

CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ATRAVESSADO PELO TÚNEL DO ADUTOR SADO-MORGAVEL*

Geotechnical Classification of the Rock Mass Excavated for the Sado-Morgavel Tunnel

por
LUIZ M. OJIMA**

RESUMO – É apresentada a metodologia adoptada para a elaboração de uma classificação geotécnica do maciço atravessado pelo túnel do adutor Sado-Morgavel.

No artigo desenvolvem-se ainda considerações quanto à aplicabilidade das classificações existentes à construção do referido túnel.

SYNOPSIS – A methodology is described which was adopted in working out a geotechnical classification of the rock mass excavated for the Sado-Morgavel tunnel.

Considerations are also presented in the paper, concerning the applicability to said tunnel of a number of existent geotechnical classifications.

1 – INTRODUÇÃO

O túnel do adutor Sado-Morgavel, actualmente em construção no Alentejo, Portugal, tem um comprimento de cerca de 13 km (já com 7,5 km escavados) e um diâmetro médio de 3,5 m. Atravessa uma zona constituída por filitos do Carbónico e a sua perfuração está a ser conduzida com máquinas de

* Manuscrito recebido em Outubro de 1980. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Geólogo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S. Paulo S. A.

Estagiário do Núcleo de Obras Subterrâneas do LNEC.

escavação em secção total e de ataque pontual. A construção tem-se revestido de dificuldades, com frequentes paralisações das frentes de trabalho, devido à existência de zonas com baixas características geotécnicas.

Os trabalhos de caracterização e classificação geotécnica têm-se mostrado de difícil condução devido ao método construtivo utilizado e às particularidades estruturais e litológicas do maciço. A limitada experiência na construção de túneis neste tipo de maciço tem sido um dos obstáculos para o prosseguimento dos trabalhos.

Neste artigo são apresentados os estudos de caracterização geotécnica e a metodologia seguida para a definição de uma classificação específica para o maciço atravessado pelo túnel.

2 – CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS PARA TÚNEIS

Não obstante o grande aperfeiçoamento ocorrido nos últimos anos no estudo geotécnico das obras subterrâneas, principalmente no que se refere à compreensão dos fenómenos envolvidos, às técnicas de caracterização dos maciços e ao refinamento dos métodos de cálculo, ainda são numerosas as dificuldades inerentes ao projecto das mesmas obras, dificuldades estas quase sempre devidas ao precário conhecimento dos parâmetros intervenientes no seu comportamento. Tais parâmetros são dependentes: a) das características mecânicas do maciço, em geral condicionadas pelas descontinuidades e anisotropia da rocha; b) do estado de tensão inicial; c) das características hidrogeológicas das formações; d) do método construtivo (nomeadamente, do processo de escavação, do tipo e do momento de colocação do suporte); e) das dimensões da obra.

As técnicas de caracterização do maciço quase sempre apresentam limitações e, em muitos casos, principalmente se se trata de obras lineares, como os túneis, apenas fornecem informações pontuais bastante espaçadas, que depois são extrapoladas ao resto do maciço.

Os métodos de cálculo de suportes e revestimentos, nomeadamente os dos elementos finitos, teoricamente permitem a consideração ou a simulação de heterogeneidades, anisotropias e descontinuidades, estado de tensão inicial, suportes provisórios e processos de escavação. Porém, na prática, existem grandes dificuldades em estabelecer valores para os parâmetros, que retratem fielmente as características do maciço, dos suportes e de outros factores influentes nas obras subterrâneas.

Em face desta problemática, desenvolveram-se nos últimos anos métodos de projecto de obras subterrâneas seguindo a via empírica (associação de experiência com aproximações teóricas) os quais exigiram o estabelecimento de classificações geotécnicas aplicáveis a túneis. Basicamente, uma classificação geotécnica faz uma avaliação da qualidade do maciço, situando-o numa classe conforme a pertinência de determinadas características geotécnicas, e faz recomendações quanto ao suporte julgado mais adequado para as condições verificadas.

Entre as variadas classificações existentes, podem citar-se, como mais representativas, as dos seguintes autores: Terzaghi (1946), Lauffer (1958), Whickham (1972), Bieniawski (1973), AFTES (1974), Louis (1974), Pacher e Rabcewicz (1974), Barton (1974), Rocha (1976), Bieniawski (1976).

Pode afirmar-se que cada uma das classificações citadas tem a caracterizá-la objectivos diferentes e meios distintos de atingir estes. A experiência de cada autor e a sua preocupação em alcançar objectivos aprioristicamente fixados é que definem a metodologia de cada classificação. Por exemplo:

- a classificação de Bieniawski (1976) tem como objectivo principal a determinação da relação entre o vão livre do túnel e o tempo de sustentação sem suporte, bem como a estimativa da coesão e do ângulo de atrito para cada classe de maciço; quando faz indicações de suporte primário, pressupõe que o diâmetro do túnel esteja em torno dos 10 m, que a tensão vertical seja inferior a 25 MPa e que o método de escavação seja por explosivos;
- a classificação da AFTES tem como objectivo principal a escolha do suporte; diferentemente das outras classificações, não fixa aprioristicamente as dimensões do túnel nem o método de escavação, que são todavia utilizados como factores que recomendam a escolha de um determinado tipo de suporte;
- a classificação de Pacher e Rabcewicz (1974) tem como objectivos principais as previsões do método de escavação (em secção parcial ou total), das funções a desempenhar pelo suporte primário e do prazo limite para aplicação do mesmo; em princípio, a classificação é aplicável a túneis com secções da ordem de uma centena de metros quadrados;
- a classificação de maciços fracturados de Rocha (1976) tem como objectivo principal a determinação da carga que irá solicitar o suporte; em princípio, é aplicável a variadas dimensões da secção do túnel,

dado que o diâmetro é um dos factores utilizados para a determinação do volume destacável que se traduz naquela carga.

