

# **AVALIAÇÃO DO RISCO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS EXTENSOS EM MACIÇOS ROCHOSOS**

**PEDRO FILIPE MOREIRA BARBOSA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professor Doutor António Campos e Matos

JULHO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais

*Conte-me e eu vou esquecer. Mostre-me e eu vou lembrar. Envolve-me, e eu vou entender.*

*Confúcio*



## **AGRADECIMENTOS**

O meu primeiro agradecimento vai para a minha família que me apoiou incondicionalmente durante toda a minha vida e de forma muito especial na elaboração desta tese, a vocês muito obrigado.

Agradeço ao professor António Campos e Matos pela colaboração, disponibilidade e pelos contactos estabelecidos durante a elaboração desta tese, aproveitando assim também para agradecer ao Dr. Johannes Kleberger que me ajudou de forma fundamental na abordagem inicial ao tema tratado.

Agradeço a toda a secção de geotecnia da FEUP pelo apoio prestado e em especial aos meus colegas de curso que pela sua competência e simpatia contribuíram de forma indirecta mas decisiva na elaboração deste documento.

Por fim, mas não por último agradeço a Ana Araújo pelo apoio, motivação e força que me transmitiu nos momentos mais difíceis.



## RESUMO

Actualmente, desenvolvem-se em Portugal e no estrangeiro, projectos de túneis rodoviários e ferroviários de grande envergadura. Em Portugal, foi recentemente adjudicada a obra para o túnel rodoviário do Marão, o túnel rodoviário sob a Serra da Estrela começa a ser debatido na comunidade científica, e é prevista a execução de túneis ferroviários na futura linha de alta velocidade. Em Espanha, a rede ferroviária de alta velocidade implicou a execução de túneis extensos, como o túnel de Guadarrama e o túnel de Abdalajis, onde está envolvida na construção uma grande empresa de engenharia civil Portuguesa.

Nesta tese apresentam-se as metodologias construtivas e equipamentos mais adequados, na actualidade, para a escavação de túneis em maciços rochosos. Estes métodos enquadram-se em dois grandes grupos, o primeiro engloba os métodos associados a metodologia construtiva do Novo Método de Túneis Austríaco (NATM), que inclui a escavação com recurso a explosivos (D-B) e roçadoras, o segundo grupo engloba a escavação com tuneladoras (TBM).

Estes métodos construtivos são analisados de acordo com uma:

- Análise financeira
- Análise comparativa
- Análise de risco

Na análise financeira apresentam-se metodologias para a previsão do desempenho dos diferentes métodos de escavação. Através da velocidade de avanço e números de frentes de escavação é possível estimar o tempo de construção do túnel, factor muito relevante na selecção do método construtivo. Isto porque, uma redução do tempo de escavação resulta, geralmente, numa redução importante dos custos da obra. Os métodos de previsão para a escavação com tuneladoras apresentados são: o Norwegian Institute of Technology (NTH), o Colorado School of Mines (CSM) e o modelo proposto por Barton et al.,  $Q_{TBM}$ .

Na análise comparativa os métodos construtivos são analisados, sendo as suas principais vantagens, desvantagens e limitações identificadas, para determinar em que condições a sua aplicação é mais vantajosa.

Na análise de risco estabelecem-se um conjunto de práticas, regras e responsabilidades para a gestão eficaz do risco na concepção e construção de túneis, sendo também identificados os principais riscos associados a cada método construtivo.

As análises de risco durante a fase de exploração/operação são consideradas actualmente como fundamentais, não só por interferirem na fase de concepção da obra, como forma passiva e activa da redução do risco, mas também na própria segurança durante a fase de exploração. Os sistemas de segurança para túneis rodoviários extensos são definidos pela análise dos requisitos de segurança nacionais (decreto-lei 75/2006) e de outros países, com uma vasta experiência na utilização deste tipo de estruturas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Túneis, Análise de risco, NTH, CSM, Sistemas de segurança.



## **ABSTRACT**

Nowadays, there are being developed in Portugal and abroad major road and railway tunnel projects. In Portugal, the construction of the road tunnel in Marão is due to start, the debate around the road tunnel under Serra da Estrela is now beginning and it is foreseen that in the future high speed railway line there will be the need to build large railway tunnels. In Spain, the high speed railway line implied the construction of major tunnels, like the tunnel in Guadarrama and Abdalajis, where a major Portuguese civil engineering company is involved in the construction..

In this thesis, there are presented the construction methods and the equipments more fitted, nowadays, for the excavation of tunnels in rock. These construction methods are divided in two large groups, the first one includes the excavation with explosives (D-B) and roadheaders, normally associated with the New Austrian Tunnelling Method (NATM) and the second group includes mechanical excavation with Tunnel Boring Machines (TBM).

These competitive tunnelling methods are analysed according to a:

- Financial analysis
- Comparative analysis
- Risk analysis

In the financial analysis there are presented different methodologies for the performance assessment of the different tunnelling techniques. If the advance rate and number of work fronts are know it is possible to estimate the tunnel construction period, which is a very important factor in the selection of the construction technique because a reduction in construction time normally results in an important reduction of the cost. The performance assessment methods for the excavation with TBM presented include: the Norwegian Institute of Technology (NTH), the Colorado School of Mines (CSM) and the model proposed by Barton et al.,  $Q_{TBM}$ .

The different tunnelling techniques are comparatively analysed, identifying its principal advantages, disadvantages and limitations in order to establish the most appropriate conditions for the application of each tunnelling method.

In the risk analysis there are established a set of good practices, rules and responsibilities for the risk management during the conception and tunnel construction. There are also identified the major risks associated with the different tunnelling techniques.

The risk analysis during the exploration/operation of the tunnel are considered nowadays crucial, not only for interfering with the conception of the tunnel, as a passive and active way of risk reduction, but also in the safety of the tunnel exploration. The safety systems requirements for long road tunnels are defined in the Portuguese legislation (decreto-lei 75/2006), and complemented by the analysis of the safety systems requirements of other countries, with larger experience in this kind of structures.

