

IP4 (A4) - Túnel do Marão. Das Soluções de Projeto à Realidade em Obra

Barbosa, Paulo J. N. Ferreira
Cenor, Lisboa, Portugal, paulo.barbosa@cenor.pt

Baião, Carlos J. Oliveira
Cenor, Lisboa, Portugal, carlos.baiao@cenor.pt

Gonçalves, Luís P. C. Costa
EPOS, Lisboa, lg@epos.pt

Monteiro, Bernardo P. B.
IP Engenharia, Lisboa, bernardo.monteiro@ipengenharia.pt

RESUMO: O túnel do Marão é constituído por dois túneis paralelos com aproximadamente 5 665 m de extensão cada, perfazendo um total de 11 330 m, que atravessam a Serra do Marão na direção aproximada Oeste / Este, inserindo-se na Autoestrada do Marão, entre Amarante e Vila Real, em Portugal. O túnel atravessa formações do Ordovícico e do Complexo Xisto grauváquico (CXG) do Câmbrio. Os trabalhos de escavação do túnel do Marão tiveram o seu início em Julho de 2009 e foram definitivamente suspensos em Julho de 2011, altura em que se encontravam escavados cerca de 7 km de túnel na totalidade das duas frentes. Após Julho de 2011 realizaram-se exclusivamente trabalhos de manutenção da obra já executada e em Fevereiro de 2014 foi realizado um novo concurso para o projeto e construção dos trabalhos necessários à conclusão do túnel. No presente artigo descrevem-se as principais atividades desenvolvidas no âmbito da adaptação das soluções de projeto às condições geológicas e geotécnicas encontradas em obra, realçando-se o benefício e a mais-valia na otimização de soluções, processos construtivos e de segurança decorrentes da realização sistemática de cartografia geológica e geotécnica e da presença permanente do projetista em obra. Apresenta-se a comparação do zonamento geológico-geotécnico definido na fase de projeto com o zonamento real obtido e as consequentes implicações nos suportes primários aplicados. Apresentam-se, também, as principais alterações introduzidas no projeto decorrentes da sua adaptação às reais condições geológico-geotécnicas do maciço rochoso. Faz-se a análise dos resultados obtidos na instrumentação. Apresentam-se, ainda, os trabalhos de reforço dos suportes primários e do próprio maciço, resultantes da ocorrência de alguns incidentes geológicos que ocorreram no decurso da abertura do túnel.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis longos, Portugal, Marão, ATO, NATM.

1 INTRODUÇÃO

Em Monteiro & Azevedo (2016) são apresentadas as condicionantes geológicas e geotécnicas que presidiram ao lançamento em regime de conceção construção da empreitada do Túnel do Marão. Em Conceição et al. (2016) são apresen-

tados os principais aspetos geológicos e geotécnicos e outros condicionamentos que nortearam o desenvolvimento do projeto, bem como as soluções definidas, o dimensionamento dos suportes primários e dos revestimentos definitivos do túnel, o sistema de drenagem e de impermeabilização, e ainda o plano de observação

implementado.

No presente artigo, descrevem-se as principais atividades desenvolvidas no âmbito da adaptação das soluções de projeto às condições geológicas e geotécnicas encontradas em obra, realçando-se o benefício e a mais-valia na otimização de soluções, processos construtivos e de segurança decorrentes da realização sistemática de cartografia geológica e geotécnica e da presença permanente do projetista em obra. Apresenta-se a comparação do zonamento geológico-geotécnico definido na fase de projeto com o zonamento realmente obtido no decurso da escavação e as consequentes implicações nos suportes primários aplicados.

Apresentam-se, também, as principais alterações introduzidas no projeto decorrentes da sua adaptação às reais condições geológico-geotécnicas do maciço rochoso. Faz-se a análise dos resultados obtidos na instrumentação, comparando-os com os limites de alerta definidos no projeto. Apresentam-se, ainda, os trabalhos de reforço dos suportes primários e do próprio maciço, resultantes da ocorrência de alguns incidentes geológicos que ocorreram no decurso da abertura do túnel.