Em síntese, há que admitir que a aplicação de uma dada classificação só conduza a resultados satisfatórios quando os objectivos visados e os meios de que se dispõe (critérios de classificação) são adaptáveis aos fixados pelo autor respectivo.

3 – A APLICABILIDADE DAS CLASSIFICAÇÕES EXISTENTES À CONSTRUÇÃO DO TÚNEL SADO-MORGAVEL

A inspecção aos troços já escavados (7,5 km) e o acompanhamento dos trabalhos de escavação permitiram concluir que as classificações existentes não se adaptavam à construção do túnel Sado-Morgavel. Isto porque os objectivos de classificação, que se afiguravam como os mais importantes para o túnel em questão eram: a) indicação do tipo de suporte de 1.^a fase mais adequado para cada classe de maciço; b) fornecimento de elementos úteis para o dimensionamento do revestimento definitivo; c) fornecimento de eventuais indicações sobre a mais conveniente tecnologia de perfuração. Além disso, a construção do túnel Sado-Morgavel apresenta certas particularidades como, por exemplo:

- secção reduzida, com aproximadamente 10 m² de área e raio em torno de 1,70 m;
- métodos de arranque sem explosivo;
- maciço constituído basicamente por filito, com foliação muito pronunciada, muito perturbado tectonicamente e com materiais com tendências expansivas.

Estas particularidades também não permitiram que se aplicassem directamente os parâmetros utilizados nas classificações existentes. Com efeito, é fácil de ver que a importância prática dos limites de determinados parâmetros, como por exemplo o espaçamento das fracturas, depende directamente das dimensões da obra; num túnel como o Sado-Morgadel, cujo raio da secção é aproximadamente 1,70 m, não se justifica considerar valores limites de espaçamento de 2 ou 3 metros, pois os valores susceptíveis de causar instabilidade serão inferiores a 1 m. Da mesma forma, a avaliação do significado de certas características do maciço, como por exemplo a resistência à com-

pressão e as condições de água, torna-se bastante difícil, pois tais características são afectadas pela acentuada foliação e pela fracturação, bem como pela variação sazonal (para as águas subterrâneas). Interessa referir também que certos parâmetros, geralmente não utilizados nas classificações existentes, como por exemplo a expansibilidade, desempenham papéis importantes no maciço em questão.

Em síntese, as classificações existentes não se mostraram aplicáveis à construção do túnel Sado-Morgavel, devido aos objectivos visados e principalmente a certas particularidades do maciço e da obra, que condicionavam a escolha de determinados critérios. Assim, tornou-se desejável realizar trabalhos numa tentativa de estabelecer uma classificação específica para o túnel em questão, desenvolvendo-se, para tanto, uma metodologia apropriada para sistematizar e fundamentar os conceitos que se julgaram pertinentes.

4 – METODOLOGIA ADOPTADA PARA A CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ATRAVESSADO PELO TÚNEL SADO-MORGAVEL

Segundo Nieble e Francis (1976), ao caracterizar um meio rochoso, o técnico reúne todas as informações (feições litológicas e estruturais, índices e propriedades físicas em particular) cujo conhecimento é exigido para solucionar uma questão específica. Ao classificar, o profissional colecta apenas as informações definidas como critérios pelo sistema que utiliza. De um modo geral, a quantidade de informações necessárias à solução de um problema supera, de muito, a quantidade requerida para classificar. Aparentemente, não adianta classificar, sendo necessário caracterizar sempre, a fim de atender às necessidades do projectista. No entanto, quando uma classificação é estabelecida, o restante das informações necessárias ao projecto é automaticamente inferido em função da vinculação do meio rochoso (ou de suas partes) a uma determinada classe para a qual as feições litológicas e estruturais, índices e propriedades físicas foram ou serão determinadas cuidadosamente em termos médios, eventualmente com indicação de suas dispersões, com o auxílio de ensaios e/ou de levantamentos detalhados e precisos em amostras representativas.

O que acaba de referir-se é extremamente pertinente no caso de um túnel, cuja extensão impede que, na prática, se proceda a uma caracterização exaustiva do maciço que atravessa.

Por isso, a metodologia seguida para a elaboração do estudo do maciço atravessado pelo túnel do adutor Sado-Morgavel constou basicamente de 2 fases:

- fase de caracterização;
- fase de escolha de critérios e classificação propriamente dita.

4.1 – *Fase de caracterização*

A caracterização é uma operação que evidencia as características previamente desconhecidas do maciço. Objectiva a emergência das características de uma realidade para sua posterior classificação, segundo Francis (1974).

Nesta fase, no túnel Sado-Morgavel, foram levantadas as características referentes ao maciço, às medidas de convergência e aos parâmetros operacionais; também foram colectadas amostras para ensaios laboratoriais. Foi feita igualmente a identificação dos suportes existentes, numa tentativa de correlacionar a eficiência dos mesmos com a qualidade do maciço.

4.1.1 – Caracterização do maciço

As características inerentes ao maciço foram lançadas num mapeamento (cartografia) geotécnico, onde constam as seguintes informações: tipo litológico, grau de alteração, grau de fracturação, famílias de fracturas, condições de ressurgência de água, tipos de instabilidades e outras estruturas e ocorrências geológicas.

– *Tipo litológico*

Durante a fase de caracterização verificou-se que o maciço atravessado pelo túnel era constituído basicamente por filito, com pequenas intercalações de xisto grauvacóide que, no contexto geral, não apresenta expressão significativa.

O termo filito foi sugerido aqui em substituição de xisto, que vinha sendo utilizado até ao momento, porque parece ser mais significativo em termos petrográficos e mais representativo quanto ao comportamento geotécnico.