**KEYWORDS:** Tunnels, Risk analysis, NTH, CSM, Safety systems.



## ÍNDICE GERAL

|                                                                      |               |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                                          | <b>i</b>      |
| <b>RESUMO .....</b>                                                  | <b>iii</b>    |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                | <b>v</b>      |
| <br><b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <br><b>1</b>  |
| 1.1 OBJECTIVOS .....                                                 | 1             |
| 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                      | 1             |
| <br><b>2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS .....</b>                             | <br><b>3</b>  |
| 2.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS EM MACIÇOS ROCHOSOS .....                   | 3             |
| 2.2 MÉTODOS CONSTRUTIVOS CONVENCIONAIS .....                         | 4             |
| 2.2.1 ESCAVAÇÃO COM EXPLOSIVOS .....                                 | 4             |
| 2.2.2 ESCAVAÇÃO COM ROÇADORAS .....                                  | 5             |
| 2.2.3 ESCAVAÇÃO MISTA .....                                          | 6             |
| 2.3 NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD (NATM) .....                       | 7             |
| 2.3.1 PRINCÍPIOS DO MÉTODO .....                                     | 7             |
| 2.3.2 INSTRUMENTAÇÃO .....                                           | 10            |
| 2.3.3 INFLUÊNCIA DA ÁGUA NO TÚNEL .....                              | 11            |
| 2.3.4 PROCESSO CONSTRUTIVO .....                                     | 12            |
| 2.3.5 PROBLEMAS NA ESCAVAÇÃO .....                                   | 14            |
| 2.4 ESCAVAÇÃO MECÂNICA COM TUNELADORAS .....                         | 17            |
| 2.4.1 TIPOS DE TUNELADORAS .....                                     | 17            |
| 2.4.2 TUNELADORA SEM ESCUDO (GRIPPER TBM) .....                      | 19            |
| 2.4.3 TUNELADORA DE ESCUDO SIMPLES (SINGLE SHIELDED TBM) .....       | 20            |
| 2.4.4 TUNELADORA DE ESCUDO DUPLO (DOUBLE SHIELDED TBM) .....         | 22            |
| 2.4.5 RISCOS ESPECÍFICOS ASSOCIADOS AS TBM EM MACIÇOS ROCHOSOS ..... | 23            |
| 2.4.6 PROBLEMAS NA ESCAVAÇÃO .....                                   | 23            |
| <br><b>3. ANÁLISE FINANCEIRA .....</b>                               | <br><b>27</b> |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1 PREVISÃO DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO .....</b>             | <b>27</b> |
| 3.1.1 ROÇADORAS .....                                                        | 27        |
| 3.1.2 ESCAVAÇÃO COM RECURSO A EXPLOSIVOS .....                               | 31        |
| 3.1.3 ESCAVAÇÃO COM RECURSO A TUNELADORAS .....                              | 33        |
| 3.1.3.1 Norwegian Institute of Technology .....                              | 34        |
| 3.1.3.2 Colorado School of Mines .....                                       | 44        |
| 3.1.3.3 Modelo de Barton .....                                               | 51        |
| <b>3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS .....</b>                | <b>53</b> |
| 3.2.1 VELOCIDADES DE AVANÇO .....                                            | 54        |
| 3.2.2 ESCAVAÇÃO CONTÍNUA .....                                               | 54        |
| 3.2.3 PERTURBAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO E INSTALAÇÃO DO SUPORTE .....            | 55        |
| 3.2.4 SAÚDE E SEGURANÇA .....                                                | 55        |
| 3.2.5 SECÇÕES TRANSVERSAIS .....                                             | 56        |
| 3.2.6 MAIOR TEMPO DE MOBILIZAÇÃO INICIAL .....                               | 57        |
| 3.2.7 ADAPTABILIDADE A NOVAS CONDIÇÕES GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS .....          | 58        |
| 3.2.8 MAIOR INVESTIMENTO INICIAL / DISPONIBILIDADE FINANCEIRA .....          | 58        |
| 3.2.9 NÚMERO DE FRENTES DE ESCAVAÇÃO .....                                   | 59        |
| <b>4. ANÁLISE DE RISCO .....</b>                                             | <b>61</b> |
| <b>4.1 GESTÃO DOS RISCOS .....</b>                                           | <b>61</b> |
| 4.1.1 FASE INICIAL DO PROJECTO .....                                         | 63        |
| 4.1.1.1 Política de riscos .....                                             | 63        |
| 4.1.1.2 Gestão dos riscos na fase inicial do projecto .....                  | 63        |
| 4.1.2 AVALIAÇÃO DAS PROPOSTAS E NEGOCIAÇÕES CONTRATUAIS .....                | 68        |
| 4.1.2.1 Gestão do risco na elaboração do concurso .....                      | 68        |
| 4.1.2.2 Gestão do risco na avaliação e selecção das propostas .....          | 70        |
| 4.1.2.3 Caso do Metro de Copenhaga .....                                     | 71        |
| 4.1.2.4 Gestão do risco na elaboração do contrato .....                      | 72        |
| 4.1.3 CONSTRUÇÃO .....                                                       | 72        |
| 4.1.3.1 Gestão do risco por parte do empreiteiro durante a construção .....  | 72        |
| 4.1.3.2 Gestão do risco por parte do dono de obra durante a construção ..... | 73        |