O túnel é constituído por duas galerias paralelas, designados por túnel norte e túnel sul, com aproximadamente 5 665 m cada um, perfazendo um total de 11 330 m de escavação subterrânea, que atravessam a Serra do Marão na direção aproximada oeste / este. Por motivos de segurança e de exploração, foi ainda prevista a realização de 6 galerias de passagem de emer-

gência veiculares/pedonais e 7 galerias de passagem de emergência estritamente pedonais na ligação entre as galerias rodoviárias, sendo que uma das galerias pedonais alberga um edifício técnico. Na Figura 1 apresenta-se a localização do Túnel do Marão.

Os trabalhos de escavação do túnel do Marão tiveram o seu início em Julho de 2009 e foram definitivamente suspensos em Julho de 2011, altura em que se encontravam escavados cerca de 7 km de túnel na totalidade das duas frentes.

A secção transversal corrente de cada um dos túneis foi definida de modo a asseverar uma área útil mínima de 97,50 m², de modo a garantir uma altura útil mínima de 5,0 m.

2 CARTOGRAFIA GEOLÓGICA E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

2.1 Introdução

A natureza do trabalho, o método construtivo preconizado, bem como o âmbito contratual impõem a elaboração de cartografia geológica e de caracterização geotécnica, em contínuo, de todos os trabalhos de escavação. Para a concretização destas tarefas o consórcio construtor e o projetista colocaram em obra uma equipa de técnicos qualificados para o efeito, constituída por geólogos e geólogos de engenharia, que garantiram o acompanhamento integral das escavações, tendo a seu cargo as responsabilidades da cartografia e da caracterização do maciço

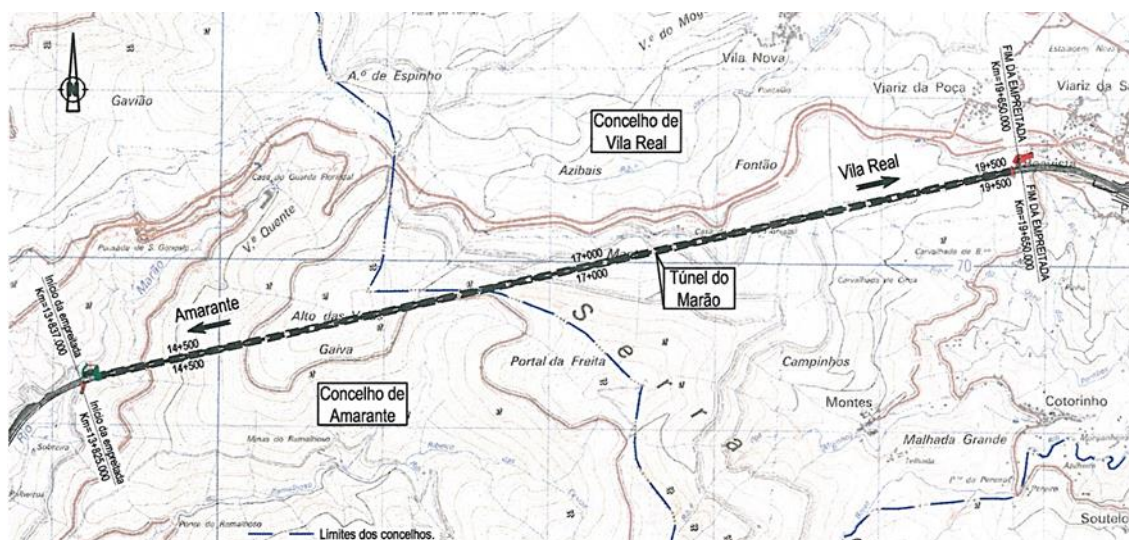


Figura 1 - Localização do Túnel do Marão

escavado, o acompanhamento e análise da monitorização, bem como todo o apoio às equipas de produção e de projeto.

A elevada complexidade estrutural da Serra do Marão, aliada à necessária confirmação da disposição litoestratigráfica, obrigou, em fase de projeto, a um extenso reconhecimento de superfície e a uma aprofundada consulta bibliográfica (i.e., Coke et al., 1995; Coke, 2000; Coke et al., 2001), com o objetivo de prever a distribuição, ao longo do traçado da obra, das diversas litofácies, o posicionamento das diversas falhas identificadas e a respetiva cinemática.