TABELA 1-CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DO TÚNEL SADO-MORGAVEL (H≤60 m)

Critérios	Classe	B	D	I (e,t)	Sugestões de suporte de 1ª fase
W_2 →	III	B ₃	D ₃	I gi	BM
W_1 { J_3 { S → i → J_2 { S { n ₂ → n ₁ → n ₂ → i { n ₁ → J_1 →	III-II	B ₂	D ₃	I gi	C<1m CH (BM)
	II	B ₂ B ₁	D ₂	I gd	C≥1m CH
	II-I	B ₁	D ₁	I gd	AS CH
	I	B ₁ B ₀	D ₁	I od	AO

Obs: H = Altura de recobrimento

1. Critérios

1.1 - Grau de Alteração (W)

W_2 = A pressão dos dedos esmaga o material. Presença acentuada de componente argiloso, apresentando perdas superiores a 24% no ensaio de desgaste em meio húmido no 1º. ciclo. Pode ser visualizado como sendo um material com pequenos núcleos de rocha envoltos em argila.

W_1 = Resistente ao golpe do martelo de geólogo apresentando indentação ao longo dos planos de foliação quando golpeada com o bico do martelo. Apresenta perdas inferiores a 24% no ensaio de desgaste em meio húmido no 1º. ciclo.

1.2 - Grau de Fracturamento (J)

J_3 = Espaçamento menor que 0,10 m

J_2 = Espaçamento entre 0,25 : 0,10 m

J_1 = Espaçamento maior que 0,25 m

1.3 - Sensibilidade à Água (s/i)

s = Sensível. O material apresenta-se untuoso ao tacto quando imerso em água.

i = Insensível. O material não se apresenta untuoso ao tacto quando imerso em água.

1.4 - Número de Famílias de Fracturas (n)

n_2 = Duas ou mais famílias e fracturas esparsas

n_1 = Uma família e fracturas esparsas

2. Compartimentação do Maciço (B)

B₃ = Blocos infra-centimétricos; B₂ = Blocos centimétricos; B₁ = Blocos decimétricos; B₀ = Blocos decimétricos a métricos.

3. Deslocamentos (D)

D₃ = Grandes (cm); D₂ = Médios (cm a mm);

D₁ = Pequenos (mm).

4. Instabilidade (I)

4.1 - No espaço (e)

g = generalizada; o = ocasional

4.2 - No tempo (t)

i = imediata; d = diferida

5. Sugestões de suporte de 1ª. fase

BM = Betão moldado; C<1 m = Cimbres com afastamento menor que 1 m; CH = Chapas Metálicas; AS = Ancoragem Sistemática; AO = Ancoragem Ocasional; () = Eventualmente.

– Grau de alteração

O grau de alteração normalmente é definido macroscopicamente pelos indícios de alteração física e química dos minerais (cor, brilho) bem como através da resistência ao impacto. No presente caso, o grau de alteração foi definido com base principalmente na resistência ao impacto do martelo de geólogo, devido a dificuldade na observação macroscópica dos indícios de alteração física e química ao nível dos minerais e ao facto de a rocha exibir textura geralmente muito fina, não apresentando variações nítidas na cor, quando alterada.

Definiram-se 3 graus de alteração:

A₁ – rocha sã a praticamente sã: o golpe do martelo quebra-a com dificuldade; porém, pode apresentar uma leve “indentação” ao longo dos planos de foliação, quando golpeada com o bico do martelo.

A₂ – rocha medianamente alterada: o golpe do martelo abre com facilidade planos ao longo da foliação; quando golpeada com o bico do martelo, apresenta “indentação” pronunciada.

A₃ – rocha alterada a extremamente alterada: a pressão dos dedos esmaga facilmente os respectivos fragmentos; normalmente, apresenta-se argilificada.

Com a realização do ensaio de desgaste em meio húmido (*slake durability test*), Gamble (1971), ISRM (1979), verificou-se que a avaliação visual dos graus A₁, A₂ e A₃ poderia ser quantificada. Em princípio, no 1.º ciclo, o grau de alteração A₁ apresenta perdas até 3%, o grau A₂ perdas de 3% a 24% e o grau A₃ perdas superiores a 24%.

– Grau de fracturação

Definiram-se 5 graus de fracturação.

F₁ – espaçamento entre fracturas maior que 0,5 m.

F₂ – espaçamento entre fracturas compreendido entre 0,5 m e 0,25 m.

F₃ – espaçamento entre fracturas compreendido entre 0,25 m e 0,10 m.

F_4 – espaçamento entre fracturas compreendido entre 0,10 e 0,05 m.

F_5 – espaçamento entre fracturas menor que 0,05 m.

O termo espaçamento foi definido como sendo o valor mínimo dos valores médios das distâncias entre fracturas que interceptam uma recta com qualquer direcção.

– Família de fracturas

Uma família de fracturas representa um conjunto de fracturas paralelas ou subparalelas. No mapeamento efectuado, uma família foi representada através da atitude das fracturas em relação ao plano vertical que contém o eixo do túnel, visando assim avaliar a influência da orientação das fracturas na estabilidade da obra.

– Ressurgência de água

As ressurgências de água foram caracterizadas em 3 condições distintas: humidade, pingos e jorros. Em relação a este parâmetro deve ter-se presente que a observação foi feita em período seco (verão), muitos meses após a escavação, devendo-se considerar também que a ressurgência de água pode ir variando à medida que a frente se vai afastando.

– Tipos de instabilidades

Quanto aos tipos de instabilidades, foram observadas as seguintes situações: queda de blocos; deformação dos cimbres e chapas metálicas; desmoronamentos; sobreescavações não preenchidas (vazios).

– Outras estruturas e ocorrências geológicas

Além das características anteriormente citadas, foram observadas outras estruturas e ocorrências capazes de condicionar instabilidades, tais como material expansivo, superfícies de fracturas, foliação, falhas, dobras, veios de quartzo, etc.

