

# ESTUDOS DE EXECUÇÃO DE TÚNEIS FERROVIÁRIOS NA LINHA BOUGHZOUL-DJELFA, ARGÉLIA

## FINAL DESIGN STUDIES FOR THE EXECUTION OF RAILWAY TUNNELS IN THE BOUGHZOUL-DJELFA LINE, ALGERIA

Bento, Jorge; COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, [j.bento@cobagroup.com](mailto:j.bento@cobagroup.com)  
Pistone, Raúl; COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, [r.pistone@cobagroup.com](mailto:r.pistone@cobagroup.com)  
Ferreira, Sandra; COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, [s.ferreira@cobagroup.com](mailto:s.ferreira@cobagroup.com)  
Ribeiro, Joana; COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, [j.ribeiro@cobagroup.com](mailto:j.ribeiro@cobagroup.com)  
Cacilhas, Filipa; COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, [f.cacilhas@cobagroup.com](mailto:f.cacilhas@cobagroup.com)

### RESUMO

A expansão da rede ferroviária na Argélia, com a nova linha Boughzoul-Djelfa, na zona de transição dos Altos Planaltos para o Atlas Saariano inclui, perto da cidade de Djelfa, um conjunto de túneis ferroviários, dos quais, a COBA elaborou os Projectos de Execução dos designados túneis T1 e T2, com galerias únicas bidireccionais, albergando a plataforma ferroviária, com secção até 122 m<sup>2</sup> e 13,1 m de vão. O túnel T1, com 600 m de comprimento desenvolve-se no atravessamento de uma crista calco-arenítica cretácica, ligeiramente carsificada, no anticlinal de Djelfa, evitando a afectação, pelo traçado, de núcleo habitacional à superfície. O Túnel T2, com 800 m de desenvolvimento, em zona sem ocupação de superfície, atravessa séries sedimentares cretácicas silto-argilosas e calco-areníticas, interessando ainda uma unidade gipso-margosa triássica, associada a uma falha regional. São descritas as soluções de projecto adoptadas e as adaptações realizadas, resultantes da colaboração com o construtor durante a fase de desenvolvimento dos estudos.

### ABSTRACT

The expansion of the rail network in Algeria, with the new line Boughzoul-Djelfa, in the transition zone from the High Plateaus to the Saarian Atlas includes, near the city of Djelfa, several railway tunnels. COBA elaborated the Projects of Execution of the designated T1 and T2 tunnels, with single bidirectional galleries, housing the railway platform with section up to 122 m<sup>2</sup> and 13,1 m of span. The 600 m long T1 tunnel develops at the crossing of a Cretaceous crest, slightly karsified, on the Djelfa anticlinal, avoiding a residential area in the surface. The T2 tunnel, 800 m long, in an area with no surface occupation, crosses sedimentary Cretaceous silt-clayey and lime-arenitic sedimentary series, and a Triassic gypsum-marl unit, associated to a regional fault. The project solutions adopted and the adaptations carried out, resulting from the cooperation with the constructor during the development phase of the studies, are described.

## 1 - INTRODUÇÃO

Os estudos de execução das obras subterrâneas elaborados para a COSIDER Travaux Publics, (túneis T1 e T2) estiveram a cargo da COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, tendo sido desenvolvidos entre Julho de 2013 e Junho de 2015. O dono da infraestrutura é a ANESRIF – Autoridade Ferroviária Argelina. As principais características dos túneis resumem-se no quadro 1.

Quadro 1 - Características principais dos túneis

Túnel	Pk inicial	Pk final	Comprimento (m)	Recobrimento máximo (m)	Secção (m <sup>2</sup> )	Geologia
T1	227+185	227+785	600	77	122	Cn – Cretácico médio – Calcários e margas Tk – Triássico superior -Facies Keuper Ci – Cretácico inferior – Grés e argilas com passagens carbonatadas
T2	232+592	233+385	793	42	122	Cn – Cretácico médio – Calcários e margas Ct – Cretácico médio - Grés

O desenvolvimento dos estudos implicou uma adaptação do projecto às práticas e possibilidades locais, nomeadamente no que respeita ao suporte primário e metodologia de escavação, (por exemplo a não utilização de fibras metálicas no reforço do betão projectado, entre outras).

## 2 - GEOLOGIA E GEOTECNIA DOS ATRAVESSAMENTOS

### 2.1 - Enquadramento geral

O troço onde se incluem os túneis, ver figura 1, interessa sobretudo unidades sedimentares cretácicas, ocorrentes no anticlinal de Djelfa, estando o túnel 1 localizado no seu flanco Norte e o túnel 2 no flanco Sul.