A partir do modelo geológico-geotécnico, teórico, a equipa de geologia e geotecnia estava assim preparada para as presumíveis ocorrências no decurso dos trabalhos, adaptando diariamente o modelo e, em concertação com a equipa de produção da obra, preparar os meios necessários para a correta aplicação do suporte primário preconizado em função da qualidade do maciço rochoso ocorrente.

2.2 Metodologia

Os dados coligidos na frente de trabalho permitiram a elaboração da cartografia geológica, com a execução de um mapeamento e respetivo registo fotográfico. Nesta são inscritas a determinação da atitude das principais diaclases e suas características, a ocorrência de água, litologia, falhas, entre outros aspetos relevantes. Em acréscimo, foi efetuada a representação desta informação em planta (abóboda e hasteais), o que permitiu, no caso particular de túneis gémeos, a antecipação de determinadas particularidades e propriedades geotécnicas na galeria adjacente ainda por escavar.

Quanto à caracterização geotécnica, foram efetuadas três classificações: RMR89 (Bieniawski, 1989), Q (Barton et al., 1974) e GSI (Hoek et al., 2002). Apesar do projeto definir as secções tipo de suporte em função do valor de RMR obtido na frente de escavação, a determinação do Quality Index (Q) e do Geological Strength Index (GSI) permitiu obter uma maior robustez na classificação determinativa para o suporte a instalar e uma ajuda fundamental nas situações de fronteira.

Esta informação, validada pela Assistência Técnica de Obra (ATO), era diariamente publicada em plataforma de internet desenvolvida para o efeito, permitindo acessibilidade a todos os intervenientes, sempre que necessário.

A equipa de geologia e geotecnia, em conjunto com a ATO, realizava ainda uma análise discreta sobre a blocometria, definindo in loco o número de pregagens, respetivos comprimentos e orientação.

Salienta-se que durante a fase de escavação foram executadas cerca de 1050 fichas de cartografia geológica e 3150 classificações geomecânicas, de forma continuada, garantindo a cobertura da totalidade da escavação realizada.

O projeto considerava as zonas geotécnicas em função do RMR determinado que constam da Tabela 1.

Tabela 1. Zonamento geotécnico adotado no projeto.

Zona Geotécnica	RMR
ZG1	> 45
ZG2	25 – 45
ZG3	< 25

2.3 Resultados obtidos

A comparação entre o inicialmente admitido em projeto e o realmente obtido no decurso dos trabalhos em relação à distribuição das zonas geotécnicas está patente na Figura 2. Nesta é visível que as diferenças se verificaram sobretudo na distribuição da ocorrência entre ZG1 e ZG2, sendo que a ocorrência da ZG3 foi aproximadamente semelhante ao previsto na fase de projeto. Assim, verifica-se que o troço de túnel escavado no âmbito da empreitada se enquadra maioritariamente na ZG1 (Figura 2 A). Com efeito, verifica-se que em ambos os túneis e no conjunto das 4 frentes a escavação se desenvolveu num maciço rochoso com características geotécnicas de boa qualidade (Figura 3), com pontuais decréscimos de qualidade associados a zonas tectonizadas, na generalidade bem delimitadas, como é exemplo o atravessamento da falha de Manta em que se enquadrou o maciço na ZG2. Na aproximação à falha de Gaiva, observou-se um decréscimo gradual das condições geotécnicas do maciço rochoso, tendo coincidido com a zona de encontro das frentes de esca-

vação. No túnel norte observaram-se aproximadamente 50 m de maciço enquadrável na ZG2 e 90 metros de maciço na ZG3, apresentando-se o mesmo tectonizado e tendo ocorrido nesta zona uma ocorrência geológico geotécnica de destaque. No túnel sul a zona de influência da falha de Gaiva fez-se notar numa maior extensão, sendo que se observaram cerca de 100 m de maciço correspondente à ZG2 e 60 m de maciço enquadrável na ZG3, tendo-se observado alguma alternância entre os dois zonamentos geotécnicos na aproximação à zona de tectonização mais evidente. Importa referir a presença de água em abundância na zona da falha de Gaiva, tendo-se realizado medições de caudal expeditas onde foram contabilizados caudais máximos de cerca de 300l/min.

