

**PROBLEMAS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DO
SUB-LANÇO TORRES NOVAS - FÁTIMA DA AUTO-ESTRADA A1**

**GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL PROBLEMS OF
TORRES NOVAS - FÁTIMA SECTION OF MOTORWAY A1**

Ricardo Oliveira*
Sérgio Rodrigues**
Cristina Gomes***

RESUMO: Faz-se uma descrição dos estudos geológico-geotécnicos desenvolvidos para o sub-lanço de auto-estrada Torres-Novas - Fátima (A1), assim como uma referência aos aspectos mais significativos que resultaram da fase de acompanhamento da obra, salientando a importância das actividades de assistência técnica pelo Projectista.

São focadas em particular as características das formações calcárias que interessam grande parte do traçado e que levantaram problemas específicos à realização da obra, nomeadamente ao nível das escavações do maciço, da existência de cavidades cársticas próximas da via, da construção de aterros de enrocamento de grande altura e das fundações das obras de arte.

SUMMARY: A brief description of the geological and geotechnical studies carried out during the design stages of the Torres Novas - Fátima section of Motorway A1 is presented in the paper, as well as references to the most relevant engineering geological features which were studied during construction stage, as a result of the technical assistance supplied by the Consultant Engineering firm.

Most of this section of the motorway has been designed through an important limestone complex showing specific characteristics which raised some problems for the construction of the works. These were mainly related to the large excavations which had to be performed, to the high rock fill embankments, to the karstic character of the limestones in the vicinity of large caverns with speleological value and to the foundation conditions of the bridges.

* Geólogo de Engenharia. Investigador Coordenador do LNEC.
Professor da UNL. Consultor da COBA.

** Engenheiro Civil da COBA.

*** Engenheira Geóloga. Bolseira da JNICT.

1 - INTRODUÇÃO

É objectivo desta comunicação referir os problemas geológicos e geotécnicos mais relevantes identificados durante as fases de projecto-base (1981)[1], de projecto de execução (1988)[2] e de assistência técnica à construção (1989-91) do sub-lanço de auto-estrada Torres Novas-Fátima, actualmente em conclusão.

A obra, compreendida entre os km 90+400 e 110+750 da auto-estrada do Norte (A1), com uma extensão de cerca de 20 km, envolveu a realização de aproximadamente 2.4×10^6 m³ de escavações e 2.3×10^6 m³ de aterros. A maior parte destes volumes interessaram materiais rochosos calcários, sendo necessários 2.1×10^6 m³ de escavação em rocha e 2.0×10^6 m³ de aterros de enrocamento. Houve particular cuidado na optimização do perfil longitudinal do traçado no sentido de se minimizar o custo das terraplenagens e de se utilizar os materiais resultantes das escavações na linha, sem ter de recorrer a zonas de empréstimo exteriores à obra. As escavações no maciço rochoso atingiram nalguns casos 30 m de altura, tendo os aterros de enrocamento mais altos atingido 23 m.

A obra envolveu igualmente a execução de 12 passagens inferiores, 7 passagens superiores e 3 viadutos.

As formações rochosas que ocorrem em grande parte do traçado são constituídas por calcários compactos que se apresentam com diferentes estados de fracturação e de alteração e com grau de carsificação variável, chegando por vezes a ser muito acentuado em zonas superficiais ou localizadas, o que levantou problemas específicos de âmbito geotécnico ao nível dos estudos e da realização da obra, nomeadamente no que respeita aos taludes de escavação, à existência de cavidades cársticas de dimensões assinaláveis próximas da plataforma da auto-estrada, às características dos materiais de escavação e sua utilização nos aterros de enrocamento e às fundações das obras de arte.

Para além destes problemas geotécnicos resultantes da natureza das formações geológicas atravessadas, são igualmente de referir as adaptações que foram introduzidas no projecto de molde a minimizar os impactes ambientais da obra. Após a conclusão do projecto de execução foram realizados diversos estudos de impacte ambiental reflectindo as orientações da legislação entretanto aprovada nesse âmbito. Daí resultaram, já no decurso das obras, algumas alterações ao projecto, com o desenvolvimento de novas soluções para implementação das medidas preconizadas por esses estudos e/ou das recomendações da Comissão de Acompanhamento da obra, das quais se destacam as seguintes:

- alterações na drenagem da plataforma, tendo em vista um melhor controlo e eventual tratamento anti-poluente das águas escorridas no pavimento, para protecção dos aquíferos na região, incluindo-se a construção de uma bacia de decantação experimental (km 98+500);
- execução de 3 viadutos, com extensões de 78, 78 e 28 m respectivamente, em locais onde estavam previstos aterros, para passagem de fauna e outros fins ambientais;
- adaptação de algumas passagens hidráulicas para passagens de fauna;
- preservação e criação de acesso a cavidades cársticas na zona do sub-lanço, consideradas de interesse espeleológico, estando estas medidas associadas à protecção do património natural do subsolo da Serra de Aire e do planalto de Fátima.

2 - CARACTERÍSTICAS DAS FORMAÇÕES E DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.1 - Características Geológicas

A área interessada pelo traçado da auto-estrada apresenta, do ponto de vista geomorfológico, três unidades distintas:

- as formações marginais da Bacia Terciária do Tejo, caracterizadas por uma acentuada regularidade topográfica de relevos suaves, que se desenvolvem desde o início do sub-lanço (km 90+400) até ao sopé da Serra de Aire (km 91+550);

- a vertente Sul e Sudoeste da Serra de Aire, que se desenvolve desde o bordo meridional do maciço calcário estremenho e se prolonga até à grande depressão do Covão do Coelho (km 98+000). Apresenta relevo bastante mais acidentado que a unidade anterior, com a qual contacta por cavalgamento, na zona do "Arrife", provocando um desnível abrupto entre estas 2 unidades. A zona do traçado que interessa o resto desta unidade (para NW do Arrife) desenvolve-se numa sucessão de anticlinais e sinclinais de suave pendor que partem do grande anticlinal que forma o núcleo da Serra de Aire;
- o planalto de Fátima que se desenvolve desde o km 98+000 até ao fim do traçado. Trata-se de uma zona planáltica caracterizada por alternância de relevos suaves e depressões frequentemente preenchidas por materiais detríticos e argilas vermelhas.

