidos para as verificações de estabilidade.

O solo seleccionado para enchimento foi resultado de uma série de análises realizadas no Laboratório de Geotecnia da FEUP (<http://paginas.fe.up.pt/sgwww/labgeo/>), como sejam, as de identificação granulométrica e limites de consistência, que permitiram classificar e basear a opção tomada.

Sobre o solo de aterro seleccionado e o controlo de compactação

A selecção do(s) solo(s) para a realização do aterro no tardo do muro, fez-se por análise das características físicas de oito materiais de empréstimo de fornecedores locais. Os solos seleccionados, e que se vêm constituindo em aterros resistentes, demonstraram porém que não têm a graduação e as características de compactação que se pretendem para um aterro tão alto, podendo não atingir a elevada resistência que se pretendia obter em projecto. As classificações oscilaram entre areias bem graduadas e mal graduadas, estas últimas imediatamente rejeitadas, sendo feita a opção final pelo material a utilizar a que decorreu do melhor resultado do estudo de compactação. Assim mesmo se assentou num solo saibroso,

classificado de SW-SM – areia bem graduada com silte, que veio a demonstrar níveis de trabalhabilidade muito bons (o peso volúmico seco máximo para o ensaio Proctor normal atingido foi de 18,4kN/m³ para um teor em água óptimo de 12,2%). O critério que foi adoptado para o grau de compactação em obra foi de garantia de um limite mínimo de 95%, tendo-se obtido em obra um valor médio de 97,7% e não tendo havido registos inferiores àquele limite.

O carácter granular deste material foi condição óptima para garantir que, juntamente com um dispositivo de drenagem complementar, não se desenvolvessem pressões hidrostáticas (ou mesmo hidrodinâmicas) que acrescessem os impulsos sobre a parede constituída pela pedra de alvenaria (esta mesma de junta aberta, também poderia contribuir para o alívio de forças hidrostáticas) mas, sobretudo, para evitar a diminuição do estado de tensão efectiva sub-vertical, que em cada secção potencial de deslizamento ou corte (em particular na base do muro) pudesse contribuir para a perda de confinamento, o que, num mecanismo de resistência cuja parcela atrítica é determinante, poderia significar instabilidade.

Em acréscimo a esta criteriosa selecção do material de aterro, considerou-se a utilização de esporões drenantes que ligariam a um dreno na base do aterro, utilizando uma tubagem de drenagem de água. Estes tubos sub-horizontais de drenagem, que poderiam ser de betão com furação superior e envoltos em geotêxtil, deveriam ter secção de 1000mm e resistir a pressões de cerca de 500kPa (sobrecarga estimada máxima).

Os esporões drenantes apresentavam um desenvolvimento em planta, atrás da linha da muralha, de cerca de 1/3 da altura útil e poderiam ter uma inclinação de base de cerca de 30° (ver esquema da Figura 8). O material de filtro deveria ser constituído por rachão ou pedra britada, pouco friável e com um valor de desgaste no ensaios de Los Angeles inferior a 30%. Ainda em relação ao sistema de drenagem, e à luz da granulometria do material de aterro, para que os geotêxteis garantissem a sua função drenante e de filtro (sem colmatação de finos), foram seleccionadas telas do tipo não tecido, com dimensão característica da abertura do geossintético, que garantisse a condição de "não retenção" e "não colmatação", e que são função do Coeficiente de Uniformidade (Cu) e do diâmetro médio efectivo (D50). Assim, para um geossintético não tecido, com espessura menor que 2mm, dever-se-á assegurar que:

$$\frac{O_{90}}{D_{50}} = 1 \text{ para } C_u = 1,$$

$$\frac{O_{90}}{D_{50}} = 3 \text{ para } C_u > 5,$$

interpolando-se para os valores intermédios. A designação O₉₀ corresponde ao diâmetro de abertura equivalente (ou seja, o diâmetro da malha e geotêxtil para o qual 90% dos diâmetros são inferiores àquele valor).