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. SISTEMAS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS EXTENSOS .....</b> | <b>75</b> |
| <b>5.1 SISTEMAS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS EXTENSOS .....</b>            | <b>75</b> |
| <b>5.2 ENTIDADES DE SEGURANÇA .....</b>                              | <b>76</b> |
| 5.2.1 AUTORIDADE ADMINISTRATIVA .....                                | 76        |
| 5.2.2 GESTOR DO TÚNEL .....                                          | 76        |
| 5.2.3 ENTIDADE INSPECTORA.....                                       | 77        |
| 5.2.4 AGENTE DE SEGURANÇA.....                                       | 77        |
| 5.2.5 SERVIÇOS DE EMERGÊNCIA .....                                   | 77        |
| <b>5.3 EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA .....</b>                           | <b>77</b> |
| 5.3.1 INSTALAÇÕES DE SEGURANÇA.....                                  | 80        |
| 5.3.1.1 Saídas de Emergência.....                                    | 80        |
| 5.3.1.2 Áreas de Paragem de Emergência .....                         | 81        |
| 5.3.1.3 Acesso dos Serviços de Emergência .....                      | 81        |
| 5.3.1.4 Galerias de inversão .....                                   | 81        |
| 5.3.1.5 Postos de Emergência .....                                   | 82        |
| 5.3.1.6 Alimentação de água.....                                     | 82        |
| 5.3.1.7 Alimentação de energia de emergência .....                   | 82        |
| 5.3.2 ILUMINAÇÃO .....                                               | 82        |
| 5.3.2.1 Iluminação Natural.....                                      | 82        |
| 5.3.2.2 Iluminação de Segurança .....                                | 83        |
| 5.3.2.3 Iluminação de Evacuação.....                                 | 83        |
| 5.3.2.4 Aspecto Geral do Túnel .....                                 | 83        |
| 5.3.3 SISTEMAS DE VENTILAÇÃO .....                                   | 84        |
| 5.3.3.1 Ventilação Natural .....                                     | 84        |
| 5.3.3.2 Ventilação Mecânica Longitudinal.....                        | 84        |
| 5.3.3.3 Ventilação Mecânica Transversal e Semi-Transversal .....     | 85        |
| 5.3.4 SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLO .....                           | 85        |
| 5.3.4.1 Centro de controlo .....                                     | 85        |
| 5.3.4.2 Sistemas de Vigilância .....                                 | 85        |
| 5.3.4.3 Equipamentos de encerramento do túnel.....                   | 86        |
| 5.3.4.4 Equipamentos de encerramento parcial do túnel .....          | 87        |