No que se refere à tectónica, o traçado atravessa desde o seu início até ao sopé do Arrife terrenos de atitude sub-horizontal, evidenciando a fraca intensidade dos esforços tectónicos. A partir deste local os terrenos encontram-se fortemente tectonizados, sendo a evidência mais saliente o próprio Arrife e a faixa de perturbação associada ao cavalgamento, onde o material se encontra esmagado e brechificado. Na zona do planalto de Fátima é visível nalguns locais intensa fracturação do maciço gerando uma rede de diaclases, assim como vários alinhamentos tectónicos de orientação predominante NW-SE, por vezes associados à ocorrência de depressões, como é o caso do Covão do Coelho.

Em termos litoestratigráficos, a área interessada pelo sub-lanço é essencialmente constituída por formações do Jurássico Médio, correspondente a calcários esbranquiçados, compactos, sub-litográficos, bem estratificados, em geral pouco inclinados, e com grau de carsificação mais ou menos acentuado. Esta formação tem início junto ao Arrife (km 92+125) onde contacta, como se disse, por cavalgamento com uma estreita faixa de formações gresosas do Cretácico Inferior (Fig. 1), constituída essencialmente por arenitos idênticos aos que ocorrem no final do traçado, onde se encontram associados a pequenos afloramentos dispersos de calcários jurássicos carsificados. A parte inicial do traçado desenvolve-se em terrenos do Miocénico constituídos por níveis de calcário, concrecionados, amarelados, alternando com níveis margosos e arenosos.

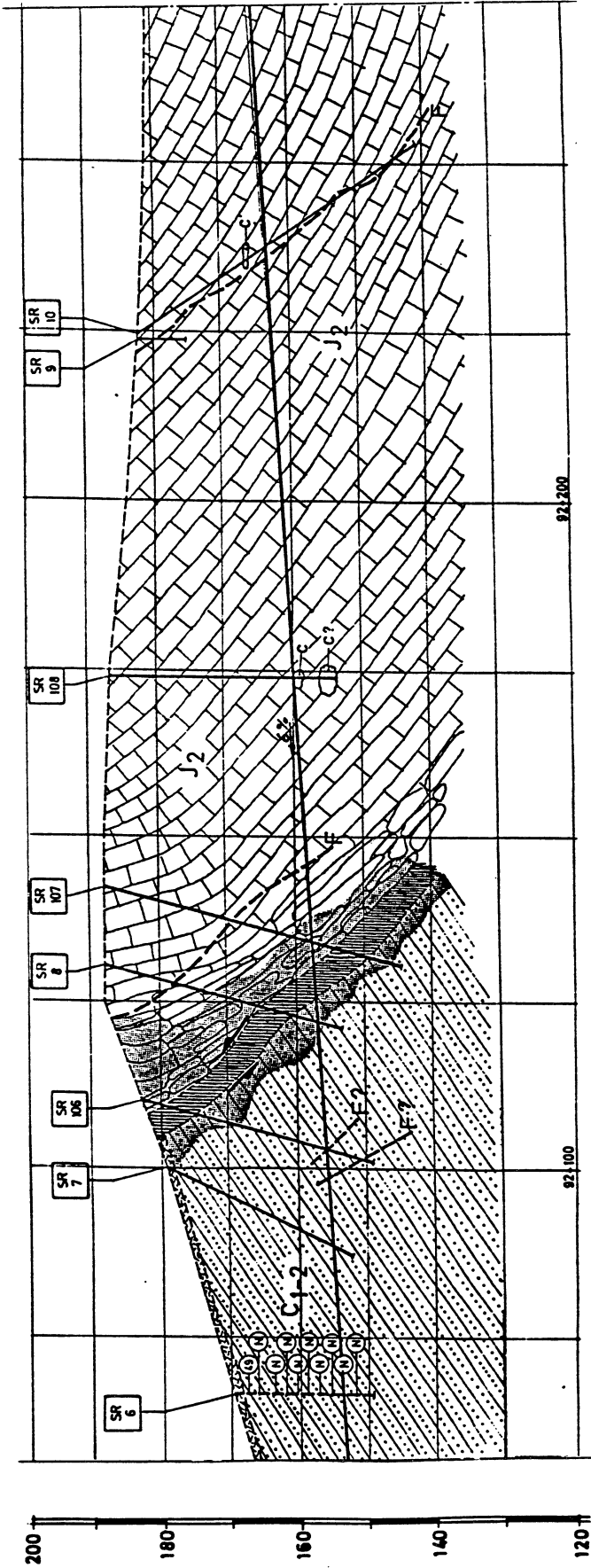
Do ponto de vista hidrogeológico, as formações que ocorrem ao longo do traçado reflectem as condições litológico-estruturais dos terrenos respectivos. Deste modo, podem distinguir-se dois complexos hidrogeológicos:

- o primeiro, constituído essencialmente por materiais areno-argilosos do Miocénico e Cretácico, onde se podem instalar aquíferos de permeabilidade por porosidade, os quais são pouco importantes visto a sua recarga depender de uma rede hidrográfica pobre e de caudais reduzidos;
- o segundo, ocorrente nas formações calcárias jurássicas, onde estão instalados aquíferos de permeabilidade "em grande" através de fendas, diaclases e cavidades existentes. Deste modo, a drenagem superficial é incipiente, terminando em geral em depressões fechadas, dolinas, uvalas e poljes, algares e sumidouros. De tudo isto resulta uma complexa rede de cursos subterrâneos, fortemente hierarquizados, e um nível freático a cotas bastante baixas e sempre muito inferiores às cotas da rasante da auto-estrada, sendo este último facto confirmado pelas profundidades a que se verificam algumas captações de água na região (80-90 m).