4.1.2 – Medidas de convergência

Todas as secções instrumentadas existentes nos troços estudados (cartografados) foram analisadas visando a correlação das grandezas dos deslocamentos observados com as características do maciço. Deve-se realçar que as bases de medição de convergências só puderam ser instaladas a uma distância bastante grande da frente de escavação (várias vezes o diâmetro do túnel), devido ao comprimento e às características das máquinas de perfuração utilizadas. Sendo assim, as medições não conseguem captar os deslocamentos devido ao efeito do afastamento da frente, permitindo apenas o controle do maciço em relação ao efeito tempo.

4.1.3 – Parâmetros operacionais

Foram definidos, como parâmetros operacionais, os valores relativos a:

- velocidade de escavação da máquina, em m/h ou m/dia; este valor foi obtido através da relação entre o comprimento escavado e o tempo realmente trabalhado pela máquina;
- intensidade da corrente do motor de rotação da cabeça de corte da tuneladora (em amperes), obtida directamente dos controlos da máquina;
- pressão dos macacos longitudinais da tuneladora (psi), obtida directamente do manómetro da máquina.

O estudo destes parâmetros tinha como objectivo correlacionar as reacções dos diferentes tipos de maciço às acções das máquinas de escavação.

4.1.4 – Ensaios laboratoriais

Com o objectivo de estudar certos fenómenos que ocorrem no túnel, bem como para avaliar e quantificar determinadas características do maciço, foram efectuados os seguintes ensaios laboratoriais: ensaio de compressão uniaxial; ensaio de desgaste em meio húmido (*slake durability test*); ensaio de expansão; ensaio de pressão de expansão; ensaio de choque térmico; análise mineralógica por difractometria de raios X.

– Ensaio de compressão uniaxial

Com o ensaio de compressão uniaxial pretendeu-se a obtenção de parâmetros geomecânicos, nomeadamente o módulo de elasticidade e a tensão de rotura à compressão simples, em vários graus de alteração do filito. Porém, verificou-se que existia impossibilidade prática na obtenção de amostras adequadas para a preparação de provetes, o que, por sinal, havia sido já observado em trabalhos anteriores do LNEC. A foliação pronunciada do filito impedia que se obtivessem amostras sem fragmentação. Mesmo quando se conseguia retirar blocos inteiros, ocorria fragmentação durante a preparação dos provetes.

– Ensaio de desgaste em meio húmido (slake durability test)

O grau de alteração foi definido de acordo com a avaliação visual, que tem carácter subjectivo. Foi com o intuito de diminuir essa subjectividade, quantificando aquele parâmetro, que se tentou a correlação dos graus de alteração com os resultados do desgaste em meio húmido.

Devido às particularidades da rocha em questão, houve necessidade de introduzir modificações na especificação recomendada pela ISRM (1979). Com efeito, dada a foliação muito pronunciada, não foi possível obter fragmentos aproximadamente esféricos, pelo que se ensaiaram amostras lamelares. Para o material com grau A_3 , foram ensaiadas amostras “tal qual”, isto é, ensaiaram-se fragmentos de rocha juntamente com o material argiloso, tal qual foram colectados no túnel.

Os resultados dos ensaios permitiram concluir que, no 1.º ciclo, o grau de alteração A_1 apresenta perdas até 3%, o grau A_2 perdas entre 3% e 24% e o grau A_3 perdas superiores a 24%.

– Ensaio de expansão e retracção por embebição e secagem

O ensaio tinha como objectivo avaliar a expansão e a retracção e, consequentemente, a deterioração física do maciço provocada pela variação da humidade.

O ensaio consistia em fazer medições em 3 direcções ortogonais, sobre provetes submetidos a ciclos de embebição em água e secagem. Porém,

não se conseguiu obter nenhum resultado satisfatório, porque os provetes partiram-se durante o ensaio, devido à foliação muito acentuada da rocha.

Paralelamente à embebição em água, foram feitos alguns ensaios com embebição em ácido sulfúrico, verificando-se que esta substância provoca notável expansão nas amostras de filito. Em algumas amostras, o volume final chegou a ser de 3 vezes o volume inicial. Esta invulgar expansão provavelmente é devida à transformação mineralógica ocorrida em função da presença do ácido sulfúrico. Este fenómeno poderá ocorrer no maciço atravessado pelo túnel Sado-Morgavel, pois nele há pirrite, que poderá originar águas ácidas.

A eventual importância do fenómeno em apreço justificou aprofundamento de investigação neste domínio; os resultados dos estudos experimentais, actualmente em curso, serão publicados noutra local.

- Ensaio de choque térmico

Este ensaio foi realizado com o objectivo de se avaliar a facilidade de separação em folhetos (esfoliação) que a rocha do túnel apresentava.

O ensaio consiste na saturação do fragmento da rocha, que é em seguida submetido a 700°C durante 15 minutos (Delgado Rodrigues - 1975).

O choque térmico provocou, nas amostras, uma fragmentação muito intensa, com a formação de lamelas milimétricas a submilimétricas, concordantes com a foliação. A intensa fragmentação revela a grande facilidade de separação em folhetos e, conseqüentemente, a susceptibilidade da rocha à deterioração por esfoliação. Em algumas zonas do túnel, a deterioração por esfoliação já é bastante visível, como, por exemplo, nas zonas próximas aos emboquilhamentos.

O aproveitamento das potencialidades do ensaio de choque térmico para o estabelecimento dum índice de qualidade do maciço será objecto de investigações ulteriores.

- Ensaio de tensão de expansão

O ensaio tinha como objectivo a avaliação da tensão de expansão da rocha quando embebida em água. Consistia em controlar, por meio de deflectómetros, a altura da provete imerso em água, evitando a expansão mediante aplicação de cargas.

Foram ensaiados 6 provetes e os valores das tensões obtidas variaram entre 8 e 16 kgf/cm². Importa realçar que os ensaios não foram conduzidos até à estabilização, devido à dificuldade operacional dos equipamentos utilizados.