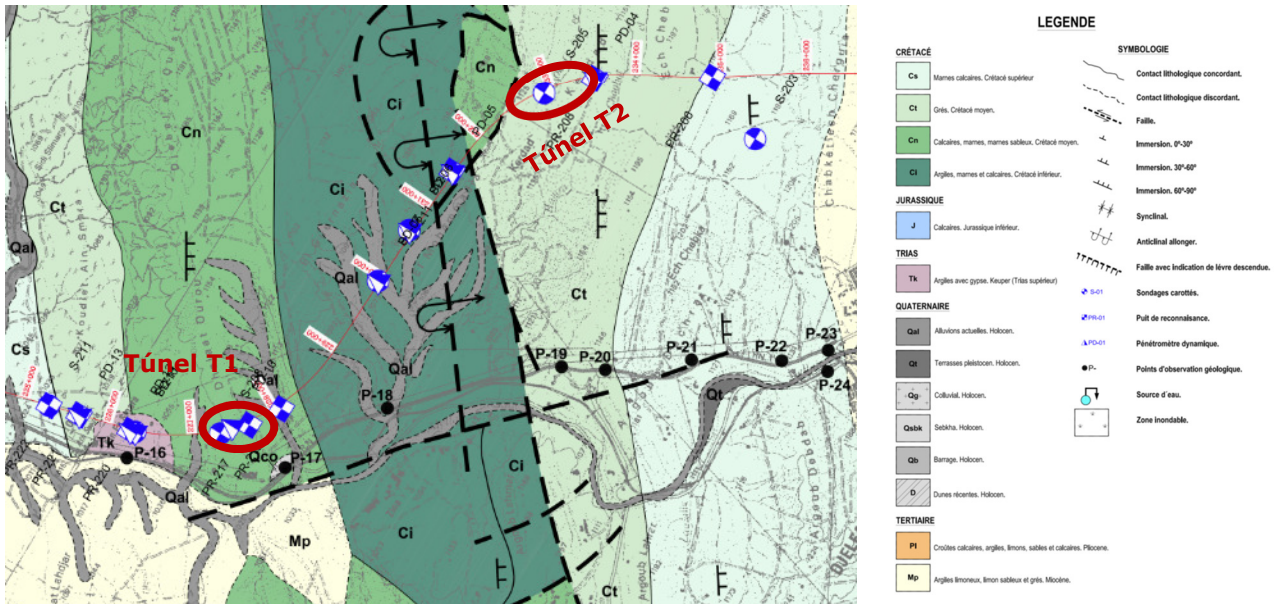


Figura 1 – Traçado da via férrea e geologia na envolvente dos túneis Túnel T1 do pk 227+200 ao pk227+800 e túnel T2 do pk 232+600 ao pk 233+400, adaptado de APS-Avant Projet Sommaire, Systra, Getinsa, Setirail (2011)

No túnel T1 que atravessa uma crista saliente, ocorre exclusivamente a unidade Cretácico Médio (Cn) - Margas e calcários. Esta unidade consiste numa alternância irregular de margas dolomíticas, um pouco arenosas e argilas com cimento carbonatado, castanho claro e às vezes esbranquiçado. As rochas calcárias são pouco dolomíticas, microcristalinas e meso-cristalinas.

A sua estrutura estratificada, visível na figura 2, caracteriza-se por camadas de espessuras centimétricas a decimétricas. A unidade encontra-se dobrada e deformada pela orogenia alpina que afecta o Atlas Sahariano. Essa estrutura apresenta uma inclinação para a estratificação  $S_0$  de  $85^\circ$  para Sudeste, no topo da crista que atravessa.



Figura 2 – Aspectos gerais da estratificação de intercalações margo-calcárias da unidade Cn-Cretácico médio no túnel T1. Na entrada (em vista para Nascente) e na crista (em vista para Poente)

Os relevos apresentados são caracterizados por grandes declives e áreas irregulares devido à erodibilidade dos materiais desta unidade. Devido ao sistema de fracturação particular desta formação, podem ocorrer quedas e deslizamentos de blocos.

Dada a identificação de fenómenos de carsificação na envolvente, no âmbito da campanha de prospecção implementada foram realizados ensaios de permeabilidade do tipo Lugeon e do tipo Lefranc, tendo sido obtidos resultados elevados, 4 a 19 U.L. em regime de dilatação para os ensaios tipo Lugeon e  $5,82 \times 10^{-4}$  m/s no ensaio Lefranc realizado, confirmando a elevada permeabilidade secundária do maciço.

No túnel T2, além da unidade (Cn) -Cretácico médio descrita para o túnel T1, ocorrem as unidades (Ct) - Cretácico médio (arenito e argilas com episódios carbonatados) e (Ci) -Cretácico inferior (grés argiloso, margas e calcários). Em profundidade, ocorrem ainda materiais do Triássico (Tk) com forte componente gipsífera. A distribuição destas unidades apresenta-se no modelo geológico da figura 3.