Um fator decisivo para a definição do suporte neste tipo de maciço rochoso é a determinação da atitude e estado do diaclasamento ocorrente. Como tal, foram efetuadas cerca de 12 100 medições, cujo tratamento estatístico permitiu a elaboração de um diagrama geral de isodensidades da rede de diaclasamento que se apresenta na Figura 4.

3 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO IMPLEMENTADO E RESPETIVOS RESULTADOS

3.1 Metodologia

Numa obra com as características da presente, ou seja, um túnel com elevado desenvolvimento e elevada cobertura, a instrumentação consiste, maioritariamente, na materialização de secções de leitura das convergências, cuja observação é determinante para verificar a adequabilidade do processo construtivo preconizado em projeto às reais condições geológico-geotécnicas.

No decurso da obra foram analisadas 403 secções de medição de convergências, constituídas por cinco marcas, duas por hasteal e uma na abóboda. As medições foram realizadas com recurso a equipamento topográfico de precisão (TM30, da Leica). O espaçamento seguiu o definido em projeto, ou seja, secções espaçadas de 40 m em SP1 (suporte provisório tipo 1), espaçadas de 20 m em SP2 e 5 m em SP3.

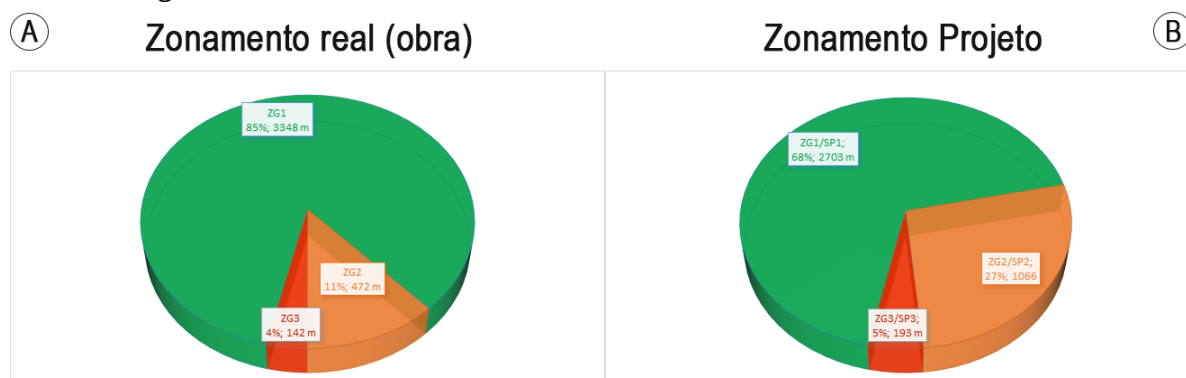


Figura 2 - Comparação entre as percentagens das diferentes zonas geotécnicas ocorrentes na empreitada e as previstas no projeto de execução