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.4.5 Sistemas de comunicação.....                  | 87        |
| 5.3.4.6 Sistemas eléctricos de medição e comando..... | 88        |
| <b>5.4 SINALIZAÇÃO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS .....</b>    | <b>88</b> |
| <b>6. CONCLUSÕES .....</b>                            | <b>91</b> |
| <b>6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....</b>                | <b>91</b> |
| 6.1.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS .....                      | 91        |
| 6.1.2 ANÁLISE FINANCEIRA .....                        | 91        |
| 6.1.3 ANÁLISE DE RISCO .....                          | 92        |
| 6.1.4 SISTEMAS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS EXTENSOS .....  | 92        |
| <b>6.2 CONCLUSÕES FINAIS.....</b>                     | <b>92</b> |
| <b>6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>             | <b>93</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                              | <b>95</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 2.1 – Escavação com recurso a TBM e a D-B, adaptado de Gotthard Das Projekt [1].....                                            | 3  |
| Fig. 2.2 – “Jumbo” durante o processo de furação para a instalação de explosivos [2] .....                                           | 4  |
| Fig. 2.3 – Esquema de utilização de explosivos [3].....                                                                              | 5  |
| Fig. 2.4 – Roçadora e equipa afecta ao equipamento [4] .....                                                                         | 6  |
| Fig. 2.5 – Intervalos de viabilidade para escavação de maciços rochosos utilizando D-B e roçadoras, adaptado de Girmscheid [5] ..... | 6  |
| Fig. 2.6 – Tipos de suporte utilizados nos métodos convencionais, adaptado de Hoek [9].....                                          | 8  |
| Fig. 2.7 – Curva de resposta do terreno (Fenner&Packer), adaptado de Karakus [6] .....                                               | 9  |
| Fig. 2.8 – Equipamento utilizado na medição dos deslocamentos, forças e tensões (NATM) [7] .....                                     | 10 |
| Fig. 2.9 – Camadas constituintes do túnel, adaptado de Hoek [9].....                                                                 | 11 |
| Fig. 2.10 – Escavação do túnel com uma roçadora [7].....                                                                             | 12 |
| Fig. 2.11 – Aplicação da camada de betão projectado com malhasol [7] .....                                                           | 13 |
| Fig. 2.12 – Observação das deformações do túnel [7] .....                                                                            | 13 |
| Fig. 2.13 – Aplicação do suporte secundário ou definitivo [7] .....                                                                  | 14 |
| Fig. 2.14 – Tuneladora sem escudo, adaptado de Herrenknecht [14].....                                                                | 19 |
| Fig. 2.15 – Extracção dos produtos de escavação [15] .....                                                                           | 19 |
| Fig. 2.16 – Movimento dos apoios radiais e barras de suporte para avanço da tuneladora [15] .....                                    | 20 |
| Fig. 2.17 – Tuneladora de escudo simples [16].....                                                                                   | 21 |
| Fig. 2.18 – Cilindros hidráulicos de impulsão da cabeça de corte [17].....                                                           | 21 |
| Fig. 2.19 – Tuneladora de escudo duplo [19] .....                                                                                    | 22 |
| Fig. 2.20 – Problemas na escavação com tuneladoras devido a condicionantes geotécnicas [1] .....                                     | 23 |
| Fig. 2.21 – Grau de magnitude da convergência radial do túnel, adaptado de Hoek [9] .....                                            | 24 |
| Fig. 3.1 – Relação entre a energia específica e a capacidade de corte instantânea [21].....                                          | 29 |
| Fig. 3.2 – Resultados obtidos num ensaio de corte de larga escala [21] .....                                                         | 30 |
| Fig. 3.3 – Distribuição das actividades na escavação com recurso a roçadoras [22] .....                                              | 31 |
| Fig. 3.4 – Distribuição temporal das actividades, adaptado do Hallandsridge Tunnel project [10] .....                                | 32 |
| Fig. 3.5 – Relação entre o índice Q e a velocidade de avanço [10] [24] .....                                                         | 33 |
| Fig. 3.6 – Distribuição das actividades na escavação com recurso a tuneladoras [25] .....                                            | 34 |
| Fig. 3.7 – Determinação do DRI através dos índices $S_{20}$ e $S_j$ [28].....                                                        | 35 |
| Fig. 3.8 – Ábaco para a aferição da velocidade de corte instantânea, adaptado do ITA [26].....                                       | 36 |
| Fig. 3.9 – Ábaco para a determinação do grau de fracturação equivalente, adaptado do ITA [26] .....                                  | 37 |
| Fig. 3.10 – Factor correctivo ao espaçamento médio dos discos de corte, $K_A$ .....                                                  | 38 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.11 – Factor correctivo ao espaçamento dos discos de corte, $K_D$ .....                                                        | 38 |
| Fig. 3.12 – Força máxima aplicável aos discos de corte de acordo com o seu diâmetro, adaptado do ITA [26] .....                      | 39 |
| Fig. 3.13 – Variação do $C_c$ com o diâmetro dos discos de corte, adaptado do ITA [26] .....                                         | 40 |
| Fig. 3.14 – Relação entre $T_{TBM}$ , $T_{BAK}$ e $T_A$ com a taxa de penetração, adaptado ITA [26] .....                            | 41 |
| Fig. 3.15 – Variação do $H_0$ com o diâmetro dos discos de corte e CLI, adaptado do ITA [26] .....                                   | 42 |
| Fig. 3.16 – Variação do $K_\phi$ com o diâmetro da tuneladora, adaptado do ITA [26] .....                                            | 42 |
| Fig. 3.17 – Variação do $K_Q$ com a percentagem de quartzo encontrada no maciço, adaptado do ITA [26] .....                          | 42 |
| Fig. 3.18 – Propagação das fendas radiais e formação das lascas de rocha durante o processo de corte, adaptado de Rostami [31] ..... | 44 |
| Fig. 3.19 – Resultado final do modelo CSM [34] .....                                                                                 | 47 |
| Fig. 3.20 – Resultados obtidos num ensaio “Punch Penetration” [31] .....                                                             | 48 |
| Fig. 3.21 – Quadro para a introdução de dados referentes as propriedades do maciço rochoso [34] ..                                   | 49 |
| Fig. 3.22 – Determinação do Índice de Abrasividade de Cerchar (CAI) [36] .....                                                       | 50 |
| Fig. 3.23 – Correlação entre a duração dos discos de corte, UCS e CAI para alguns tipos de rochas, adaptado de Maidl et al. ....     | 50 |
| Fig. 3.24 – Variação de $m_1$ com o valor de Q [40] .....                                                                            | 53 |
| Fig. 3.25 – Curvas hipotéticas de comparação entre as velocidades de avanço obtidas por TBM e D-B, adaptado de Isaksson [10] .....   | 54 |
| Fig. 3.26 – Secção transversal de um túnel escavado com recurso a tuneladora e D-B na parte inferior [42] .....                      | 57 |
| Fig. 3.27 – Distribuição temporal de um projecto com recurso a tuneladoras [25] .....                                                | 58 |
| Fig. 3.28 – Comparação entre o custo total de construção para soluções TBM e NATM, Sauer (2004) [17] .....                           | 59 |
| Fig. 4.1 – Distribuição típica dos custos para a escavação pelos métodos convencionais, adaptado de Wagner [47] [48] .....           | 66 |
| Fig. 4.2 – Distribuição típica dos custos para escavação com tuneladoras, adaptado de Wagner [47] [48] .....                         | 66 |
| Fig. 4.3 – Resultado da avaliação de seis proposta (Pi) e avaliação inicial (AI) [45] .....                                          | 71 |
| Fig. 5.1 – Organograma dos principais intervenientes e responsáveis pela segurança em túneis rodoviários .....                       | 76 |
| Fig. 5.2 – Saída de emergência [51] .....                                                                                            | 80 |
| Fig. 5.3 – Área de paragem de emergência [51] .....                                                                                  | 81 |
| Fig. 5.4 – Ligação transversal utilizada pelos serviços de emergência [51] .....                                                     | 81 |
| Fig. 5.5 – Posto de emergência [47] .....                                                                                            | 82 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 5.6 – Iluminação de evacuação [51].....                                                    | 83 |
| Fig. 5.7 – Guia de encaminhamento [51] .....                                                    | 83 |
| Fig. 5.8 – Centro de comando e controlo [51].....                                               | 85 |
| Fig. 5.9 – Barreira, semáforo e sinal de mensagem variável [51].....                            | 87 |
| Fig. 5.10 – Sinalização referente ao sistema de radiodifusão [51].....                          | 87 |
| Fig. 5.11 – Sinalização de entrada num túnel rodoviário [55].....                               | 88 |
| Fig. 5.12 – Sinais de saída de emergência [55] .....                                            | 88 |
| Fig. 5.13 – Sinalização indicativa da distância até à saída de evacuação mais próxima [55]..... | 89 |
| Fig. 5.14 - Sinalização de área de paragem de emergência [55].....                              | 89 |
| Fig. 5.15 – Sinalização dos equipamentos disponíveis nos postos de emergência [55] .....        | 89 |
| Fig. 5.16 – Sinalização de aviso colocada nos postos de emergência [55] .....                   | 89 |
| Fig. 5.17 – Sinalização da Rádio Frequência [55].....                                           | 90 |
| Fig. 5.18 – Semáforos e sinais de mensagem variável [55] .....                                  | 90 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1 – Métodos construtivos.....                                                                                                               | 3  |
| Quadro 2.2 – Equipamento e objectivos das medições [7].....                                                                                          | 10 |
| Quadro 2.3 – Colapsos na face de escavação (HSE), adaptado de Isaksson [10].....                                                                     | 14 |
| Quadro 2.4 – Colapsos na face de escavação extensíveis à superfície (HSE), adaptado de Isaksson [10] .....                                           | 15 |
| Quadro 2.5 – Rotura do suporte antes do fecho da secção, adaptado de Isaksson [10].....                                                              | 15 |
| Quadro 2.6 – Relação entre as consequências e custo de problemas durante a construção, adaptado de Isaksson [10] .....                               | 16 |
| Quadro 2.7 – Possíveis problemas durante a escavação com os métodos convencionais e seu impacto no custo do projecto, adaptado de Isaksson [10]..... | 16 |
| Quadro 2.8 – Parâmetros geotécnicos optimizados para as diferentes tuneladoras, adaptado de DAUB [11].....                                           | 17 |
| Quadro 2.9 – Classificação das rochas quanto a sua resistência à compressão uniaxial, ISRM (1978) [1].....                                           | 18 |
| Quadro 2.10 – Possíveis problemas na escavação com tuneladoras e seu impacto no custo do projecto [10].....                                          | 25 |
| Quadro 3.1 – Classificação das roçadoras proposta pelo ITA e AIETS [21].....                                                                         | 28 |
| Quadro 3.2 – Classificação do maciço rochoso e das necessidades de suporte, segundo o índice Q [10] .....                                            | 32 |
| Quadro 3.3 – Classes de fracturação (Planos de fraqueza) [29] .....                                                                                  | 37 |
| Quadro 3.4 – Variáveis que condicionam a vida útil das ferramentas de corte, segundo o modelo NTH [29] .....                                         | 41 |
| Quadro 3.5 – Vantagens e desvantagens na utilização das tuneladoras [17] .....                                                                       | 53 |
| Quadro 3.6 – Emissões produzidas na escavação que afectam a saúde dos trabalhadores [1] .....                                                        | 56 |
| Quadro 4.1 – Evolução das responsabilidades no processo de gestão dos riscos, adaptado de Eskesen [45].....                                          | 62 |
| Quadro 4.2 – Exemplo de uma matriz de risco utilizada num projecto na Áustria, adaptado Schubert [49] .....                                          | 67 |
| Quadro 4.3 – Definição das classes de probabilidades, adaptado Schubert [49].....                                                                    | 67 |
| Quadro 4.4 – Matriz de classificação do risco, adaptado Schubert [49].....                                                                           | 68 |
| Quadro 5.1 – Requisitos mínimos para os equipamentos de segurança a instalar num túnel rodoviário segundo o DL 75/2006 [50] .....                    | 78 |
| Quadro 5.1 (continuação) – Requisitos mínimos para os equipamentos de segurança a instalar num túnel rodoviário segundo o DL 75/2006 [46] .....      | 79 |
| Quadro 5.2 – Sistemas de ventilação existentes [52] .....                                                                                            | 84 |