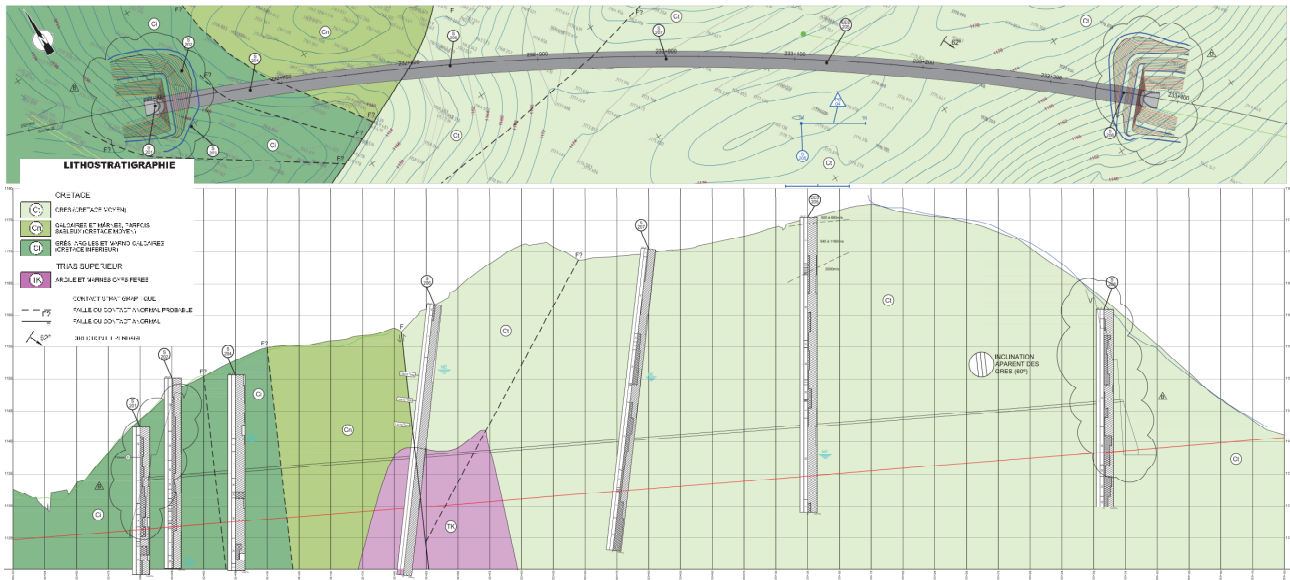


Figura 3 – Extrato do desenho planta-perfil geológico-geotécnico do projecto, com o modelo geológico do túnel T2. Sobrelevação: 5x

A unidade do Cretácico Médio (Ct) - Arenito e argilas com episódios carbonatados é formada por uma série mais ou menos rítmica, em fácies *flysch*, com arenito e argila. Os arenitos são ocres, castanhos, rosados e esbranquiçados, podendo parecer friáveis ou cimentados pelo carbonato, como visível na figura 4.

Esta unidade é caracterizada pela presença de falhas e deformações frequentes dos materiais, sendo afectada pela orogenia alpina.



Figura 4 - Aspectos da unidade gresosa Ct – Cretácico médio. Em poço aberto sobre a zona central do túnel e à direita aspecto microbandado de arenito de grão fino em amostra de mão

A unidade do Cretácico inferior (Ci) - Grés e argilas com episódios carbonatados, que consiste numa alternância irregular de grés carbonatados e calcários arenosos, de espessura centimétrica a decimétrica, areias arcólicas, conglomerados quartzíticos com matriz arcóscica, silto-argilosa ou argilitos com areia dispersa e tons acastanhados e avermelhados. Na base da série, podem aparecer níveis de granulometria grosseira (conglomerados). As areias apresentam granulometria média a grosseira a muito grosseira, com elementos angulosos e com uma matriz silto-argilosa, parcialmente carbonatada.

O Triássico Superior - Facies Keuper (Tk) é caracterizado por argilas, margas gipsíferas, gesso com algumas intercalações de arenito e dolomito. Consiste assim num conjunto de argilas e margas variegados. Na parte mais baixa da série, aparecem cores acinzentadas, enquanto nas partes mais altas existem tons purpúricos característicos, com listras brancas e avermelhadas. As intercalações de gesso, branco e preto, de argilitos vermelhos e cristais gipsíferos são abundantes. Esta formação constitui relevos isolados entre materiais de diferentes idades. As inclinações são variáveis e a presença de barrancos e superfícies irregulares devido à erodibilidade e solubilidade dos materiais é visível na figura 5.

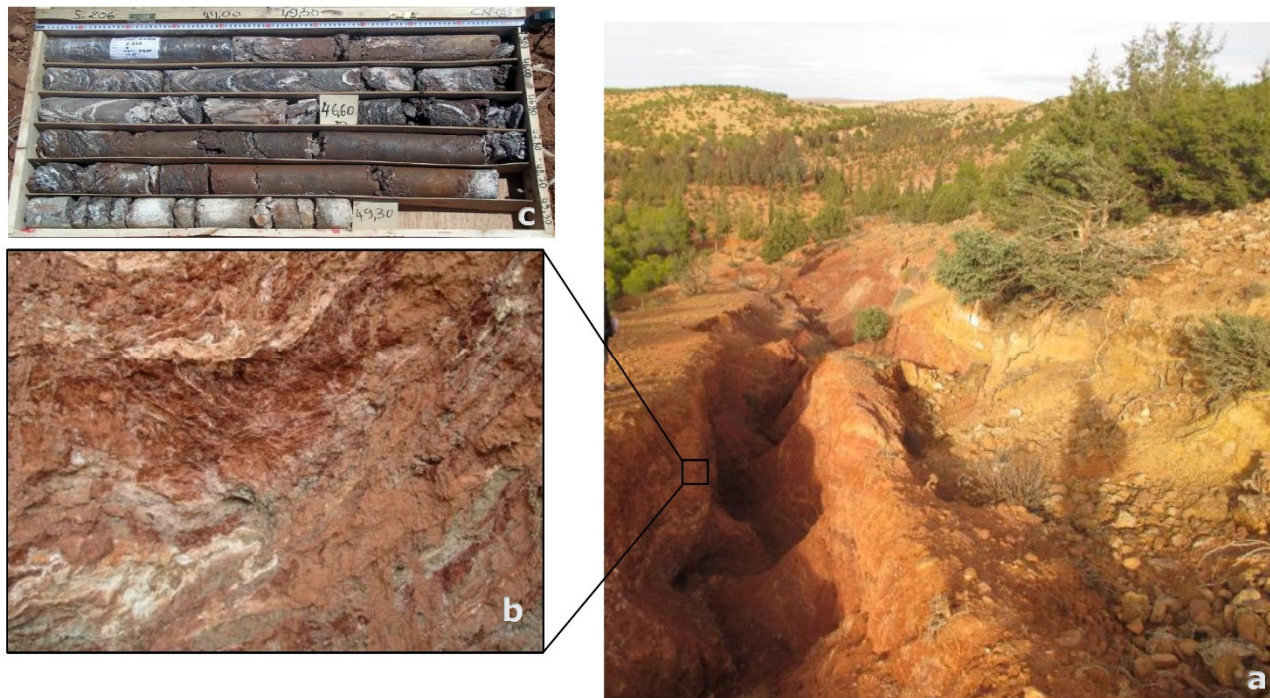


Figura 5 - Aspectos da unidade triássica Tk, em ocorrência associada a falha à superfície (imagens a e b), lateralmente à zona central do túnel T2 e em profundidade (imagem c) na sondagem S206 (margas com intrusões gipsíferas)