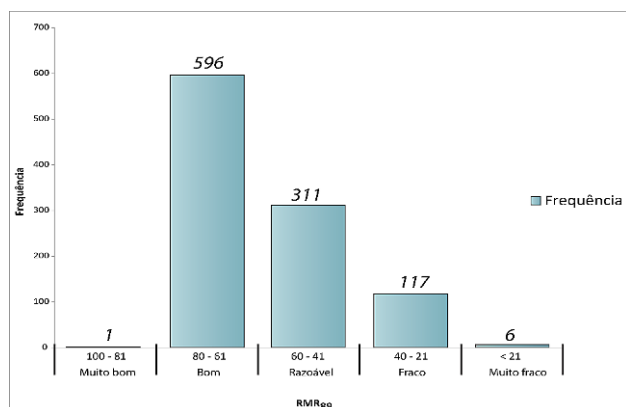


Figura 3 - Histograma de frequências das classes de RMR ocorrentes

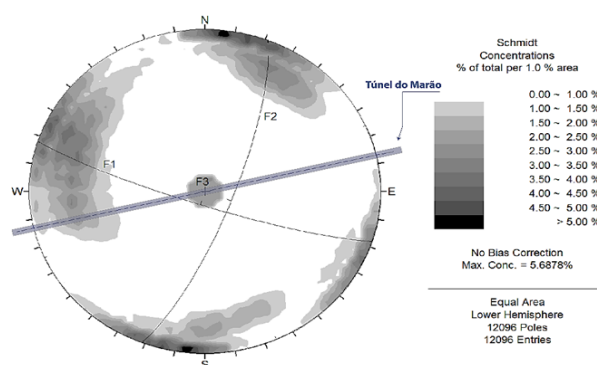


Figura 4 - Diagrama de isodensidades geral da rede de diaclasamento do troço escavado

No exterior, nomeadamente nos emboquilhamentos, encontravam-se instalados desde a empreitada anterior um conjunto de dispositivos, tais como, marcas de superfície, alvos topográficos, extensómetros, piezómetros e inclinómetros. Este conjunto de equipamentos permitiu, para além de analisar o comportamento das escavações em subterrâneo, aferir a estabilidade das estruturas de suporte dos taludes de emboquilhamento do túnel.

Todos os dados de interesse à instrumentação/monitorização foram também inseridos em aplicação web especialmente desenhada para o efeito (<http://www.tunelmarao.pt/>). Esta aplicação, de acesso condicionado aos intervenientes na obra, permitiu o acesso à informação sensível de uma forma rápida e segura, bem como a interação entre todos os responsáveis na tomada de decisão.

3.2 Análise dos resultados obtidos

Na monitorização das zonas de emboquilhamento não foi registado nesta fase da obra qualquer deformação com significado, tendo as leituras, de periodicidade mensal, evidenciado um estado de estabilização. Trata-se de um comportamento expectável, uma vez que os dispositivos já estavam instalados desde 2009, tendo durante o período referente à primeira parte da empreitada, evidenciado a estabilidade das estruturas observadas.

Refere-se que foi necessário proceder nesta fase à monitorização das secções de leitura de convergências anteriormente instaladas no troço já escavado e, tal como para os taludes de emboquilhamento, os dispositivos referidos não registaram qualquer tipo de evolução.

Em relação aos resultados obtidos durante esta fase do empreendimento, confirmaram-se os pressupostos de projeto, ou seja, observaram-se deslocamentos de pequena magnitude nas zonas geotécnicas 1 e 2 (ZG1 e ZG2), uma vez que o maciço característico destas zonas apresenta elevada resistência e uma rigidez elevada, e valores mais significativos no caso da ZG3, nomeadamente, nas zonas na dependência das

falhas mais expressivas (e.g. Falha da Gaiva).

Na Figura 5 resumem-se os valores médios de deformação observados (cordas horizontais) em função da zona geotécnica.

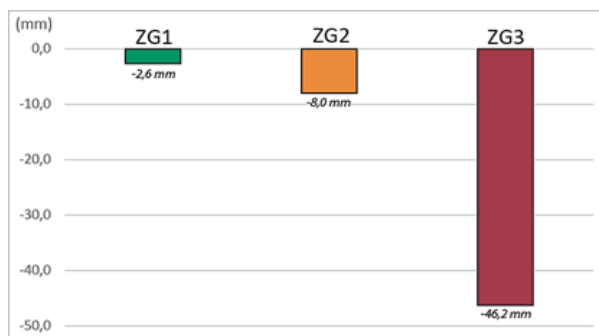
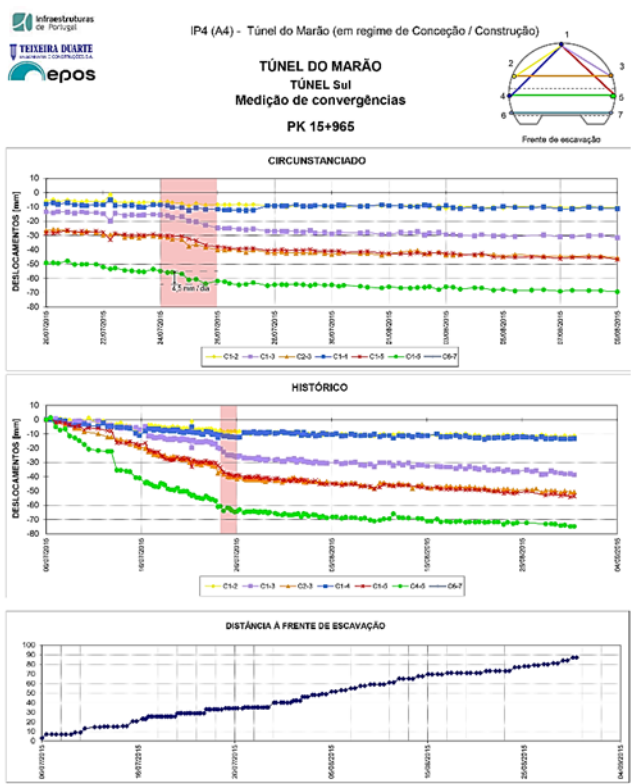