## **ABREVIATURAS**

TBM – Tunnel Boring Machine

NATM – New Austrian Tunneling Method

HSE – Health and Safety Executive

EPB – Earth Pressure Balance

RQD – Rock Quality Designation

ITA – International Tunneling Association

AITES – Association Internationale Des Tunnels Et De L'Espace Souterrain

NTH – Norwegian Institute of Technology

CSM – Colorado School of Mines

AVS – Abrasion Testing Steel

DRI – Drilling Rate Index

CLI – Cutter Life Index

LCM – Linear Cutting Machine







# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 OBJECTIVOS

Este trabalho desenvolveu-se inicialmente com o objectivo de realizar uma análise de risco, envolvendo o risco financeiro, por comparação de corredores e de procedimentos construtivos, bem como os sistemas de segurança a instalar, para o novo túnel rodoviário do Marão.

Devido à falta de disponibilidade dos estudos geológicos-geotécnicos optou-se por, neste documento, compilar a informação necessária a realização de um trabalho do tipo proposto. Neste trabalho, foram assim compiladas informações relativas aos métodos construtivos empregues em maciços rochosos, às análises de risco efectuadas em projectos similares e os requisitos dos sistemas de segurança para túneis rodoviários extensos.

O objectivo do autor é que este trabalho seja um guia para a realização deste tipo de análises em túneis escavados em maciços rochosos.

### 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em quatro grandes capítulos.

No segundo capítulo é feita uma introdução aos métodos construtivos empregues na escavação de maciços rochosos. Esses métodos incluem as roçadoras, as tuneladoras e a escavação com explosivos.

No terceiro capítulo apresentam-se vários modelos para a previsão do desempenho dos diferentes métodos construtivos, apresentados no capítulo dois. Estes modelos servem de base às análises financeiras e comparativas entre os diferentes métodos construtivos. Os modelos de previsão apresentados para as tuneladoras incluem: o Norwegian Institute of Technology (NTH), o Colorado School of Mines (CSM) e o modelo proposto por Barton et al.,  $Q_{TBM}$ .

No quarto capítulo estabelecem-se um conjunto de práticas, regras e responsabilidades para a gestão eficaz do risco na concepção e construção de túneis, sendo também identificados os principais riscos associados a cada método construtivo. Este capítulo está organizado como um guia para a gestão do risco durante as fases de concepção/construção. Apresentam-se também diversos casos práticos onde a análise/gestão do risco foi essencial para o sucesso da obra.

No quinto capítulo os sistemas de segurança para túneis rodoviários extensos são definidos pela análise dos requisitos de segurança nacionais (decreto-lei 75/2006) e de outros países, com uma vasta experiência na utilização deste tipo de estruturas.

Todos os assuntos abordados nos diversos capítulos estão fortemente interligados.

Os métodos construtivos e os métodos de previsão do desempenho apresentados são fundamentais para avaliar a adequabilidade dos métodos construtivos aos maciço rochoso a escavar. Estes modelos de previsão são a base para uma análise financeira e comparativa dos diferentes métodos construtivos.

Uma boa análise financeira deve sempre incluir o risco associado ao método construtivo utilizado e à proposta apresentada. Logo uma boa análise financeira deve ser complementada por uma análise do risco. Os princípios fundamentais das análises de risco são, por isso, apresentados.

Os sistemas de segurança a instalar interferem nos custos da obra (análise financeira), no nível de risco durante a fase de exploração da obra (análise de risco) e influenciam ainda a concepção do túnel.