– Análise mineralógica

A análise mineralógica por difractometria de raios X teve como objectivo principal confirmar a existência de minerais expansivos no filito com grau de alteração A₃. Com efeito, todas as amostras analisadas como sendo A₃ revelaram a presença de montmorilonite e clorite. Portanto, tem interesse considerar sempre a eventual presença de minerais expansivos em materiais com grau de alteração A₃.

4.1.5 – Identificação do suporte existente

Ainda durante a fase de caracterização, foi feita também a identificação dos suportes existentes com a intenção de tentar correlacionar a eficiência dos mesmos com a qualidade do maciço. Basicamente, foram identificados os seguintes tipos de suportes: cimbres metálicos; malhas e chapas metálicas; betão projectado; injeções de cimento; enfilagens de chapas e perfis metálicos; betão moldado.

4.2 – Fase de escolha de critérios

O acto de classificar, segundo Francis (1974), consiste em reordenar a ordem natural das percepções da realidade consoante uma perspectiva fixada aprioristicamente por um princípio, por uma ideia, por um conceito, enfim, por um critério de classificação.

A escolha dos critérios de classificação depende obviamente dos objectivos da mesma, da natureza e da fase da obra e das características geológicas do maciço.

Basicamente um critério deve satisfazer as seguintes exigências:

- ser específico (o critério adoptado deve ter um e apenas um significado em relação ao elemento a classificar);
- acusar variações de nível (dentro de um mesmo critério, devem existir níveis de variação significativos, que permitam distinguir diferentes graus);
- ter simplicidade operacional (o critério adoptado deve ser facilmente avaliável, perceptível, sem ou com um mínimo de utilização de instrumentos ou ensaios).

Além disso, uma classificação deve poder fazer-se à custa duma quantidade reduzida de critérios, para evitar a elaboração de sistemas multivariados, de difícil compreensão. A quantidade de critérios deve ser minimizada mediante selecção de características independentes, condicionadoras do comportamento do maciço em relação à obra a estudar.

4.2.1 – Critérios escolhidos

Os trabalhos de caracterização demonstraram que o maciço, onde está construído o túnel Sado-Morgavel é constituído basicamente por um só tipo litológico (filito), existindo localmente zonas tectonicamente muito perturbadas (esmagadas) e muito alteradas. Em vista deste condicionamento geológico, tornou-se viável classificar inicialmente o maciço em 2 situações distintas:

- maciço rochoso muito perturbado tectonicamente e muito alterado;
- maciço rochoso pouco perturbado tectonicamente e pouco alterado.

Verificou-se que, para o primeiro caso, o comportamento do maciço em relação à abertura do túnel era condicionado pelas baixas características geomecânicas do material (baixa resistência e alta deformabilidade), não sendo as descontinuidades influentes. Para o segundo caso, constatou-se que o comportamento do maciço, em relação à abertura do túnel, era directamente condicionado pelas descontinuidades.

A distinção entre as duas situações pode ser feita através da identificação do grau de alteração, que reflecte directamente as condições de resistência e deformabilidade do material. Assim, o primeiro critério de classificação escolhido foi o grau de alteração.

Se o material apresenta grau de alteração A_3 , está-se na situação em que o comportamento do maciço é condicionado pelas baixas características de resistência e alta deformabilidade. Esta situação foi identificada como sendo pertencente à classe III, que em termos descritivos é a pior classe existente no maciço estudado.

O grau de alteração A_3 , por si só define a classe de maciço III, onde os seguintes fenómenos podem ser observados: grandes deslocamentos plásticos (centimétricos), instabilidade (queda de material) imediata e generalizada, sendo as dimensões dos blocos quase sempre infra-centimétricas.

O grau de alteração A_3 é tão condicionador do comportamento do maciço que ele sobrepuja todos os outros critérios para a definição de uma classe.

Em termos geológicos, a classe de maciço III corresponde a uma zona tectonicamente muito perturbada (esmagada) e consequentemente muito alterada. Como o eixo do túnel está orientado quase sempre obliquamente em relação às estruturas geológicas, a extensão destas zonas é limitada, não ultrapassando 2 dezenas de metros em cada ocorrência.

Se o maciço apresenta grau de alteração distinto de A_3 (pondo então ser A_1 ou A_2) está-se na situação em que o respectivo comportamento é condicionado pelas descontinuidades, tornando-se possível distinguir mais de uma classe, conforme as características dessas descontinuidades. Para esta situação foram escolhidas, como critérios de classificação, as seguintes características, por ordem de prioridade:

- grau de fracturação
- sensibilidade à água
- número de famílias de fracturas.

A noção de grau de fracturação já foi abordada no item relativo à caracterização. Frisa-se no entanto que a escolha dos valores dos espaçamentos foi condicionada pelas dimensões da obra.

A sensibilidade à água é um critério que pretende avaliar a reacção do maciço à presença da mesma. No caso em apreço, a sensibilidade foi avaliada em função da presença ou ausência de componente argiloso na rocha, sendo o maciço designado por sensível (s) quando da presença e por insensível (i) quando da ausência de tal componente. A distinção entre as duas situações foi feita pela untuosidade da rocha quando imersa em água (untuoso = sensível; não untuoso = insensível).

A sensibilidade à água é um critério que fornece informações quanto ao ângulo de atrito entre as superfícies de fracturas e que permite avaliar a expansibilidade do maciço, tendo em vista que a argila encontrada no túnel revela quase sempre a presença de montmorilonite.

O número de famílias de fracturas é o número dos conjuntos de fracturas subparalelas e revela a facilidade com que os blocos se podem desprender do maciço. O símbolo n_2 representa duas ou mais famílias e fracturas esparsas, e o símbolo n_1 representa uma família e fracturas esparsas.