As unidades cretácicas identificadas possuem relevos com inclinação média a alta. A formação de cumes, destacados da envolvente geral de materiais modernos, dependerá do grau de cimentação. Devido ao diferente grau de cimentação e/ou meteorização, podem ocorrer quedas de blocos e/ou deslizamentos. Apresentam uma estrutura estratificada em camadas, com espessuras em geral entre centímetros e decímetros. Encontram-se dobradas e deformadas devido ao episódio orogénico mencionado.

Relativamente ao modelo geológico do túnel T2, interpretou-se com base nos levantamentos de campo e imagens de satélite que o contacto entre os arenitos da unidade Ct e a unidade Cn margo-calcária se faria por intermédio de falha, sendo que os materiais triássicos, de maior plasticidade e identificados na sondagem S206, teriam ascendido através desta.

Sempre que os níveis de água registados se apresentam elevados, a medição foi realizada imediatamente após a furação. Nos restantes casos, os furos de sondagem apresentam-se secos ou com níveis de água baixos.

## 2.2 - Trabalhos de prospecção e ensaios realizados

No conjunto dos dois túneis foram realizadas, na fase de projecto de execução, dezassete sondagens com um total de 607 m de perfuração. Das sondagens realizadas três delas foram executadas inclinadas com um ângulo de 60° com a horizontal. Esta abordagem veio a revelar-se adequada, pelo facto de terem sido intersectados materiais em falha que, por sua vez, veio a ser atravessada no contacto das unidades Ct e Cn.

Relativamente aos ensaios *in-situ*, foram realizados ensaios de permeabilidade (tipo Lugeon e tipo Lefranc) que em geral revelaram valores de permeabilidade muito elevados, variando de 7 a 35 U.L. no túnel T2 e entre 4 e 9 U.L. no túnel T1. Embora previstos nos emboquilhamentos, praticamente não se realizaram ensaios SPT, devido à natureza dos materiais interessados.

Em laboratório foram realizados ensaios conducentes à caracterização dos materiais reconhecidos, tendo sido levados a cabo ensaios de identificação. Foram ainda realizadas caracterizações do ponto de vista químico à presença de carbonatos, sulfatos, cloretos e medição de ph em amostras argilosas

No que respeita à caracterização da resistência foram realizados trinta e três ensaios de compressão simples, com medição de módulo de deformabilidade em alguns dos provetes ensaiados. Os máximos valores de rotura observados foram de 52,2 MPa em calcário da unidade Cn no túnel T1 e de 101,0 MPa em grés da unidade Ct, no túnel T2. Na unidade Tk obtiveram-se resistências à compressão de 0,9 e 2,0 MPa com módulos de deformabilidade de 65 e 217 MPa respectivamente. Foram também realizados ensaios brasileiros de compressão diametral.

### 2.3 - Zonamento e parâmetros adoptados

Com base na informação geológico geotécnica recolhida foi efectuado o zonamento dos maciços atravessados e realizada a classificação geomecânica das zonas geotécnicas atravessadas pelos túneis, (quadro 2).

Quadro 2 - Zonamento geotécnico de projecto estimado para o maciço de escavação dos túneis

Zona geotécnica	Formação	Fracturação (SIMR)	REC- Percentagem de recuperação (%)	RQD - "Rock Quality Designation" (%)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	RMR - "Rock Mass Rating"
ZG1	Ci, Cn, Ct	F <sub>3</sub> à F <sub>4-5</sub>	100	> 30*	> 25	> 45
ZG2	Ci, Cn, Ct	F <sub>4-5</sub>	100	> 10	> 2	35 - 45
ZG3	Tk, Ci, Cn, Ct	F <sub>4-5</sub>	80-100	0 - 50	< 3	< 35

\*Excepcionalmente >30

Com base neste zonamento foram estimadas, no túnel T1, extensões de ocorrência de 30, 45 e 25% de ZG1, ZG2 e ZG3, respectivamente e no túnel T2 de 28, 35 e 37% de ZG1, ZG2 e ZG3.

Tendo por base os resultados obtidos, devidamente enquadrados por obras já executadas em maciços similares, foram estimados os parâmetros adoptados na modelação das obras a construir, que por sua vez se apresentam no quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros geomecânicos adoptados no projecto dos túneis

Zona geotécnica	Mohr Coulomb		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$
	c (kPa)	$\phi$ (°)			
ZG1	450	45	23	10	0,22
ZG2	150	40	22	1	0,24
ZG3 (geral)	100	30	21	0,15-0,50	0,28
ZG3 (Tk)	40 - 60	25	19	0,15	

Para os emboquilhamentos, considerando as condições particulares de cada um dos locais foram adoptados os parâmetros, constantes do quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros adoptados nos emboquilhamentos do túnel T2

Localização	Litologia	Mohr Coulomb		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
		c (kPa)	$\phi$ (°)	
Entrada	Conglomerados poligénicos e grés	90	35	23
	Conglomerados poligénicos alterados e areias grésificadas	40	35	22
Saída	Grés fracturados	200	45	23
	Grés alterados e fracturados	120	40	22

## 3 - SOLUÇÕES ADOPTADAS

### 3.1 - Emboquilhamentos

Os prolongamentos a céu aberto da estrutura definitiva dos túneis, permitiram encarar a parte inferior do tratamento dos taludes dos emboquilhamentos frontais, como taludes provisórios a aterrar posteriormente. Nesse sentido, por se tratarem de soluções provisórias, foi possível aligeirar as soluções de suporte da escavação, por sua vez realizadas à custa de betão projectado e pregagens.