## 2

## MÉTODOS CONSTRUTIVOS

## 2.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS EM MACIÇOS ROCHOSOS

Os métodos construtivos utilizados na escavação de túneis em maciços rochosos distinguem-se em dois grandes grupos. O primeiro engloba a escavação mecânica com recurso a tuneladoras (TBM). O segundo grupo engloba a escavação pelos métodos construtivos convencionais que incluem a escavação com roçadoras, retroescavadoras e martelos hidráulicos e a escavação com explosivos (Drill&Blast ou D-B). A escavação com recurso aos métodos construtivos convencionais está normalmente associada a metodologia construtiva do NATM.

Quadro 2.1 – Métodos construtivos

| Maciços rochosos duros   | Maciços rochosos brandos |
|--------------------------|--------------------------|
| TBM / Drill&blast (NATM) | Roçadoras (NATM) / TBM   |

Na figura seguinte são descritas as principais etapas construtivas de uma escavação realizada por uma TBM e de uma escavação D-B.

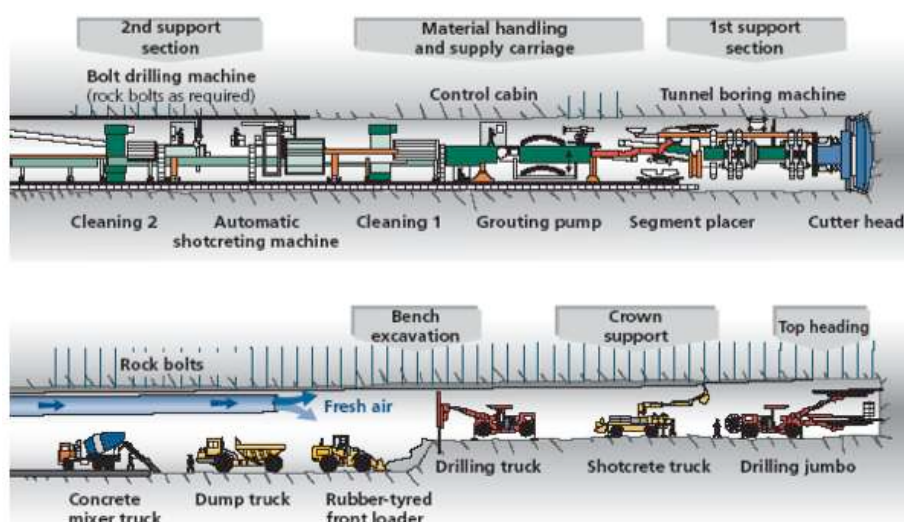


Fig. 2.1 – Escavação com recurso a TBM e a D-B, adaptado de Gotthard Das Projekt [1]

O método de escavação por explosivos permite a realização, na frente da escavação, de múltiplas actividades, enquanto a escavação com recurso a tuneladoras depende sempre das condições de acessibilidade na frente.

Neste capítulo pretende-se definir e comparar os diferentes métodos construtivos, à disposição do projectista, para a execução de túneis em maciços rochosos. A selecção do método construtivo depende sempre de diversos parâmetros, dos quais se salientam:

- Condicionantes geológicas
- Condicionantes financeiras
- Forma da secção transversal
- Tempo de construção

## **2.2 MÉTODOS CONSTRUTIVOS CONVENCIONAIS**

### **2.2.1 ESCAVAÇÃO COM EXPLOSIVOS**

No processo de desmonte com explosivos a face do túnel é inicialmente perfurada por equipamentos mecânicos, denominados “jumbos”, geralmente equipados com múltiplos braços perfuradores. Em casos excepcionais, quando é reduzido o espaço de operação ou poucos os furos a executar, estes podem ser realizados manualmente.



Fig. 2.2 – “Jumbo” durante o processo de furação para a instalação de explosivos [2]

A face do túnel é seguidamente carregada com explosivos e detonada sequencialmente. Geralmente num diagrama de fogo a sequência de rebentamento, segundo Bastos [3], segue a seguinte ordem: caldeira, alargamento, soleira e contorno. As maiores cargas utilizam-se nas zonas de mais difícil arranque, nomeadamente na caldeira, onde existe maior confinamento, e na soleira, onde se verifica maior influência da gravidade. As técnicas de fogo, genericamente, variam quanto à disposição, número de furos e retardo entre as explosões.

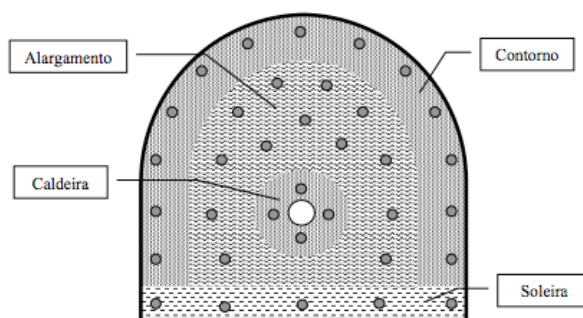


Fig. 2.3 – Esquema de utilização de explosivos [3]

A utilização de explosivos tem a finalidade de fracturar a rocha e provocar o seu movimento em relação à face livre, de forma a promover a sua extracção ou arranque. O maciço rochoso é, desta forma, desagregado pela energia do explosivo e o produto da escavação é posteriormente removido. Nesta acção dos explosivos existem inevitáveis efeitos secundários sobre o maciço remanescente, provocados pela energia libertada. Estes danos, na sua vertente nefasta, são traduzidos por fenómenos de sobreescavação e fracturação.

A sobreescavação é o efeito do arranque de rocha fora dos limites definidos para a abertura do túnel. Este fenómeno acarreta elevados prejuízos económicos associados ao maior volume de produtos de escavação (maiores custos de transporte), à maior quantidade de materiais de enchimento (maiores custos de betão) e implica a utilização de suportes mais competentes, devido ao aumento do vão nos tectos e hasteais. A fracturação induzida ao maciço rochoso, envolvente ao túnel, ocasiona igualmente vários transtornos económicos e operacionais, originando maior afluência de água, o que acarreta maiores custos de bombagem, e uma acentuada deterioração do maciço a que estão associados maiores custos com o sustentamento. Em termos de segurança, este efeito é igualmente nefasto por aumentar o perigo da queda de blocos isolados, reduzindo também o factor de segurança e o tempo de auto-sustentação do maciço [3].