Figura 5 - Valor médio das convergências horizontais medidas em função da zona geotécnica

Enquanto os valores de convergência obtidos nas secções em ZG1/SP1 e ZG2/SP2 foram os expectáveis face à modelação realizada na fase de projeto, os resultados obtidos na ZG3/SP3, e concretamente após análise criteriosa das deformações registadas, nomeadamente através da análise 3D dos deslocamentos registados nas marcas, motivaram a intervenção dos técnicos envolvidos, no sentido de definir o reforço do suporte instalado de forma objetiva.

Em alguns troços do túnel, inclusive na dependência da falha de Gaiva, observaram-se secções com velocidades elevadas de convergência dos hastesais (Figura 6). Uma vez detetada a situação, para uma melhor análise da sua evolução e extensão, reduziu-se o espaçamento entre secções de leitura, de 5 m para 2,5 m, aumentou-se a frequência de leitura para 4 a cada 24h, com a 1ª leitura no início de cada turno e a 2ª leitura a meio de cada turno, para assim permitir que em cada um dos turnos se avaliasse a evolução das convergências e se pudesse decidir as ações a implementar no turno seguinte.

Com o objetivo de parar a evolução desfavorável das convergências registada, e tendo em consideração a necessidade de conceber uma solução de implementação rápida e que atendes-se aos materiais e equipamentos disponíveis em obra, definiram-se as seguintes soluções:



NOTAS:

Última leitura em:	11/01/2016	C12+ -11,3 mm	C14+ -13,2 mm	Níveis de referência:	C12+ 10mm
		C13+ -38,6 mm	C15+ -43,5 mm		C13+ 10mm
		C23+ -50,7 mm	C45+ -74,7 mm		C23+ 11mm
					C14+ 10mm
					C15+ 10mm
					C45+ 11mm

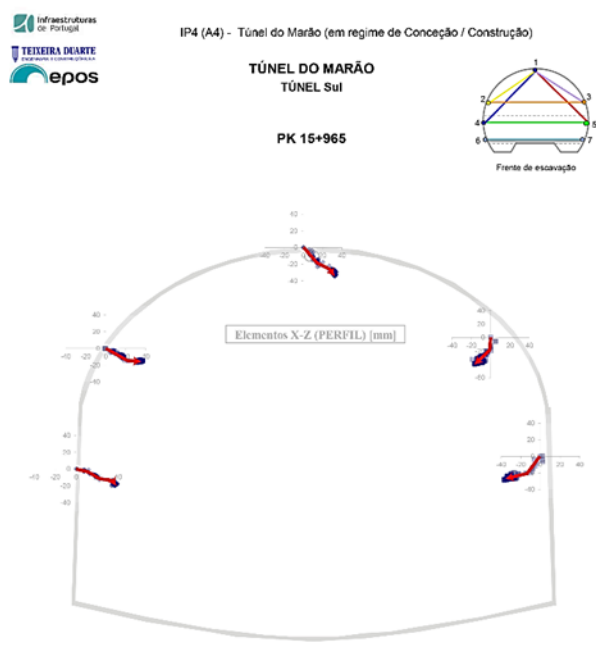


Figura 6— Dados da secção de medição de convergências localizada ao PK 15+965 nas proximidades da falha de Gaiva