A solução geral, como se mostra na figura 6 para a saída do túnel 1, consistiu na execução de betão projectado numa espessura de 0,10 m, reforçado com malha electro-soldada AQ50 e pregagens de varão de aço  $\phi$  25 mm, seladas com calda de cimento, com comprimentos variáveis de 4,0 a 8,0 m. A geometria da escavação adoptada foi em geral de 1v:1h, sendo que nos taludes frontais foi adoptada uma inclinação de 2v:1h no pano inferior e de 1v:1,5h no pano superior devido à presença de materiais de natureza terrosa. No emboquilhamento de saída do túnel T2, foram consideradas inclinações de 3v:1h no pano

inferior e de 1v:1h nos panos superiores. A altura máxima de escavação foi de 36 m na saída do túnel T2, visível na fotografia apresentada na figura 10.

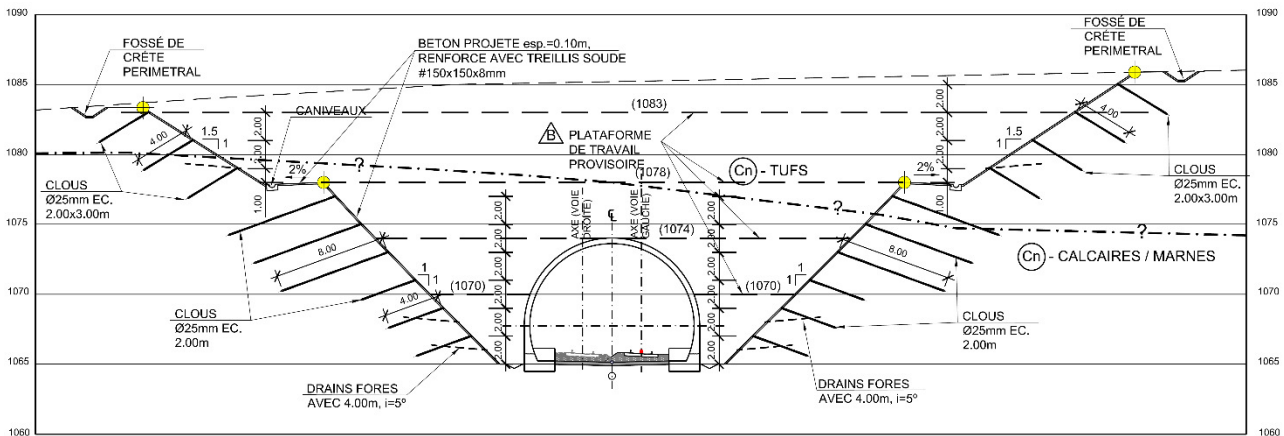


Figura 6 – Corte transversal do emboquilhamento de saída do túnel T1, ao pk 227+775. Em baixo, aspectos da execução do mesmo

A verificação de segurança dos suportes foi efectuada, função do tipo de maciço, recorrendo a cálculos de estabilidade global e ainda a verificações de segurança com elementos discretos, no caso de deslizamento de possíveis cunhas.

### 3.2 - Obras subterrâneas

#### 3.2.1 - Secção transversal

A secção de escavação foi definida tendo em conta as necessidades do *gabarit* ferroviário, em especial os aspectos aerodinâmicos, necessários à segurança e conforto dos utentes, para uma velocidade do comboio de 160 km/h. A definição teve também em conta as espessuras necessárias à colocação dos suportes primários e do revestimento definitivo. Resultou assim necessário considerar uma secção de raio único interior,  $r = 5,88$  m, que se prolonga interiormente em  $25^\circ$  abaixo da calote superior, enquanto que no seu lado exterior, a parte terminal dos hasteais apresenta desenvolvimento recto.

Procurou-se ainda garantir a modularidade da geometria, ao nível dos suportes primários e do revestimento definitivo na interface entre diferentes zonas geotécnicas, mantendo-se pontos em comum, por exemplo, ao nível das uniões das cambotas, ao nível do suporte primário, ou na base dos hasteais, nas transições entre trechos com soleira-curva e sapata, com vantagem para a execução do revestimento definitivo e ainda na instalação dos sistemas de impermeabilização e drenagem.