Estas características hidrogeológicas levaram a considerar como muito importantes as soluções de projecto que evitassem eventuais situações de poluição dos aquíferos abastecedores da região em resultado da circulação de veículos na auto-estrada.

2.2 - Trabalhos de prospeccção e ensaios

Com o objectivo de caracterizar geologicamente os terrenos interessados pela auto-estrada e definir os principais problemas geotécnicos da obra já referidos no ponto 1, efectuaram-se vários trabalhos de prospeccção mecânica e geofísica, assim como uma série de ensaios laboratoriais e "in situ", nas diferentes fases de projecto.



Esc. 1:1000

LEGENDA





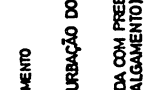



- 
DEPÓSITOS DE VERTEnte
- 
GRÉS CRETÁCICO
- 
CALCÁRIO JURÁSSICO
- 
SENTIDO DO MOVIMENTO
- 
ZONA DE PERTURBAÇÃO DO CAVALGAMENTO
- 
ZONA ESMAGADA COM PREENCHIMENTO ARGILOSO (CAVALGAMENTO)
- 
FALHA PROVÁVEL
- 
CAVIDADE DE DISSOLUÇÃO DO CALCÁRIO DETECTADA EM SONDAGEM

FIG. 1 - AUTO-ESTRADA A1. ZONA DO ARRIFE. PERFIL GEOLÓGICO

Na fase de projecto-base realizou-se uma campanha de prospecção mecânica ao longo de todo o sub-lanço que constou de 9 sondagens à percussão e 29 sondagens à rotação. As primeiras foram executadas nas formações brandas do início do traçado e nas formações residuais de "terra rossa", com o objectivo de determinar a espessura, natureza e características de resistência e deformabilidade dessas formações. As sondagens à rotação localizaram-se nas zonas de grandes escavações e nas proximidades das obras de arte, com vista à análise quer do estado de fracturação e alteração do maciço calcário dos taludes de escavação, quer das características dos terrenos de fundação das obras de arte.

A nível de projecto de execução, os trabalhos de prospecção visaram aprofundar os conhecimentos geológico-geotécnicos do sub-lanço, dando particular importância não só às zonas de grandes escavações e locais de obras de arte como à detecção de eventuais cavidades cársticas de dimensões apreciáveis e à caracterização dos terrenos com vista à sua reutilização nos aterros. Deste modo realizaram-se 17 poços com retroescavadora, nas formações brandas do início e fim do traçado, 62 sondagens à rotação e uma campanha de prospecção geofísica que consistiu na execução de 5 perfis de refração sísmica, com o objectivo de avaliar a reparabilidade das formações gresosas em zonas de escavação, e vários perfis de resistividade eléctrica, num total de cerca de 7 200 m, segundo alinhamentos ao longo da directriz do traçado na zona do planalto de Fátima, com um dispositivo polo-dipolo adequado à detecção de cavidades relativamente pouco profundas [3].

Com base nos resultados dos trabalhos acima mencionados e com o objectivo de aferir e complementar os dados obtidos, efectuou-se uma campanha de 42 sondagens destrutivas, à roto-percussão, quer nos locais onde se verificaram anomalias geofísicas, detectadas pelo método da resistividade eléctrica, as quais poderiam estar associadas a eventuais cavidades não preenchidas, quer ainda nalguns locais de obras de arte onde tinham sido detectadas anteriormente algumas cavidades.

Durante as fases de projecto, foram executados ensaios laboratoriais de identificação (granulometria e limites de Atterberg), de compactação e CBR, sobre as amostras de solos obtidas nos poços e sondagens, com vista à sua caracterização como materiais de construção de aterros.

No que se refere à caracterização dos materiais calcários da região, colheram-se amostras, a partir de afloramentos existentes e de pedreiras localizadas perto da directriz, sobre as quais se efectuaram uma série de ensaios laboratoriais que incluíram determinações de: absorção de água, porosidade e massas volúmicas, velocidade de propagação de ultrassons, resistência à compressão simples, desgaste na máquina de Los Angeles, resistência ao esmagamento, expansão por embebição, resíduo insolúvel em ácido clorídrico e ataque por sulfato de magnésio. Os ensaios mencionados visaram caracterizar os materiais de forma a obter-se informações sobre a qualidade actual e a avaliar-se o seu comportamento futuro, em obra, de modo a poder formular-se um parecer sobre a sua adequação para a construção de aterros de enrocamento.

Com vista à avaliação da granulometria dos materiais calcários resultantes da escavação, procurou precisar-se melhor os conhecimentos adquiridos a partir da análise da fracturação do maciço, obtidos com o reconhecimento geológico de superfície e com o estudo dos tarolos das sondagens. Assim foram realizados ensaios granulométricos em duas pedreiras próximas do traçado da auto-estrada, efectuados sobre materiais obtidos a partir do desmonte de frentes experimentais de trabalho, após prévia selecção de volumes representativos de todas as granulometrias resultantes da exploração do maciço. Com base na informação recolhida, foi ainda definido o coeficiente de empolamento médio dos enrocamentos calcários de 1.20 que se mostrou bem adequado à realidade do maciço rochoso e à metodologia seguida na construção dos pedraplenos. Este aspecto foi considerado de grande importância neste projecto atendendo, como se disse, a que foram escavados cerca de 2 milhões de m³ de maciço rochoso.