- Travamento de convergências ao nível dos hasteais:
 - Instalação de pregagens passivas em varão com $l = 12\text{ m}$, $\varnothing 25\text{ mm}$ em aço A500NR, espaçadas de 1 m , introduzidas em furos com inclinação de 15° com a horizontal, cujas cabeças foram soldadas a um perfil metálico contínuo UPN 180, de modo a solidarizar todas as pregagens contíguas. A aplicação das pregagens prolongou-se 5 m , para ambos os lados, para além da primeira secção de leitura que não apresentasse convergências consideradas anormais.
- Travamento de convergências ao nível dos “ombros” da secção:
 - Instalação de pregagens passivas em varão com $l = 12\text{ m}$, $\varnothing 25\text{ mm}$ em aço A500NR, espaçadas de 1 m , introduzidas em furos realizados na perpendicular à face do suporte primário instalado, soldadas a 2 varões $\varnothing 32\text{ mm}$ em aço A500NR contínuos, unindo deste modo todas as pregagens contíguas. A aplicação das pregagens prolongou-se 5 m para ambos os lados, para além da primeira secção de leitura que não apresentasse convergências consideradas anormais.

Em virtude da ocorrência geológica-geotécnica excepcional, bem como da área de influência da falha, que motivaram os reforços acima justificados, os responsáveis em obra optaram pela adoção de medidas protetivas de aplicação do suporte, de forma a reduzir o risco e, assim, dar cumprimento ao prazo de obra estabelecido. A consequência direta desta filosofia de atuação foi a disparidade entre o zonamento efetuado em fase de obra e o suporte provisório efetivamente instalado, conforme se pode observar pela análise da Figura 7.

4 PRINCIPAIS INDICADORES

O túnel do Marão é, atualmente, a maior infraestrutura desta natureza na Península Ibérica, e para a sua conclusão foi necessário dedicar um significativo investimento em termos de recursos materiais e humanos.

Especialmente constrangidos por um plano de trabalhos muito exigente, foi necessário planejar as atividades de escavação, suporte, revestimento, drenagem e de instalação de equipamentos especiais de forma a ocorrerem num

período de tempo muito reduzido.

Os trabalhos de escavação e instalação do suporte provisório iniciaram-se em novembro de 2014 e terminaram 11 meses depois, perfazendo um total de cerca de 3 970 metros de túnel escavados (Figura 8 A). Por sua vez, o revestimento definitivo do túnel foi integralmente executado entre fevereiro de 2015 e dezembro de 2015, o que corresponde a cerca de 11 300 m de betonagem realizados (Figura 8 B).

No período de maior exigência, em virtude da multiplicidade de atividades a decorrer, chegaram a participar em obra 741 trabalhadores.

Para a execução da escavação e do suporte provisório, no que se refere a equipamento principal, foram utilizados 5 jumbos electro-hidráulicos de três braços de furação, 4 robots de projeção de betão, 20 dumpers, 6 scalers e 4 pás carregadoras. Na Figura 9 apresentam-se aspetos de algumas das atividades inseridas no processo construtivo do Túnel do Marão.

5 CONCLUSÕES

Uma obra subterrânea com as características da

presente, ou seja, com elevada extensão e cobertura, aliada a enorme complexidade geológica/estrutural, implica necessariamente a admissão em fase de projeto de pressupostos o mais rigorosos possível no que respeita ao estabelecimento do modelo geológico e geotécnico ocorrente, bem como à caracterização e parame-trização geotécnica. Obriga, ainda, a que no projeto sejam concebidas ferramentas que permitam em obra proceder de forma atempada ao ajuste das metodologias de construção previstas.