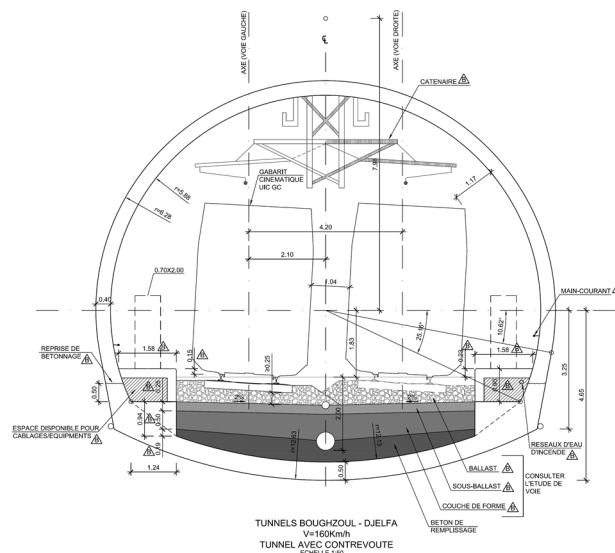


Figura 7 - Secção tipo com inserção do *gabarit* ferroviário e elementos de segurança ferroviária

### 3.2.2 - Escavação e suporte primário

Numa primeira aproximação aos suportes primários a considerar, foram inicialmente utilizados métodos empíricos como as classificações e/ou recomendações de suporte propostas por Bieniawski, (1989), Grimstad e Barton, (1993) e Romana, (2000). Posteriormente, na verificação da segurança recorreu-se a métodos numéricos de tensão-deformação, utilizando o programa de cálculo Phases<sup>2</sup> V8.0 da Rocscience. Os resultados foram também enquadrados por experiências recolhidas em obras já executadas, em maciços similares.

Os cálculos realizados em 2D permitiram estimar valores, em regime de deformação plana, cuja ordem de grandeza ronda os 3 cm, em média (figura 8). A fim de reproduzir do modo o mais realista possível o faseamento construtivo associado a cada zona geotécnica, foi considerado o faseamento da escavação bem como a aplicação de suporte correspondente a cada fase.

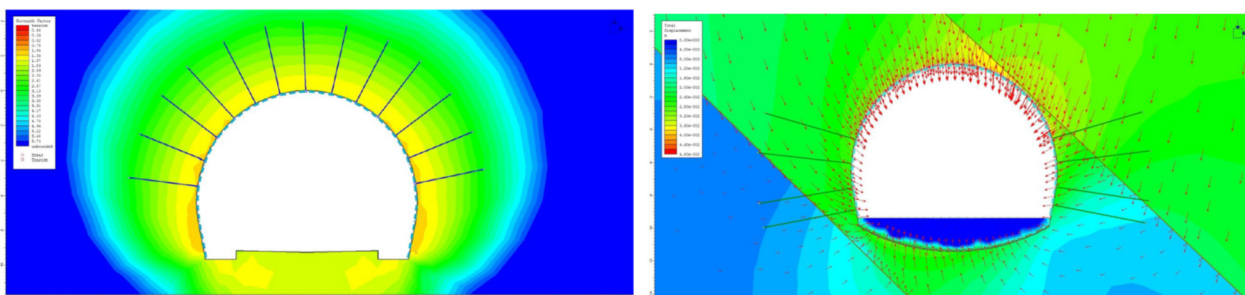


Figura 8 – Análise tensão-deformação (Phases<sup>2</sup> V8.0), no túnel 2. À esquerda *Strength Factor* na zona geotécnica ZG1 (*Strength Factor* de 1,0 representado a laranja, sendo, quando da ordem de 2,0 a 3,5, representado a verde). À direita, deslocamentos totais na secção em ZG3 (a amarelo deslocamentos totais da ordem dos 35 mm e a verde da ordem dos 25 mm). Ambos os casos utilizando um coeficiente  $k=1$  ( $\sigma_h/\sigma_v$ )

Foi ainda analisada a possibilidade de formação e queda de cunhas no interior da secção no atravessamento dos trechos rochosos, com recurso ao programa Unwedge 3.0 da Rocscience.

Após a verificação da segurança, especificaram-se os suportes primários que constam do quadro 5, sendo a metodologia de escavação e suporte indicada na figura 9, para as zonas ZG1, ZG2 e ZG3.

Com base nas deformações estimadas, cujo valor máximo vertical foi de 33 mm, no eixo da abóbada em ZG3, foi definida a tolerância construtiva de 3 cm a introduzir no raio de escavação. Foram ainda definidos valores ao nível dos critérios de alerta e de alarme, que serviram como referência durante a escavação das deformações registadas pelo sistema de auscultação previsto, constituído por convergências, marcas de nivelção precisa e extensómetros. A título de exemplo, refira-se que o limite de alerta para fase de escavação da calote superior variou entre 0,6 e 25 mm, respectivamente em ZG1 e em ZG3, sendo os correspondentes valores de deslocamento para o limite de alarme de 0,8 e 30 mm.

Quadro 5 - Suportes primários adoptados no túnel T2

Zona geotécnica	Avanço calote (m)	Betão projectado esp. (m)	Soleira curva	Pregagens L (m) A <sub>inf</sub> (m <sup>2</sup> )	Cambotas Af.(m)	Enfilagens L (m) Af.(m) Sobreposição (m)
Entrada	1,00	0,25	Sim	φ25 mm L = 4 A <sub>inf</sub> .=1,50 (hasteais)	HEB140 Af=0,75 a 1,00	Duplo chapéu φ32 mm L=12 Af.=0,5 S=3
ZG3	0,75 a 1,00	0,25	Sim	φ32 mm L = 6 A <sub>inf</sub> .=1,50 (hasteais)	HEB140 Af=0,75 a 1,00	φ32 mm L=12 Af.=0,3 S=3
ZG2	1,50	0,20	-	φ25 mm L = 4 A <sub>inf</sub> .=1,50 (hasteais)	HEB140 Af=1,50	Forepoling a 45°. φ25 mm L=8 Af.=1,5
ZG1	3,00	0,10 a 0,15	-	Tipo swellex (100 kN) L = 4 A <sub>inf</sub> .=2,25	-	-
Saída	1,00	0,20	-	-	HEB140 Af= 1,00	φ32 mm L=12 Af.=0,4 S=3

Além do-indicado no quadro 5, na frente da escavação foram ainda consideradas pregagens de fibra de vidro, do tipo Y35, nos emboquilhamentos de entrada e também em ambos os túneis na presença da zona geotécnica ZG3.