2.3 - Zonamento Geotécnico

Os estudos e trabalhos realizados nas diferentes fases de projecto permitiram a elaboração de um zonamento geotécnico, do qual se salientam, pelos problemas associados, as seguintes formações:

- calcários jurássicos - são as formações com maior representação ao longo do traçado, desenvolvendo-se desde a zona do Arrife (km 92 + 125) até cerca do km 109 + 400; a partir daí até ao final do sub-lanço, encontram-se em afloramentos dispersos entre os terrenos gresosos. Trata-se no geral de calcários compactos, em bancadas bem estratificadas de espessura variável. Em termos gerais é possível, a partir do reconhecimento de superfície, incluindo o das pedreiras próximas do sub-lanço, e da análise das sondagens, zonar o maciço calcário em duas regiões, consoante o seu grau de alteração e fracturação:
 - a) a primeira região desenvolve-se até ao km 100 + 400 e corresponde à zona mais acidentada, onde ocorrem as três maiores escavações. Nesta área, o maciço encontra-se no geral medianamente fracturado (F3) e por vezes muito fracturado (F4), sendo excepção a zona do Arrife, onde devido ao cavalgamento, o maciço se encontra muito dobrado e falhado (F4-5). No que diz respeito ao grau de alteração, o maciço é geralmente pouco alterado (W2) com algumas zonas importantes medianamente alteradas (W3);
 - b) a segunda região corresponde à parte de relevo mais suave, que se desenvolve a partir do km 100 + 400, ou seja o "planalto de Fátima". Aqui, as águas superficiais de escorrência deslocam-se a menores velocidades, provocando mais facilmente a dissolução dos calcários, que por isso apresentam numerosas manifestações de carsificação. No geral o maciço encontra-se pouco (W2) a medianamente alterado (W3), com passagens muito alteradas ou decompostas (W4-5), em particular nas camadas superficiais; em termos de fracturação o maciço é idêntico ao da zona anterior, isto é, medianamente fracturado (F3) com zonas muito fracturadas (F4-5).
- formações residuais (terra rossa) - resultam da dissolução do calcário e são constituídas por solos argilosos de baixa a média plasticidade, por vezes arenosos, que se apresentam geralmente muito duros a rijos. Estes materiais acumulam-se nos vales e depressões fechadas do maciço calcário (ex. depressão do Covão do Coelho), particularmente desde o km 97 + 900 até ao fim do traçado (planalto de Fátima), ocorrendo ora como reduzidos recobrimentos, ora como preenchimentos de estruturas localizadas no calcário do tipo "marmitas" ou "chaminés", cuja dimensão vertical é privilegiada, podendo mesmo atingir vários metros de profundidade.

Para além destas formações, outras foram identificadas e zonadas geotecnicamente, como sejam as formações aluvionares, os calcários margosos do Miocénico, as formações argilo-arenosas e areno-argilosas do Miocénico e as formações gresosas do Cretácico, as quais não apresentam problemas geotécnicos significativos para esta obra.

3 - ESCAVAÇÕES NO MACIÇO CALCÁRIO

3.1 - Generalidades

Tendo em conta que o maciço calcário se apresenta, de um modo geral, compacto e medianamente fracturado com atitude sub-horizontal e que os níveis aquíferos não são em regra atingidos pela rasante da auto-estrada, considerou-se para as escavações com alturas inferiores a 10 m inclinações de taludes de 2/1 (v/h), sem banquetas. Este é o caso mais comum das escavações no sub-lanço, uma vez que os 10 m de altura só são excedidos em três casos situados aos km 91 + 985 a 92 + 485 (Arrife), km 94 + 790 a 95 + 650 e km 97 + 040 a 97 + 785 (Covão do Coelho), sobre os quais se faz adiante referência às suas principais características e medidas tomadas. A decisão relativamente às inclinações dos taludes, particularmente nas grandes escavações, apoiou-se na ponderação de vários pontos de vista, não só geotécnico como de integração paisagística (agressividade dos taludes), comodidade óptica dos utentes e sentimento de segurança contra eventuais desprendimentos de blocos, daí resultando a recomendação de inserção de banquetas nos taludes mais altos, com o conseqüente adoçamento da sua inclinação média.

Com o objectivo de atenuar ainda mais a agressividade nas zonas de grande escavações, as bases dos taludes foram recuadas cerca de 3.9 m relativamente às bermas exteriores da auto-estrada e adoçaram-se os taludes superiores, acima da banquetta de cota mais elevada.

Como protecção da plataforma contra a queda de materiais rochosos, além dos trabalhos finais de saneamento de blocos que se apresentavam com estabilidade precária, efectuou-se nos locais das grandes escavações uma vala trapezoidal profunda junto à base dos taludes, para retenção de materiais que venham eventualmente a desprender-se. Complementarmente, em zonas delimitadas dos taludes de escavação mais fracturados e fragmentados ou muito alterados, identificados em fase de assistência técnica à obra, foram colocadas redes metálicas de protecção pregadas superficialmente no maciço rochoso.

Em todas as zonas de grandes escavações fez-se a recomendação de o desmonte com explosivos ser conduzido com cuidados especiais de forma a evitar-se os efeitos de descompressão do maciço, a minimizar-se as vibrações resultantes e a obter-se uma superfície para os taludes o mais regularizada possível. Para tal, foi utilizada a técnica designada por "smooth blasting" e nas zonas onde as escavações se aproximaram de edificações existentes foi feito pelo LNEC o controlo dos níveis de vibração, tendo em atenção a norma portuguesa em vigor.

Idêntico controlo foi feito na zona do algar da Lomba que ocorre 60 m abaixo da superfície do terreno sob a plataforma da auto-estrada e onde foi necessário proceder à escavação de cerca de 15 m do maciço calcário sobrejacente, a fim de se atingir a cota da rasante, neste caso com vista a assegurar que as vibrações resultantes não provocariam qualquer estrago no algar.

3.2 - Escavação do Arrife

Esta escavação, que se inicia nos grés cretácicos, começa a interessar os calcários jurássicos junto da escarpa do Arrife, estendendo-se por cerca de 500 m, com uma altura máxima de 31 m segundo o eixo da via. Em virtude das acções tectónicas, de que o cavalgamento é a expressão mais evidente, o maciço calcário encontra-se frequentemente muito fracturado (F4-5), conforme já se disse. Nas proximidades da escarpa, onde se dá o contacto anómalo com os grés, esta fracturação é mais intensa, em especial na zona de perturbação junto ao cavalgamento. O efeito de tectonização do maciço faz-se sentir em toda a extensão da escavação, embora de forma mais atenuada quanto mais distante do Arrife, apresentando o maciço zonas mais fracturadas (F4-5) alternando com zonas medianamente fracturadas (F3).