A utilização de explosivos provoca a libertação de gases tóxicos, prejudiciais para o ser humano em concentrações elevadas, e de poeiras que provocam a redução da visibilidade no interior do túnel. Neste tipo de escavação é necessário prever um sistema de ventilação que controle estes problemas e possibilite às equipas de trabalho reforçar estruturalmente o túnel. Estes reforços serão abordados mais adiante na metodologia construtiva do NATM.

O método de escavação com recurso a explosivos é frequentemente utilizado na escavação de maciços rochosos mais resistentes, com um alto teor em quartzo e outros materiais muito abrasivos. Neste tipo de maciço a utilização das TBM é desvantajosa, devido ao desgaste muito elevado dos discos de corte.

### 2.2.2 ESCAVAÇÃO COM ROÇADORAS

A escavação mecânica efectuada com recurso a roçadoras pode ser empregue em maciços rochosos brandos ou maciços terrosos. Como o peso da roçadora é a principal força de reacção à força de corte máxima aplicável na cabeça de corte, a aplicabilidade destes equipamentos a escavação de maciços rochosos mais resistentes é limitada.



Fig. 2.4 – Roçadora e equipa afecta ao equipamento [4]

### 2.2.3 ESCAVAÇÃO MISTA

A escavação mecânica pode ser aplicada exclusivamente na escavação de um túnel ou então em conjunto com o método de escavação por explosivos. Neste caso, recorre-se ao método construtivo que melhor se adapta às condições específicas do maciço rochoso a perfurar. De facto, a grande vantagem dos métodos convencionais reside na sua flexibilidade para se adaptarem a novas condições geológicas-geotécnicas.

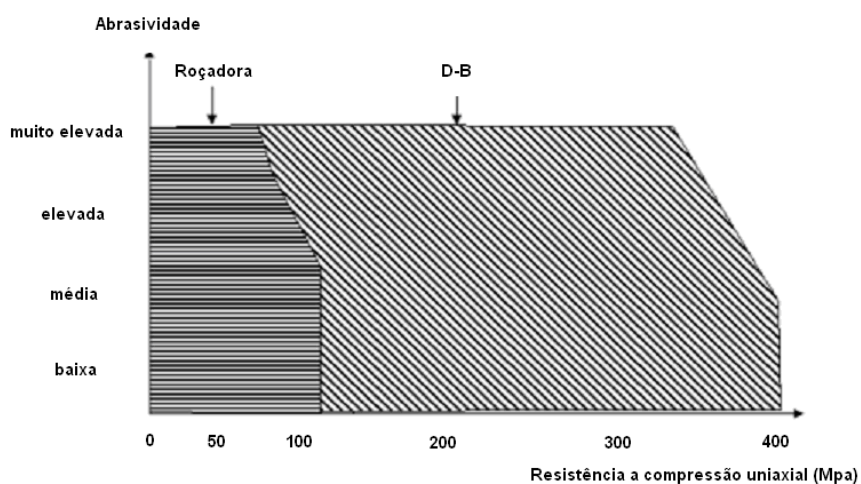


Fig. 2.5 – Intervalos de viabilidade para escavação de maciços rochosos utilizando D-B e roçadoras, adaptado de Girmscheid [5]

A aplicação dos métodos construtivos convencionais é particularmente favorável em maciços rochosos de boa qualidade, estabilidade e com tempos de suporte elevados. Neste tipo de maciço o avanço é feito em troços mais compridos, maximizando assim a velocidade de avanço. De acordo, com as condições de estabilidade do maciço rochoso a escavação do túnel pode ser plena ou faseada.

## **2.3 NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD (NATM)**

### **2.3.1 PRINCÍPIOS DO MÉTODO**

Segundo a metodologia construtiva do NATM, o maciço rochoso ou solo envolvente à escavação, neste caso o túnel, é um elemento estrutural capaz de suportar solicitações, através da mobilização da sua capacidade auto-portante. Na literatura [6], vários autores defendem que este método é um conceito ou metodologia construtiva em vez de um real processo construtivo.

Os princípios fundamentais do NATM são [7]:

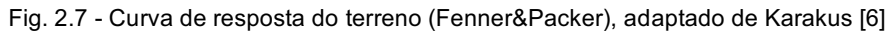
- A mobilização da resistência do maciço rochoso na envolvente do túnel que é o principal elemento de suporte;
- A preservação da resistência do maciço rochoso, evitando a sua descompressão, através da escavação cuidada e aplicação imediata do suporte. O betão projectado e as pregagens aplicadas na proximidade da face de escavação mantêm a integridade do maciço rochoso;
- A forma arredondada do túnel evita a concentração de tensões em extremidades, onde se iniciam os mecanismos de rotura progressiva;
- O suporte primário flexível e pouco espesso, minimiza os esforços aplicados e facilita o rearranjo das tensões sem expor o suporte a forças desfavoráveis. A necessidade de suporte adicional do túnel, não deve ser suprimida pelo aumento da espessura do betão projectado, mas por pregagens. O betão projectado deve envolver a totalidade da rocha exposta, solidarizando a rocha na envolvente da escavação;
- A estabilidade do túnel resulta da distribuição das forças actuantes pelo maciço envolvente à escavação e suportes instalados. A razão desta distribuição é função da curva de resposta do terreno;
- Um plano de observação pormenorizado para observação do comportamento do túnel durante a construção. Através da monitorização e interpretação das deformações, esforços e tensões é possível optimizar procedimentos construtivos e as necessidades de suporte.