Notas Para Execução dos Trabalhos

Todos os pressupostos da solução apresentada se basearam na existência de uma fundação compacta, tanto para suporte das tensões transmitidas pelo muro, como para a resistência ao deslizamento pela base ou seja, no pressuposto da execução do projecto de reforço da fundação, tal como efectivamente ocorreu. Relativamente à realização dos trabalhos relativos ao aterro e sistema de drenagem, realça-se que:

- i. Os solos que constituem o corpo do aterro (não plástico) deveriam ser compactados com cilindro de porte manual vibrador e em camadas de 20cm, garantindo 90% do valor máximo de compactidade obtido no ensaio Proctor Leve ou Normal;
- ii. Os geotêxteis deveriam ser dispostos em mantas sempre bem justapostas nos seus extremos e fazer interface entre o solo e os filtros e (ou) a pedra da muralha;
- iii. Os tubos sub-horizontais de drenagem teriam ligação, no ponto de confluência com os septos drenantes, a tubos inseridos na base do painel da muralha para encaminhamento das águas para o sistema de drenagem pluvial (ver esquema da Figura 1).

NOTAS FINAIS

Do que se expôs, salienta-se que a solução final para a reconstrução da Muralha do Baluarte do Cavaleiro de Chaves, viria a contemplar três vertentes essenciais para garantir a segurança desta estrutura de suporte (porque disso se trata, dadas as condições físicas que a constituem): o reforço das fundações, a selecção de materiais de aterro e drenantes que garantissem as características mecânicas e hidráulicas que confeririam impulsos consentâneos com a geometria apresentada, e a definição de uma estrutura de alvenaria e um processo construtivo compatíveis com as características da muralha.

Enfatiza-se ainda que o bom desempenho estrutural desta solução pressupôs um rigoroso controlo de qualidade dos materiais e do processo construtivo que constituem a base do real e eficiente cumprimento de um projecto de execução em geotecnia e em estrutura em alvenaria de pedra, sendo ainda aconselhável manter uma monitorização de deslocamentos no tempo a partir de leituras topográfica de marcas colocadas na face exposta da muralha. As Figuras 13 a 17 que a seguir se apresentam ilustram sequencialmente os trabalhos executados.



Figura 13. Preparação para a execução de Jet-grouting e arranque da fundação da muralha.



Figura 14. Execução de drenagens transversais e paralela à muralha. Pormenor do arranque do paramento da muralha.



Figura 15. Ligação dos drenos transversais ao dreno longitudinal. Compactação e ensaios no aterro controlado.



Figura 16. Últimos trabalhos.



Figura 17. Aspecto final do Baluarte do Cavaleiro da Muralha de Chaves.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.monumentos.pt/>. Consultado em 13/07/2009.
- [2] <http://www.amigosdoscastelos.org.pt/>. Consultado em 13/07/2009.
- [3] <http://chaves.blogs.sapo.pt/>. Consultado em 13/07/2009.
- [4] FONSECA, A.V.; RAPOSO, N. "AVALIAÇÃO DOS CONDICIONALISMOS GEOTÉCNICOS PARA A SOLUÇÃO DE RECONSTRUÇÃO DA MURALHA DO BALUARTE DO CAVALEIRO DE CHAVES". Instituto da Construção, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [5] PINTO, J.T.Q.S.; VARUM, H.S.A.; GUEDES, J.P.M., MORAIS, J.J.L. "PROCESSO DE MONITORIZAÇÃO ADOPTADO NA RECONSTRUÇÃO DO PANO DE MURALHA DO BALUARTE DO CAVALEIRO EM CHAVES". CINPAR 2008, Aveiro, 2008.
- [6] NEVES, E.; TEIXEIRA, A. "RELATÓRIO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO". Relatório nº 2005/2018 do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN, Porto, 2005.
- [7] COSTA, A.; GUEDES, J.M.; PAUPÉRIO, E. "MURALHA DE CHAVES – BALUARTE DO CAVALEIRO. METODOLOGIAS PARA OS TRABALHOS DE RECONSTRUÇÃO". Instituto da Construção, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [8] COSTA, A.; GUEDES, J.M.; PAUPÉRIO, E. "RELATÓRIO DE ENSAIO DE ARGAMASSAS A UTILIZAR NA RECONSTRUÇÃO DO TROÇO DO BALUARTE DO CAVALEIRO DA MURALHA DE CHAVES". Instituto da Construção, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 2005.