Apesar da atitude geral das camadas rochosas não ser desfavorável relativamente aos cortes realizados, considerou-se necessário adoptar taludes com pendentes suaves na zona de escavação junto à escarpa do Arrife, local onde estes assumem as maiores alturas e onde o maciço se apresenta mais tectonizado, fazendo-se gradualmente a transição para taludes mais inclinados após se atingir uma zona do maciço menos perturbada tectonicamente.

A escavação inicia-se com cortes desiguais do lado esquerdo e direito da via (sentido S-N) em mais de 100 m de extensão, até sensivelmente ao km 92 + 125, apresentando este último lado taludes de escavação com alturas muito superiores, que chegam a atingir os 40m. Até este ponto quilométrico os taludes estão inclinados de 1/1.5 (v/h), com banquetas de 3m de largura, espaçadas 8 m em altura, conforme definido para as formações gresosas. Assinale-se no entanto que do lado direito e a partir aproximadamente do km 92 + 025 as escavações começam a interessar progressivamente os calcários jurássicos que cavalgam os terrenos cretácicos. A inclinação do talude do lado direito entrecortado de banquetas e a visão aberta para a esquerda da estrada minimizam eventuais problemas de agressividade ou de sentimento de insegurança no local.

A partir do km 92 + 125, onde as escavações começam a interessar totalmente os calcários jurássicos, e num trecho de 75 m, faz-se a transição das inclinações dos taludes para os valores fixados para os cortes em rocha, variando a inclinação de 1/1.5 para 3/1 e permanecendo as banquetas de 8 em 8 m. Esta geometria mantém-se até ao final da escavação, apresentando-se os taludes a partir daí já com alturas menos importantes e semelhantes dum e do outro lado da via. Para melhor integração paisagística, foi considerado, como se disse, um adoçamento dos taludes acima da última banqueta.

Em fase de obra, vieram a confirmar-se as considerações de projecto relativamente às características do maciço calcário e ao posicionamento do seu contacto com as formações gresosas. Após observação das escavações, que evidenciaram forte tectonização e fragmentação do maciço um

pouco mais para norte do que inicialmente previsto, houve oportunidade de intervir na geometria do talude do lado direito, no trecho de transição com 75 m de extensão, na sua parte superior, acima da segunda banqueteta, alargando as banquetetas e adoçando a inclinação dos taludes. Para além de se ter melhorado as condições de estabilidade locais, a escavação passou a exibir um melhor enquadramento visual.

3.3 - Escavação do km 94 + 790 ao km 95 + 650

A escavação do km 94 + 790 ao km 95 + 650 atinge uma altura máxima, segundo o eixo, da ordem dos 18 m, interessando o maciço calcário, cuja estratificação geral se apresenta preferencialmente sub-horizontal, passando a inclinar ligeiramente para sudoeste no local da referida escavação.

Inicialmente, na fase de projecto de execução, tinha-se preconizado inclinações para os taludes de escavação de 3/1 (v/h) com uma banqueteta de 3 m de largura aos 10 m de altura. Posteriormente, já em fase de obra, constatou-se que, em consequência de uma falha detectada na fase de projecto, a orientação da estratificação se apresentava, em parte da escavação, desfavorável à estabilidade do talude Norte, uma vez que esta família de descontinuidades inclina para a auto-estrada e se encontra associada a um sistema de diaclases que compartimentam o maciço, podendo provocar a curto ou médio prazo queda de blocos ou mesmo de massas rochosas por vezes de apreciáveis dimensões. Deste modo, efectuou-se um levantamento sistemático das principais descontinuidades do maciço, a partir do qual se revelou a existência de 3 famílias principais cujas orientações são: N10°-30°W/ 20°-40°SW, coincidente com a estratificação e chegando mesmo em alguns locais a ter inclinações superiores; N15°-30°E/ 75° a subvertical; N40°-80°W/ 70° a subvertical.

Face a estas condições geológico-estruturais concluiu-se da necessidade de actuar neste trecho do talude, de forma a garantir a sua estabilidade em serviço. Para tal consideraram-se duas soluções alternativas:

- a) adoçamento do talude para valores compatíveis com a inclinação dos estratos, o que apresentava como principais desvantagens o provável recurso a novas expropriações, o volume adicional de escavações a realizar e consequente demora que tais trabalhos poderiam introduzir no programa geral de trabalhos;
- b) recurso a ancoragens ou pregagens relativamente pouco profundas, visando aumentar a resistência ao corte ao longo das superfícies de estratificação e evitando escavações adicionais e expropriações.

Numa tentativa de conciliar as vantagens das duas soluções acima mencionadas, a BRISA optou por uma solução mista. Assim, até à altura da banqueteta, manteve-se a geometria inicial do projecto, prevendo-se o recurso a pregagens para assegurar a estabilidade das camadas calcárias e ao recobrimento parcial com rede metálica para evitar a queda de blocos. Entre a banqueteta e o topo do talude foi materializada a suavização do talude para uma inclinação de cerca de 35°, compatível com a atitude média da estratificação.

Com a finalidade de melhorar a segurança da plataforma nesta zona, aumentou-se a secção da vala trapezoidal de base do talude, ficando este a cerca de 6 m da berma exterior da via.

3.4 - Escavação do Covão do Coelho

No local do Covão do Coelho o maciço encontra-se sujeito a acções meteóricas diferenciais, estando por isso um pouco mais descomprimido na encosta virada a Sul. Trata-se de um maciço medianamente fracturado (F3), com zonas menos fracturadas (F2) a maiores profundidades e com algumas passagens mais fracturadas (F4) próximas da superfície. Em termos de alteração o maciço é pouco (W2) a medianamente alterado (W3), com ocorrência de vestígios de carificação, sobretudo na encosta norte, geralmente associadas às zonas de maior fracturação dos calcários.