Para a definição das classes de maciço em que o comportamento é condicionado pelas descontinuidades, nem sempre é necessário utilizar os três critérios conjuntamente (grau de fracturação, sensibilidade à água e número de famílias de fracturas). Por exemplo, se o grau de fracturação é F_1 ou F_2 , este critério por si só define a classe de maciço, que é I; os outros critérios são sobrepujados, isto é, a variação dos outros critérios não condiciona directamente variações no comportamento em causa. Da mesma forma, quando o grau de fracturação é F_4 ou F_5 , a sensibilidade à água é que define se a classe é II ou III-II, sendo que o outro critério (número de famílias de fracturas) é sobrepujado pelos precedentes, pois é quase sempre n_2 , não apresentando variação de nível. Somente quando o grau de fracturação é F_3 se justifica a utilização dos três critérios conjuntamente.

5 – METODOLOGIA ADOPTADA E CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA

Durante a fase de escolha de critérios, verificou-se que o grau de alteração, que havia sido definido, na fase de caracterização, em 3 níveis distintos, poderia ser reduzido a apenas 2 níveis, sem que com isso fosse prejudicada a precisão da classificação. Com efeito, a classificação utiliza o grau A_3 individualmente e os graus A_2 e A_1 conjuntamente, como se pertencessem a apenas um grau. Portanto, para a classificação proposta é suficiente ter-se apenas 2 níveis no critério de alteração, podendo-se denominar W_2 o grau A_3 e W_1 o conjunto dos graus A_2 e A_1 .

Em relação ao grau de fracturação, também não há necessidade de se utilizarem 5 graus, pois os graus F_5 e F_4 , bem como os graus F_2 e F_1 são utilizados conjuntamente; só o grau F_3 é utilizado individualmente. Sendo assim, basta definir 3 níveis para o critério de fracturação podendo-se denominar J_3 o conjunto dos graus F_5 e F_4 , J_2 o grau F_3 e J_1 o conjunto dos graus F_2 e F_1 .

Deve-se realçar portanto que, para a classificação proposta, basta utilizar 2 níveis para o critério da alteração e 3 níveis para o critério de fracturação. Em relação aos critérios da sensibilidade à água e do número de famílias de fracturas, são necessários também apenas 2 níveis.

Em síntese, a metodologia de classificação que se afigura como a mais prática para o túnel Sado-Morgavel é a seguinte:

1.º – Identificar o grau de alteração. Verificar se só com este critério é possível chegar a uma classe (classe III). Se não for possível:

2.º – Identificar o grau de fracturação. Verificar se só com mais este critério é possível chegar a uma classe (classe I). Se não for possível:

3.º – Identificar a sensibilidade à água. Verificar se só com mais este critério é possível chegar a uma classe (classe III-II ou II). Se não for possível:

4.º – Identificar o número de famílias de fracturas que, juntamente com os critérios anteriores, permite distinguir as classes II, II-I e I.

A Tabela I apresenta esta metodologia e a classificação proposta, relacionando ainda a compartimentação do maciço, os deslocamentos e os tipos de instabilidade (queda de material), no tempo e no espaço, mais característicos de cada classe de maciço, os quais permitem, por sua vez, fazer sugestões quanto ao suporte de 1.ª fase a instalar.

Em relação à compartimentação, é feita uma avaliação do diâmetro médio dos blocos que podem desprender-se do maciço, sendo denominados B_3 os blocos infra-centimétricos, B_2 os centimétricos, B_1 os decimétricos e B_0 os blocos entre decimétricos e métricos.

Os deslocamentos referem-se aos que podem ocorrer imediatamente a seguir à escavação, não sendo aqui considerados os que resultam da interacção maciço-suporte nem os devidos à liberação de tensões naturais importantes. Os deslocamentos grandes (supra-centimétricos) ocorrem geralmente devido ao comportamento plástico do material, enquanto que os deslocamentos médios (centimétricos a milimétricos) e pequenos (infra-milimétricos) são consequência da descompressão do maciço.

Em relação à instabilidade (queda do material) é feita uma análise quanto ao tempo e quanto ao espaço. Em relação ao espaço, distinguem-se duas situações: generalizada e ocasional. Entende-se por generalizada a instabilidade que ocorre sistematicamente numa secção, e por ocasional aquela em que a queda é pontual (localizada). Em relação ao tempo, distinguem-se também duas situações: imediata e diferida. A situação imediata é aquela em que ocorre instabilidade

concomitantemente com a escavação, enquanto que a diferida é aquela em que é necessário decorrer um certo intervalo de tempo para que tenha lugar a queda dos materiais.

Quanto ao suporte de 1.^a fase, a escolha do tipo mais adequado foi efectuada analisando a eficiência do suporte existente em relação à classe do maciço. Assim verificou-se, por exemplo, que na classe de maciço III a utilização de chapas e cimbres metálicos com afastamento médio de 1,00 m não apresentava resultados satisfatórios, pois quase sempre ocorriam grandes deformações, sendo necessário muitas vezes efectuar reescavações na secção para aplicação de betão moldado. Por outro lado, verificou-se que, na classe de maciço I, não era necessária a utilização de suporte de 1.^a fase de forma sistemática, sendo suficiente a utilização de ancoragens ocasionais, pois centenas de metros do túnel abertos neste tipo de maciço não possuem nenhum suporte e não apresentam problemas.

A análise pormenorizada do suporte existente em cada classe de maciço permitiu, assim, a elaboração das seguintes sugestões:

- classe de maciço III: betão moldado;
- classe de maciço III-II: cimbres com afastamento menor que 1 m e chapas metálicas entre os mesmos; as deformações anormais nesta classe de maciço podem ser combatidas com a colocação parcial de betão moldado, isto é, só nos pés-direitos;
- classe de maciço II: cimbres com afastamento entre 1 m e 2 m, juntamente com chapas metálicas; a utilização de telas metálicas não é adequada, principalmente quando o fracturamento é J_3 , pois há queda de material através das malhas;
- classe de maciço II-I: ancoragem sistemática juntamente com chapas metálicas;
- classe de maciço I: ancoragem ocasional.

A ancoragem referida aqui tem a finalidade de solidarizar blocos (pregagem), não sendo necessária a aplicação de pré-tensão.