### 3.2.3 - Revestimento definitivo

Para o revestimento definitivo foram definidas quatro secções tipo principais, tendo sido para cada uma, caracterizados os diferentes tipos de armaduras, consoante a zona geotécnica atravessada (quadro 3). Para as secções sem soleira curva, considerou-se fundação directa através de sapatas e estrutura do revestimento com espessura de 0,30 m em ZG1, e 0,40 m para ZG2 e nos emboquilhamentos. A partir desta última foi desenhada a secção do falso túnel (prolongamento da estrutura interior) na qual se considerou um hasteal recto vertical abaixo do eixo horizontal. Por último, foi considerada uma secção com 0,40 m de espessura e soleira curva com espessura de 0,50 m em ZG3 (figura 7).

O cálculo dos esforços a considerar na verificação da segurança do revestimento definitivo foi realizado com recurso a métodos de elementos finitos, também utilizados para verificar os suportes primários, considerando assim a interacção solo-estrutura com interfaces adequadas (num cenário de longo prazo, conservador, onde o reequilíbrio das tensões já ocorreu na íntegra). Foram feitas análises de sensibilidade para as diversas zonas geotécnicas, tendo sido retida e considerada como representativa deste caso o modelo desenvolvido considerando um coeficiente  $k = 1 (\sigma_h/\sigma_v)$ .

Em paralelo, para as zonas de maciço rochoso (em ZG1 e em ZG2 e no emboquilhamento de saída do túnel T2), foram verificadas recorrendo a modelos de elementos lineares elasticamente apoiados, duas situações de carga correspondentes uma ao destacamento de um bloco em posição excêntrica (também utilizado no dimensionamento do suporte primário) e uma segunda considerando o volume de maciço destacável resultante da metodologia empírica de Rocha, (1976). O estudo das diferentes secções seguiu o método das reacções hiperestáticas, recorrendo ao programa de cálculo automático SAP 2000.

Na verificação da segurança os esforços adoptados foram os mais condicionantes dos vários cenários analisados.

### 3.2.4 - Drenagem e impermeabilização

A estrutura do túnel foi considerada drenada, tendo para tal sido previsto um sistema de impermeabilização e drenagem. O sistema de drenagem é constituído por um conjunto de drenos colectores DN 150 mm em PVC na base dos hasteais, com ligações transversais ao colector central em betão DN 500 mm, a cada 20 m, criando assim uma segurança adicional do sistema, uma vez que os drenos longitudinais não seriam visitáveis. Onde necessário, a definir durante a fase de obra, previu-se o reforço da drenagem do contorno de escavação com recurso a drenos planos.

O sistema de impermeabilização previsto é constituído por uma tela em PVC de 2 mm, protegida por um geotêxtil de características adequadas, com 500 g/m<sup>2</sup> de gramagem, colocado no intradorso do suporte primário. Nas juntas de betonagem foram considerados elementos hidro-expansivos.



### 3.2.5 - Aspectos construtivos

A zona central do túnel T2, onde foi prevista a presença de materiais triássicos (margas com gesso) que à partida se afigurava como o trecho de maior dificuldade, ao apresentar-se totalmente seca e sem fenómenos evolutivos significativos a registar após contacto com o ar e principalmente com a água utilizada nas furações, acabou por ser atravessada com o suporte correspondente a ZG3 (Quadro 5), sem qualquer tipo de dificuldade a assinalar. Pelo motivo anterior, o faseamento da escavação acabou por ser simplificado (figura 9), tendo-se recorrido a apenas duas fases horizontais, ao contrário das três inicialmente previstas na versão inicial dos estudos de projecto.