Neste local, a rasante intersecta o maciço a uma profundidade máxima de cerca de 30 m, tendo-se por isso efectuado, na fase de projecto-base, um estudo comparativo entre a solução de

travessia em túnel (túnel bidireccional e túneis geminados) e a solução de escavação a céu aberto. Nas razões justificativas do estudo comparativo, para além das de natureza técnico-económica, predominaram as de impacte ambiental e de natureza paisagística (efeito psicológico nos condutores resultante da altura das escavações e do traçado em curva do alinhamento, a grande escavação no maciço calcário numa extensão de cerca de 750 m, etc.).

A solução em túnel tinha a seu favor, face à ocorrência de condições geológicas e geotécnicas favoráveis (apesar de a atitude subhorizontal dos estratos exigir cuidado para evitar sobre-escavações na zona do tecto), a circunstância de minimizar significativamente o impacte resultante da grande escavação a céu aberto. Em termos de análise de custos, concluiu-se que a reduzida extensão da travessia e a fraca espessura de recobrimento do túnel, com custos consideráveis dos suportes no tecto, favoreciam bastante a alternativa de escavação em céu aberto, tornando-a significativamente mais económica.

Ponderados os inconvenientes e vantagens de ambas as soluções, a BRISA optou pela solução de travessia a céu aberto, que foi objecto de projecto de execução no qual foram definidas inclinações de taludes de escavação a 3/1 (v/h), com banquetas de 3 m de largura, espaçadas 10 m em altura. Os taludes acima da última banqueta foram projectados com inclinações menores, de 2/1 (v/h), de forma a permitir um melhor enquadramento paisagístico, face à grande altura dos taludes.

Posteriormente, já em fase de construção, alterou-se a largura das banquetas para 5 m, devido a razões construtivas e ainda com o objectivo de facilitar o acesso às eventuais intervenções de manutenção. Pontualmente, nos locais dos taludes onde se verificaram vestígios de carsificação, com pequenas cavidades vazias ou preenchidas com terra rossa, procedeu-se à sua limpeza e ao preenchimento com pedra calcária argamassada.

4 - CAVIDADES CÁRSICAS

Durante a fase de projecto foi dada uma particular atenção aos fenómenos de carsificação do maciço calcário. Nomeadamente, procurou esclarecer-se com razoável probabilidade a eventual ocorrência de cavidades vazias de grandes dimensões que viessem a pôr problemas de segurança ou de resolução difícil, técnica ou economicamente, tanto na fase de obra com na fase de exploração.

Estes fenómenos de carsificação, resultantes da dissolução da rocha devido à circulação de água, originam cavidades de dimensões variadas, vazias ou preenchidas (menos condicionantes), com uma distribuição muito irregular e uma localização de difícil previsão no interior do maciço. Face à aparente ausência de lógica geológica no seu modo de ocorrência, foi adoptada a seguinte metodologia de estudo, nas fases de projecto:

- recolha de informação junto às populações locais e a grupos de espeleólogos conhecedores da região, relativamente à existência de cavidades;
- reconhecimento geológico de superfície, procurando localizar e caracterizar cavernas nas proximidades da via;
- observação dos tarolos recolhidos com as sondagens de rotação e análise de dimensão, frequência de ocorrência e tipo de enchimento de cavidades atravessadas;
- realização de campanha de prospecção geofísica pelo método de resistividade eléctrica segundo vários alinhamentos ao longo da directriz da auto-estrada, com um dispositivo adequado à detecção de cavidades relativamente pouco profundas. Esta campanha incidiu, como se disse, em particular na zona do planalto de Fátima, onde se considerou existirem os maiores vestígios de carsificação, e nas zonas em escavação com a rasante próxima da superfície do terreno, onde seria mais perigosa para a segurança da obra a eventual presença de cavidades sub-superficiais não preenchidas;
- aferição dos resultados da prospecção eléctrica através de sondagens destrutivas, à roto-percussão, localizadas nas zonas de anomalias de elevada resistividade eléctrica em relação ao andamento geral da resistividade do maciço encaixante (anomalias positivas), eventualmente associadas a vazios.

Algumas das sondagens destrutivas confirmaram a existência de cavidades, cujas dimensões e geometria foram definidas recorrendo à execução de mais alguns furos. O facto de nem todas as sondagens destrutivas, localizadas em zonas de anomalias positivas terem detectado cavidades significativas pode dever-se a deslocamento destas, devido a efeitos secundários, em relação ao centro da anomalia, ou às cavidades se situarem a profundidades superiores às atingidas pelas sondagens.

Com o objectivo de complementar o esclarecimento destas eventuais situações incluiu-se no caderno de encargos a recomendação de, em fase de obra, serem efectuadas passagens com equipamento rolante pesado, com solicitações vibrantes, sobre o leito dos aterros, antes da colocação destes, ou nos trechos em escavação, antes da colocação da camada de fundação do pavimento, visando a detecção de eventuais cavidades próximas da superfície.

No decurso dos trabalhos de construção da via, após a desmatagem e durante as escavações, houve a possibilidade de melhorar o conhecimento sobre a ocorrência de cavidades junto da plataforma da auto-estrada. Como resultado, foram descobertas diversas pequenas e médias manifestações cársticas, em geral com um desenvolvimento predominantemente vertical, do tipo algares, associadas por vezes a ramificações sub-horizontais ou alargamentos a diferentes profundidades. Foi igualmente nesta fase que se realizaram os trabalhos de levantamento topográfico interior e os estudos de caracterização do valor espeleológico e ambiental das principais cavidades detectadas, num total de 11, a cargo da empresa responsável pelo estudo de impacto ambiental, apoiada pela Fiscalização da obra. Nos casos mais significativos, registaram-se profundidades dos algares da ordem das poucas dezenas de metros e alargamentos máximos em zonas de galeria de cerca de 5 - 6 m.