É importante referir que o betão projectado não foi sugerido como suporte de 1.^a fase em nenhuma das classes de maciço. Isto deve-se ao facto de o betão projectado existente actualmente no túnel apresentar-se, em muitos locais, bastante partido e sem aderência ao maciço, o que o torna inadequado para exercer função resistente. Este comportamento do betão projectado pode ser devido à existência de material expansivo no maciço e, ainda, à agressividade das águas.

6 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA

A classificação proposta apresenta 5 classes, sendo que as classes III, II e I exibem comportamentos muito distintos entre si, enquanto que as classes III-II e II-I apresentam comportamentos intermediários entre os das referidas classes. Apesar deste facto, é aconselhável a adopção de 5 classes pois a consideração de somente 3 classes corresponderia a admitir apenas 3 soluções para o suporte, o que certamente oneraria desnecessariamente o custo da obra.

A classe de maciço III é definida pelas características da rocha e a classe I pelas características das descontinuidades do maciço; as classes restantes são definidas pela conjugação das duas espécies de características.

Certas características do maciço, que são comumente utilizadas como critérios em várias classificações existentes, não foram escolhidas como tais no presente caso, podendo-se citar como exemplos o R. Q. D., a orientação das fracturas, o tipo das superfícies de fractura e a ressurgência de água.

O R. Q. D. é um índice, definido a partir da análise de tarolos de sondagens, que conduz a bons resultados quando aplicado em rochas que não apresentam estratificação nem xistosidade nítidas. A aplicação do conceito de R. Q. D. em superfícies expostas, em vez de tarolos de sondagens, apresenta menos precisão para a visualização da fracturação do que o conceito de espaçamento de fracturas. Certas classificações utilizam o R. Q. D. e o espaçamento de fracturas conjuntamente, mas tal prática pode não conduzir a resultados adequados pois a mesma variável (fracturação) estaria redundantemente a ser avaliada por dois parâmetros.

A orientação das fracturas não foi escolhida como critério de classificação porque se verificou que esta característica era sobrepujada pelo critério do número de famílias de fracturas.

Na prática, a orientação de uma família de fracturas, por si só, não condiciona a queda de blocos; quer isto dizer que é necessário ter-se uma intersecção de fracturas para ocorrerem instabilidades. Portanto, parece mais significativo considerar prioritariamente o número de famílias de fracturas como um dos condicionantes de quedas de blocos.

Deve-se considerar também o efeito de escala em relação à orientação das fracturas pois, geralmente, a mesma orientação pode provocar situações desfavoráveis numa parte da secção do túnel (onde as fracturas mergulham

para a escavação) e situações não desfavoráveis na outra parte (onde as fracturas mergulham para o maciço. Porém, numa secção com 10 m² de área, como a do túnel Sado-Morgavel, não se justifica identificar uma zona desfavorável, pois se existir tal situação é mais prático tratar toda a secção. Exceptua-se o caso da classe I, cujo tratamento pode ser ocasional e localizado.

O tipo das superfícies de fractura (rugosidade) não foi considerado directamente como critério pois, no maciço interessado pelo túnel, geralmente as superfícies são planas e lisas, não apresentando variações muito nítidas e facilmente avaliáveis. Importa referir, mais uma vez, que a rugosidade das fracturas também deve ser vista em função da escala da obra. A presença de argila como material de preenchimento das fracturas foi avaliada indirectamente, pelo critério da sensibilidade à água.

A ressurgência de água também não foi considerada como critério porque é uma característica que varia sazonalmente e avalia apenas o caudal que atravessa o maciço. Numa situação como a do túnel Sado-Morgavel, pode-se supor que, em condições desfavoráveis (períodos de chuva), haverá sempre influência de águas subterrâneas (água de infiltração ou proveniente de nível freático) no comportamento do maciço. Nestas condições, é mais válido avaliar as reacções do maciço à presença da água, através de uma característica como a sensibilidade, do que avaliar simplesmente o caudal efluente.

Convém realçar também que certas classificações utilizam o sistema de atribuição de pesos aos parâmetros. Tal artifício não foi adoptado, no presente caso, pois julgou-se que a ponderação dos índices era extremamente subjectiva.

Em relação à correlação entre parâmetros operacionais e as classes do maciço, pode-se dizer que não foram obtidos resultados conclusivos. A fenomenologia do arranque de rochas por máquinas de escavação é bastante complexa, sendo necessário um estudo mais minucioso sobre a interacção máquina-maciço para se chegar a conclusões de interesse.

Quanto à comparação entre as medidas de convergência e as classes do maciço, verificou-se que os deslocamentos anómalos concentram-se nas classes II, III-II e III, enquanto que nas classes I e II-I quase não se registaram valores significativos; tal indica que os deslocamentos estão directamente relacionados com as classes do maciço.

Pode-se dizer que, após aplicação dum suporte de 1.^a fase considerado suficiente, na classe III já se registaram valores de deslocamento da ordem

de 40 mm, sendo comuns deslocamentos acima de 10 mm, enquanto que na classe II os maiores deslocamentos são da ordem de 4 a 8 mm e, na classe I, não chegam a ultrapassar 4 mm após 1 ano de observação.

Finalmente, em relação à classificação proposta, deve-se frisar que a sua aplicação está, em princípio, limitada aos troços em que a cobertura não ultrapassa 60 m (cobertura máxima atingida até ao momento). Em troços com cobertura superior a 60 m será necessário fazer observações quanto à actuação de tensões naturais (libertação de tensões instaladas no maciço). Se a influência de tais tensões for comprovada a classificação deverá ser adaptada, introduzindo-se outros critérios.

7 – CONCLUSÕES

A classificação proposta (Tabela 1) resultou da observação do comportamento do maciço em cerca de 7,5 km de túnel já escavados; os critérios de classificação escolhidos são em número reduzido e de fácil avaliação, mas condicionadores de instabilidades.