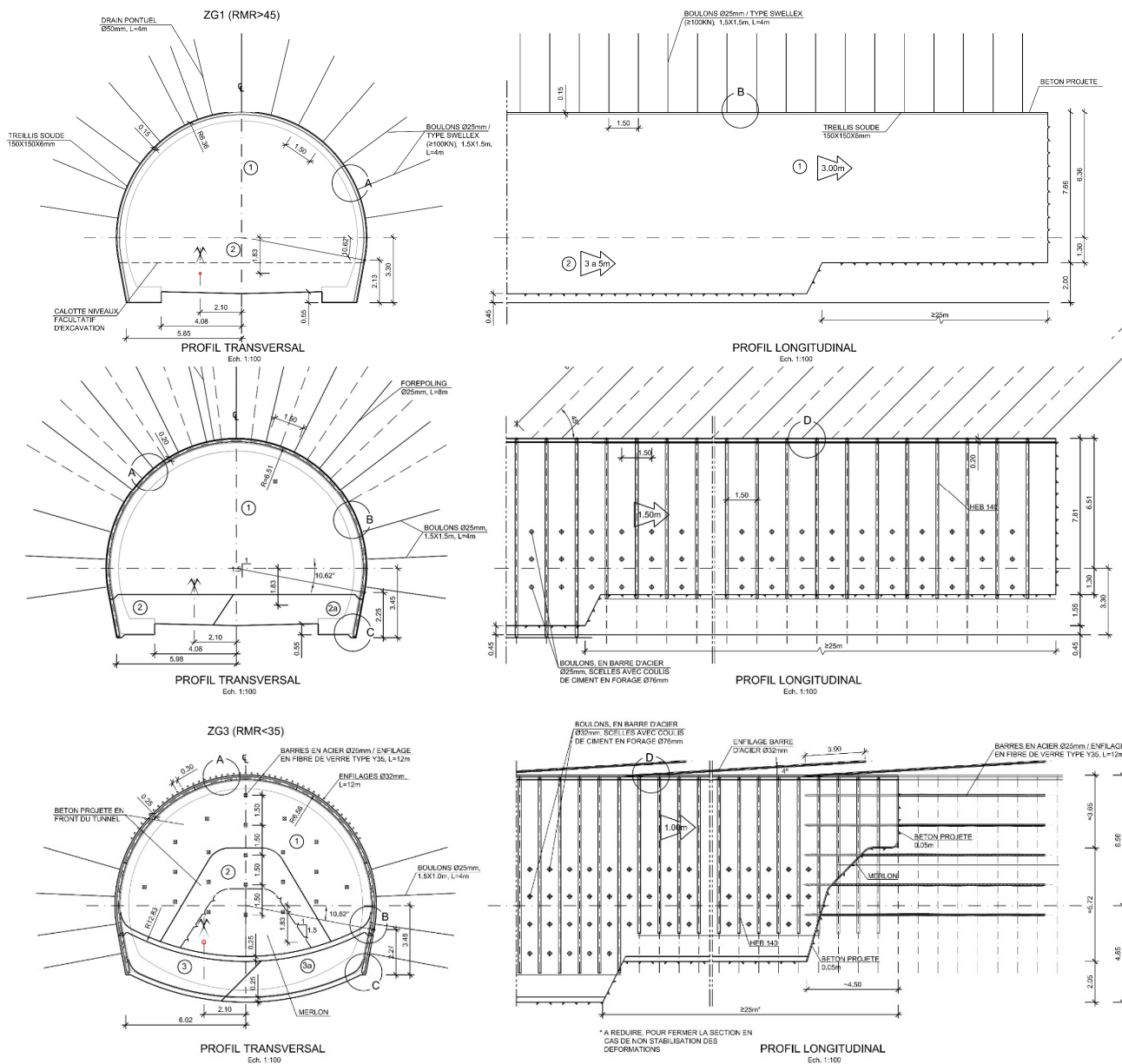


Figura 9 - Metodologia de escavação e suporte primário previstas para as zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG3 dos túneis, em *Études d'exécution*, COBA (2015)

Em termos executivos importa referir que, ao contrário do que é habitual neste tipo de obras, o reforço do betão projectado aplicado no revestimento primário, foi conseguido à custa da incorporação de malha electro-soldada #150 x 150 x 6mm, com toda a problemática associada ao tempo de aplicação e possibilidade de criação de zonas de sombra com menor contacto maciço-suporte (não foi possível utilizar fibras metálicas). Note-se que tecnologias consideradas ao dia de hoje como correntes são ainda de difícil aplicação noutras geografias, em particular quando afastadas dos grandes centros urbanos como é o presente caso, obrigando a adaptar as soluções aos materiais disponíveis na zona. Ainda no que respeita a este tipo de vicissitudes executivas, refira-se também, por exemplo, a impossibilidade de incorporação em obra dos extensómetros previstos em projecto.



Figura 10 - Aspectos diversos da fase construtiva. Em cima à esquerda, escavação em ZG3 em areias da unidade Cn-Cretácico médio no túnel T2, com faseamento simplificado em duas fases horizontais. À direita furação para avanço da frente na unidade Ct- Cretácico superior no túnel T2. Em baixo posicionamento da cofragem junto à saída do túnel T2 e aspecto do túnel T2, com a contrabóbada e armaduras da base dos passeios/caleira de equipamentos e de arranque da abóbada instaladas. Imagens cedidas pela COSIDER-TP

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os que tornaram possível a concretização desta obra, em particular ao pessoal presente no estaleiro M-26 da COSIDER-TP.

## REFERÊNCIAS

- Bieniawski, Z.T. (1989) – Engineering Rock Mass Classification. John Wiley & Sons, New York.
- COBA (2015) - Réalisation des Tunnels de la nouvelle Ligne Electrifie Khemis-Djelfa. Tronçon 2 Boughezoul – Djelfa. Études d'exécution : Série 200 – Hypothèses géotechniques ; Série 300 – Tunnel en mine et Portails ; Série 400 – Faux Tunnel et Tranchée, Tunnel 1 et Tunnel 2. (não publicado).
- Grimstad, E. e Barton, N. (1993) - *in* Practical Rock Engineering de Evert Hoek, disponível em <https://www.roscience.com/documents/hoek/corner/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>, acedido em 01 de Março 2018.
- Rocha, M. (1976) – Estruturas Subterrâneas. Reedição LNEC de 2013, Lisboa.
- Romana, M. (2003) - Nuevas Recomendaciones de Excavación y Sostenimiento para Túneles y Boquillas. Jornadas Hispano-Lusas sobre Obras Subterrâneas. Madrid, 15-16 septiembre 2003, disponível em <http://www.stmr.es/recursos/articulos/21>, acedido em 01 de Março 2018.
- SYSTRA, GETINSA, SETIRAIL (2011) - Étude APD et DCE de la ligne nouvelle électrifie Boumedfaa – Djelfa (266 km). (não publicado).