Das 11 cavidades caracterizadas ao longo de todo o traçado, ficou decidida a preservação de 9, das quais 3 com a construção de acessos visitáveis sob a auto-estrada, de modo a permitirem posteriores estudos, sempre que necessário. As restantes situações de preservação foram concretizadas com uma solução de tapamento da boca dos algares recorrendo a lajes de betão armado. As outras cavidades estudadas, assim como as demais detectadas, de reduzidos interesse e dimensões, foram entulhadas com materiais de enrocamento.

Para garantir uma mais correcta definição da geometria das cavidades preservadas e assim assegurar adequadas condições de fundação das estruturas de tapamento e acesso das cavidades, nomeadamente daquelas sob a auto-estrada, foram realizadas nalguns casos, com o apoio do LNEC, prospecções eléctricas adicionais complementadas com sondagens destrutivas no maciço envolvente das zonas carsificadas.

Na fase final da obra, em complemento de todos os estudos realizados e tendo em vista a detecção de eventuais cavidades omissas sob a auto-estrada, em particular nas plataformas de escavação, foi realizada pelo LNEC uma campanha de prospecção geofísica de âmbito mais alargado, recorrendo à utilização de radar de superfície, técnica pela primeira vez utilizada em Portugal.

Comparando todos os resultados obtidos na fase de obra resultantes dos numerosos trabalhos de prospecção e da observação conduzida, nomeadamente nas zonas de escavação, conclui-se pela justeza das considerações expressas no projecto relativamente à ocorrência de cavidades cársticas e à sua importância para as obras.

5 - ATERROS DE ENROCAMENTO

5.1 - Especificações construtivas

Constituiu uma particularidade desta obra o facto da maior parte do seu traçado se desenvolver em zonas onde predominava o material rochoso, daí resultando vários condicionamentos, designadamente a necessidade de se reutilizar nas zonas de aterro o material das escavações, essencialmente pétreo, o que pôs em questão:

- a adopção de técnicas adequadas de escavação (desmonte a fogo), por forma a minimizar o trabalho de preparação ulterior do material escavado para o seu emprego nos aterros;

- a adopção de técnicas adequadas para a realização de aterros com material de enrocamento;
- a adopção de técnicas adequadas para o projecto, controlo de construção e previsão do comportamento de aterros deste tipo, sobretudo os de maior altura.

Na fase de estudos, a definição das especificações e orientações de projecto, no que respeita à execução dos aterros de enrocamento, resultou da ponderação de toda a informação então adquirida relativamente às características do maciço calcário, nomeadamente do reconhecimento geológico de superfície do traçado, da interpretação das numerosas sondagens efectuadas no seu alinhamento (estados de fracturação e de alteração do maciço), dos ensaios em laboratório para determinação das propriedades índice dos blocos calcários aí recolhidos e igualmente da observação das características do maciço em diversos locais de pedreira em exploração próximos do sub-lanço. Nalguns destes locais inclusivamente realizaram-se, como se disse, ensaios "in situ" de determinação da granulometria que se obtinha do desmonte a fogo destas formações, para assim se ter uma primeira aproximação do que se poderia esperar das escavações na linha, durante a obra.

Estas informações, no seu conjunto, permitiram estimar uma primeira ordem de grandeza do comportamento mecânico do material de enrocamento, assim como definir especificações prévias, a ajustar em fase de obra. Preconizou-se para a fase inicial dos trabalhos de construção a realização de ensaios de compressão unidimensional em provetes modelados do material retirado dos aterros, a fim de se determinar as suas características de deformabilidade sob acções estáticas.

As especificações construtivas finais dos aterros de enrocamento foram elaboradas após a realização de aterros experimentais no período inicial da obra, onde se definiram as técnicas construtivas mais adequadas, em face do material de escavação obtido, após os devidos ajustamentos dos planos de fogo (espaçamentos da malha de furação e carga dos explosivos), e do equipamento disponível para a execução dos pedraplenos. Teve-se igualmente em conta o facto do abastecimento de água em toda a zona da obra ser bastante difícil, o que impediu que se efectuasse a rega abundante das camadas de aterro, prática recomendada na realização de aterros de enrocamento compactados.

As camadas de enrocamento, colocadas segundo a técnica de "deposição em cordão", foram em geral construídas com espessuras de 1.20 ± 0.20 m. Em zonas de transição, como sejam a transição de aterros para escavações, nas proximidades das obras de arte ou em aterros de reduzida altura, as espessuras de camada foram menores. A compactação das camadas fez-se com 4 a 6 passagens de cilindros vibradores de rasto liso, com pesos estáticos totais da ordem de 12 a 16 t.

Foram utilizados enrocamentos com características granulométricas contínuas e extensas, apresentando em geral valores de coeficientes de uniformidade (D_{60}/D_{10}) variando entre 20 e 50. Aceitaram-se blocos com diâmetros nominais máximos de cerca de 2/3 da espessura da camada. A percentagem máxima de finos do enrocamento (<# 200 ASTM) foi fixada em 10%, com algumas excepções em zonas de pequena altura de aterro onde a deformabilidade não-era condicionante. Para estas características granulométricas dos materiais, limitou-se o índice de vazios após compactação a valores iguais ou inferiores a 0.25, a que correspondem pesos volúmicos aparentes secos mínimos nos aterros da ordem de 21.0 kN/m³.

O controlo de construção dos aterros foi feito recorrendo à determinação da curva granulométrica dos materiais, assim como do seu peso volúmico aparente seco, para avaliação do estado de compacidade. A frequência de realização destes ensaios, bastante morosos, foi em média de uma vez por cada 20 000 m³ de aterro.

Para a observação do comportamento estrutural dos enrocamentos durante a fase de serviço da auto-estrada, foi prevista a instrumentação de alguns dos aterros mais altos.