As sugestões de suporte de 1.^a fase foram dadas de acordo com a eficiência dos suportes já existentes para cada classe de maciço.

A classificação proposta é, portanto, uma classificação essencialmente baseada na observação. A partir dela certos parâmetros, como por exemplo a carga exercida pelo maciço (importante para o dimensionamento do revestimento) não podem ser deduzidos; julgou-se, de resto, que não se deveria dar à classificação um significado maior do que o que pode ser contido numa classificação geotécnica

Assim, para o dimensionamento do revestimento definitivo do túnel, parece recomendável a preparação de troços experimentais, devidamente instrumentados para observação, podendo-se, então, obter elementos sobre os esforços exercidos pelo terreno e as tensões instaladas no revestimento.

A aplicação da classificação proposta a outros tipos de maciços (não filitosos), certamente não conduzirá a resultados satisfatórios, pois ela é muito específica. Porém, a metodologia de estudo, desenvolvida para a definição da classificação, poderá ser utilizada em qualquer tipo de maciço e para qualquer tipo de obra, visto possuir um carácter universal.

AGRADECIMENTOS:

Agradecemos ao Senhor Professor Fernando de Mello Mendes, que orientou e apoiou a realização deste estudo; ao Gabinete da Área de Sines, que autorizou a publicação dos resultados; à Águasines, empresa construtora do túnel, que apoiou e facilitou os trabalhos de campo; ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S. Paulo (Brasil) que incentivaram a elaboração deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIATION FRANÇAISE DES TRAVAUX EN SOUTERRAIN (AFTES) – *Texte provisoire et recommandations relatives au choix d'un type de soutènement en galerie, Tunnels et Ouvrages Souterrains*, Lyon, n.º 1, Jan-Fev 1974, p. 31-34.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, L. – *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*, Rock Mechanics, Wien, vol. 6, n.º 4, 1974, p. 189-236.
- BIENIAWSKI, Z. T. – *Engineering classification of jointed masses*. Trans. S. Afr. Inst. Civil Engineers, Johannesburg, vol. 15, n.º 12, 1973, p. 335-344.
- BIENIAWSKI, Z. T. – *Rock mass classification in rock engineering*. Proc. of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Nov. 1976, p. 97-106.
- CECIL, O. S. – *Correlations of rock bolt-shotcrete support and rock quality parameters in scandinavian tunnels*. Swedish Geotechnical Institute, proc. n.º 27, Stockholm, 1975.
- CORDING, E. J.; MAHAR, J. W. – *The effect of natural geologic discontinuities on behavior of rock in tunnels*. Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference, S. Francisco, vol. 1, 1974, p. 107-138.
- DELGADO RODRIGUES, J. – *Alterabilidade de rochas em problemas de geologia de engenharia*. LNEC Proc. 54/13/2654. Lisboa, 1975.
- FRANCIS, F. O. – *Classificação geotecnológica*, Geotecnia, Lisboa, n.º 9 Fev-Mar 1974, p. 59-76 e n.º 10, Jun-Jul 1974, p. 5-25.
- GAMBLE, J. C. – *Durability-plasticity. Classification of shales and other argillaceous rocks*, PhD. Thesis, University of Illinois, Urbana, 1971.
- GABINETE DA ÁREA DE SINES – *Túnel de S. Domingos-Morgavel, contribuição para o conhecimento geológico-geotécnico*, Relatório n.º 32/78, 1978.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (ISRM) – *Suggested methods for determining water contents, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Oxford, vol. 16, 1979, p. 141-156.

- LAUFFER, H. - *Gebirgsklassiferung für den stollenbau*. Geologie und Bauwesen, vol. 24, 1958, p. 46-51. Classificação de maciços rochosos para construção de túneis. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Tradução n.º 597, 1975.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - *Observação do túnel Sado-Morgavel*. Proc. 47/1/6119, 1979.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - *Execução de escavações em maciços rochosos* - Curso 519, 1980.
- LOUIS, C. - *Reconnaissance des massifs par sondages et classifications geotechniques des roches*. Annales: Soils et Fondations, Paris, vol. 18, Aug. 1974, p. 97-122.
- MELLO MENDES, F. - *Comportamento mecânico de rochas xistosas*. Porto. Imprensa Portuguesa, 1960.
- MELLO MENDES, F. - *Mecânica das rochas*. Lisboa. Edição da Sec. Folhas da A. E. I. S. T. 1967-1968.
- NIEBLE, C. M.; FRANCIS, F. O. - *Classificação de maciços rochosos*. Anais do Primeiro Congresso de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, vol. 2, 1976, p. 379-411.
- NIEBLE, C. M.; TAKAHASHI, J.; DE CORNIDES, A. T. - *Behavior of shallow tunnels in weathered and sound metamorphic rocks*. Proc. Fourth Congress of the ISRM, Montreux, vol 2, sept. 1979, p. 479-484.
- PACHER, F.; RABCEWICZ, L.; GOSLER, J. - *Zum derseitigen stand der gebirgskallsifizierung in stollen- und tunnelbau*. Proc. XXII. Salsburg Geomechanik Colloquium, Strassenforschung Heft 18, Viena, 1974, p. 51-58.
- ROCHA, M. - *Estruturas subterrâneas*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1976.
- TERZAGHI, K. - *Rock defects and loads on tunnel supports*. Rock Tunnelling with Steel Supports. Proctor, R. V. and White, T., Commercial Shearing Co., Youngstown, 1946, p. 15-99.
- TOGNON, A. A.; MANGOLIM FILHO, A.; SANTOS, M. T. M. - *Metodologia para a caracterização geotécnica de maciços basálticos em túneis viários*. Anais do Primeiro Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, vol. 2, 1976, p. 453-472.
- WICKHAM, G. E.; TIEDEMANN, H. R.; SKINNER, E. H. - *Ground support prediction model*. Proc. 1st Rapid Transit and Tunnelling Conference, AIME, New York, 1972, p. 43-64.