A presença diária de uma Assistência Técnica à Obra, dotada de elevada especialização e em constante articulação com os técnicos do construtor, sejam eles da produção, da equipa de geologia, da equipa de qualidade e segurança, entre outros, permitiu a verificação e adaptação das soluções de projeto às reais condições reconhecidas no contínuo desenrolar dos trabalhos de escavação. Desta forma, pode-se afirmar que a ATO contribuiu decisivamente para a ligação entre o projeto e a realidade, sem comprometer o prazo e a segurança do empreendimento, procedimento este que deverá ser sempre implementado em obras com forte pendor geotécnico.



Figura 7 - Percentagens de suporte provisório previstas em fase de obra em função do zonamento (A) e as realmente efetuadas (B)

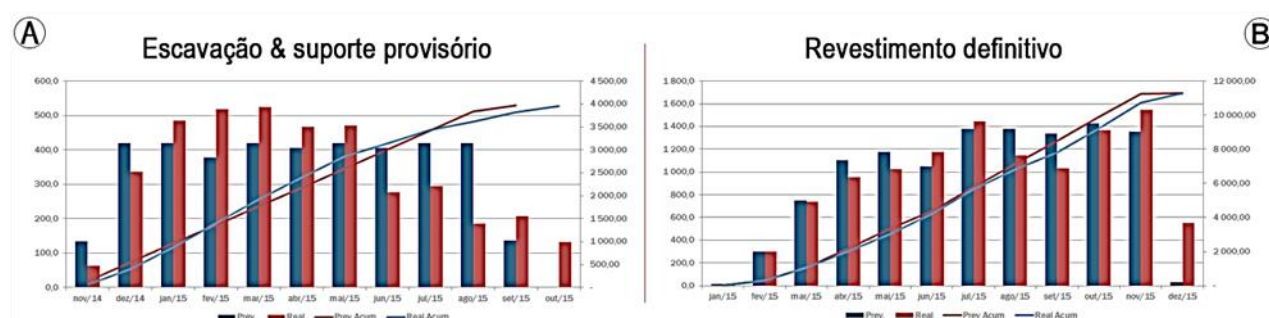


Figura 8 - Evolução da escavação (A) e da realização do revestimento definitivo (B) no período da obra



Figura 9 – Algumas das atividades inseridas no processo construtivo do Túnel do Marão: (A) Furação da frente de escavação; (B) Saneamento da frente de escavação; (C) Betonagem do revestimento definitivo; (D) Geomembrana de impermeabilização e troço já revestido

REFERÊNCIAS

- Barton N.R., Lien R, e Lunde J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley & Sons, New York.
- Coke, C., (2000). *Evolução geodinâmica do ramo sul da Serra do Marão um caso de deformação progressiva em orógenos transpressivos*. Tese de doutoramento, Univ. Trás-os-Montes e Alto Douro, 330 p.
- Coke, C., Dias, R., e Ribeiro, A., (1995). *Fracturação associada à vertente W da Serra do Marão entre o rio Marão e a ribeira de Póvoa*. Livro de resumos da 1ª Reunião Anual do GGET, Lisboa: FCUL.
- Coke, C. Pires, C. A. C., Sá, A. A. e Ribeiro, A. (2001). *O Vulcanismo na transição Câmbrico/Ordovícico da Zona Centro-Ibérica na região de Trás-os-Montes (NE Portugal) como elemento de referência estratigráfica*. Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña, Vol. 26, pp. 121-136. ISSN: 0213-4497.
- Conceição, Miguel F. Meneses; Aldeias, João B.; Barbosa, Paulo J. N. Ferreira; Baião, Carlos J. Oliveira; Luís, Rui Fernando; Santa, Cláudio M. Morgado; Russo, Carlos M. Charneca; Gonçalves, Luís P. C. Costa; Monteiro, Bernardo P. B.; Azevedo, João (2016). *IP4 (A4) - Túnel do Marão. Do estudo geológico e geotécnico à definição das soluções de projecto*. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.
- Hoek, E., Carranza-Torres, CT. e Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. Proceedings of the fifth north american rock mechanics symposium, Toronto, Canada, vol. 1, 2002. p. 267–73.
- Monteiro, Bernardo P. B. e Azevedo, João C. C. (2016). *IP4 (A4) - Túnel do Marão. Condicionantes geológicas e geotécnicas no lançamento do empreendimento em conceção construção*. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.