5.2 - Taludes dos aterros

Os aterros de enrocamento foram em geral construídos com uma inclinação de taludes de 1/1.5

(v/h), ditada essencialmente por razões de adequada integração paisagística e maior facilidade de colocação de revestimentos vegetais. Do ponto de vista geotécnico, face às características mecânicas dos enrocamentos utilizados, esta inclinação apresentava-se como conservadora, em termos de estabilidade dos taludes. Em locais onde não foram condicionantes os aspectos paisagísticos e desde que as condições de fundação fossem adequadas, realizaram-se os taludes com uma inclinação de 1/1, em situações de aterro com uma altura máxima de 15 m.

Para o caso dos aterros com taludes de 1/1.5 (v/h), nos maciços laterais delimitados pelo talude superficial e pela linha de talude a 1/1, aceitou-se a utilização de enrocamentos "sujos", com percentagens de finos até 15%. Este zonamento permitiu uma melhor gestão dos materiais rochosos obtidos nas escavações ao longo do traçado, em particular nas camadas mais superficiais do maciço, face à ocorrência nalguns trechos de quantidades significativas de materiais argilosos (terra rossa) resultantes da alteração dos calcários, tornando difícil a separação da argila do material rochoso. A construção destas bandas laterais com enrocamentos "sujos" não altera a sua acção estabilizante, nem interfere na deformabilidade dos aterros, ao nível da plataforma.

6 - FUNDAÇÕES DAS OBRAS DE ARTE

Conforme já referido, a construção do sub-lanço envolveu a execução de 12 passagens inferiores, 7 passagens superiores e 3 viadutos, dos quais a maioria está fundada nos calcários jurássicos.

Com o objectivo de analisar a capacidade de suporte dos terrenos de fundação, assim como de definir o tipo e profundidade das fundações de cada obra de arte, realizaram-se a nível de projecto 66 sondagens à rotação, distribuídas pelas passagens desniveladas, seguidas de algumas sondagens destrutivas, servindo estas para melhorar a informação relativa à existência de cavidades e suas dimensões. Posteriormente, face à decisão de execução dos 3 viadutos, já em fase de obra, realizou-se nos respectivos locais uma campanha adicional de sondagens à percussão, acompanhadas pela execução de ensaios SPT, sondagens à rotação e ainda sondagens destrutivas.

Tendo em conta a natureza cársica do maciço calcário e os resultados das sondagens efectuadas, considerou-se como provável a existência de uma ou outra cavidade de dissolução, preenchida ou não, com alguma importância na zona de influência das fundações das obras de arte. Com a finalidade de confirmar a existência destas cavidades, optou-se pela observação cuidada dos locais de implantação das sapatas, após escavação até ao respectivo nível, com remoção de qualquer depósito de terra rossa existente e preenchimento desse espaço por betão. No caderno de encargos foi ainda prevista a realização de furos destrutivos em todas as sapatas e após se atingir a cota de fundação, com profundidades da ordem de 3 a 4 vezes a largura das sapatas, a fim de detectar eventuais cavidades com consequências para a estabilidade das obras de arte. O critério preconizado foi o de se executar um furo por cada sapata isolada e 2 a 3 furos por cada sapata corrida, conforme as suas dimensões.

As cavidades detectadas por estes furos, em geral de pequenas dimensões, foram preenchidas com uma argamassa adequada, a partir do próprio furo, excepto quando localizadas muito próximas do nível da fundação, situação em que se optou pelo desmonte local até à respectiva cota e posterior preenchimento com betão.

De um modo geral, e atendendo às características do maciço calcário, consideraram-se, a nível de projecto, tensões admissíveis nos terrenos de fundação relativamente baixas, por forma a limitar as tensões induzidas no maciço a valores reduzidos, minimizando assim os efeitos de eventuais zonas de fraqueza devidos sobretudo à possibilidade de ocorrência de cavidades não preenchidas.

7 - IMPORTÂNCIA DAS ACTIVIDADES DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA PELO PROJECTISTA

De acordo com a legislação em vigor "a assistência técnica constitui uma obrigação e um direito do autor do projecto". No caso de projectos de estradas é frequentemente modesta a actividade geotécnica do projectista na fase de assistência técnica, substituindo-se por vezes a Fiscalização ao projectista em decisões importantes para o bom comportamento das obras, dificultando dessa

forma o contacto dos técnicos que projectam com as realidades que decorrem da construção e que normalmente se revestem de um notável carácter formativo.

Ao longo desta comunicação, e a propósito dos principais problemas de natureza geotécnica nela descritos e analisados, ficou claro a notável actividade geotécnica que decorreu na fase de construção, quer em consequência das condições específicas do projecto (grandes taludes de escavação em maciços rochosos, ocorrência de cavidades cársticas, aterros de enrocamento de grandes alturas, etc.), quer em consequência de alterações pontuais ao projecto em consequência de recomendações ou exigências resultantes dos estudos de impacte ambiental.

Só o acompanhamento pela equipa projectista de todas essas questões em permanente contacto e com o apoio da Fiscalização e do Empreiteiro permitiu encontrar as soluções que melhor servem a obra e melhor se adaptaram aos condicionamentos relativos aos prazos e aos equipamentos disponíveis. Importa salientar, a terminar esta comunicação, o excelente relacionamento sempre existente entre os vários agentes intervenientes na obra, o que permitiu uma assistência técnica eficaz e oportuna.

8 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BRISA - Auto-estradas de Portugal a autorização para publicar os elementos que constam nesta comunicação.

BIBLIOGRAFIA

1. COBA - Auto-estrada do Norte (A1). Sub-lanço Torres Novas - Fátima. Projecto-base. Tomo 3 - Estudo Geotécnico. 1981.
2. COBA - Auto-estrada do Norte (A1). Sub-lanço Torres Novas - Fátima. Projecto de Execução nº 1 - Terraplenagens. Parte 1.4 - Geotecnia. Agosto 1988.
3. LNEC - Prospecção geofísica no trecho da auto-estrada Torres Novas - Fátima. Departamento de Geotecnia. Núcleo de Prospecção. Junho de 1988.
4. Domingues, E. - Auto-Estrada do Norte (A1). Construção dos sub-lanços Torres Novas/ /Fátima/Leiria. BRISA Informação nº 22, 1º semestre 1991.