A construção de túneis pela metodologia do NATM, procura a preservação da resistência inerente do maciço rochoso e a sua deliberada mobilização, na máxima extensão possível, através do controlo da deformação. Neste sentido, após a execução da escavação, aplica-se uma camada pouco espessa de betão projectado. Esta camada semi-flexível têm como principal função solidarizar a rocha na envolvente da escavação, permitindo assim a sua deformação controlada. Como suporte primário para além do betão projectado são utilizadas pregagens, ancoragens, cambotas metálicas, rede electro-soldada (malhasol) e outros tipos de suporte que se encontram enumerados na figura 2.6.



Fig. 2.6 - Tipos de suporte utilizados nos métodos convencionais, adaptado de Hoek [9]

- 1 - Enfilagens – Perfis em aço, tipicamente com diâmetros de 75 e 114mm e com 12 metros de extensão, são instalados a cada 8m para criar uma zona de sobreposição de 4m entre as zonas de protecção consecutivas;
- 2 - Betão Projectado – Aplicado imediatamente atrás da face de escavação e na face, caso existam problemas de estabilidade. A espessura da camada inicial aplicada varia entre os 25 e 50mm. A sua principal função é evitar a deterioração da rocha exposta;
- 3 - Pregos de fibra de vidro – Instalados para aumentar a estabilidade da face de escavação, normalmente o seu comprimento varia entre os 6 e 12m;
- 4 - Cambotas metálicas – Instaladas o mais próximo possível da face de escavação, estas estruturas suportam as enfilagens e parte das tensões actuates;
- 5 - Cambotas invertidas – Colocadas para controlar o levantamento da soleira da escavação, servem também de fundação para as cambotas metálicas;
- 6 - Betão projectado – Normalmente reforçado por fibras metálicas e aplicado com a maior brevidade possível, envolve as cambotas metálicas melhorando a sua estabilidade lateral. Esta camada de betão projectado pode atingir espessuras de 150mm;
- 7 - Pregagens – Utilizadas de acordo com as necessidades de apoio estrutural do túnel ou na estabilização de blocos rochosos potencialmente instáveis;
- 8 - Suporte invertido – Constituído por betão projectado ou betão (dependendo da utilização prevista para o túnel).



O conceito do método NATM baseia-se no controlo de deformações e rearranjo das tensões para a obtenção do nível de segurança requerido. Estes requisitos podem diferir de acordo com o tipo de projecto, para um túnel em ambiente urbano a estabilidade e controlo dos assentamentos é fundamental, para outros tipos de túneis a estabilidade pode ser o único requisito.

9

## 2.3.2 INSTRUMENTAÇÃO

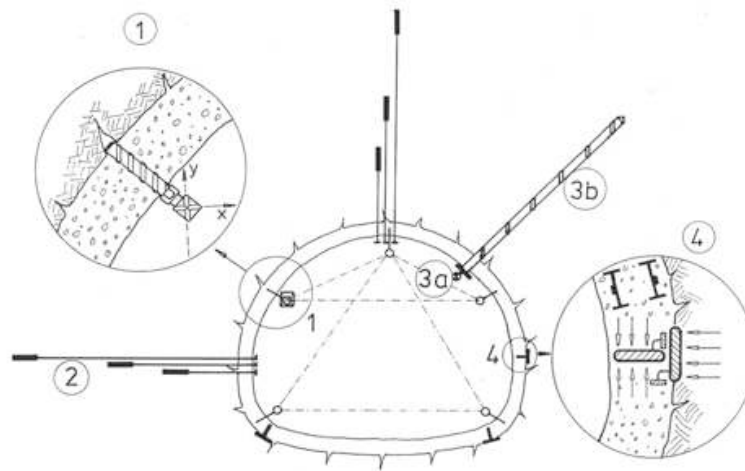


Fig. 2.8 - Equipamento utilizado na medição dos deslocamentos, forças e tensões (NATM) [7]

Quadro 2.2 – Equipamento e objectivos das medições [7]

| Legenda | Objectivo da medição                                        | Instrumento                          |
|---------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1       | Deformação das paredes do túnel                             | Fita de invar<br>Marcas topográficas |
| 2       | Deformação do solo envolvente ao túnel                      | Extensômetros                        |
| 3       | Monitorização da força desenvolvida na ancoragem            | Células de carga                     |
| 4       | Monitorização das tensões desenvolvidas no suporte primário | Células de pressão                   |

Além destes equipamentos, à superfície através de furos de sondagem, podem-se instalar inclinómetros para a medição dos movimentos horizontais induzidos pela escavação, bem como de tubos piezométricos, para a medição das pressões hidrostáticas actuantes sobre os suportes do túnel e para a obtenção de um modelo hidrológico revisto. [3]

A metodologia de NATM implica um acompanhamento rigoroso da obra durante a fase construtiva, cujo comportamento depende do sistema de suporte primário. O dimensionamento do sistema de suporte definitivo deve estar de acordo com as alterações das pressões no terreno e a debilidade do anel estrutural. Daí a importância da instalação de meios de instrumentação que permitam aferir os parâmetros de comportamento da estrutura. A estabilização do túnel é conferida pelo suporte secundário ou definitivo, que pode ser realizado por betonagem com cofragens deslizantes ou por aduelas de betão pré-fabricadas, utilizadas mais frequentemente em túneis escavados por tuneladoras.

Este método obriga assim a uma monitorização sistemática das deformações dos suportes e terreno. A deformação excessiva resulta na perda de resistência e elevados assentamentos à superfície. Este método é assim desaconselhável quando existem estruturas e edifícios na proximidade da escavação.

O Eurocódigo 7 [8] prevê a utilização de métodos observacionais, como o NATM, em condições onde o comportamento geotécnico é difícil de avaliar, desde que certos requisitos sejam cumpridos antes do início da escavação:

- Fixação dos limites aceitáveis de comportamento (limites de convergência, forças nas ancoragens,...);
- O campo de comportamento possível deve ser determinado e deve-se demonstrar que, com uma boa probabilidade, o comportamento real da estrutura obedecerá aos limites impostos previamente;
- Um plano rigoroso de motorização deve ser implementado para verificar se o comportamento real da estrutura está dentro dos limites impostos. A monitorização deve começar o mais cedo possível. Deve ser implementado um plano de leituras que possibilite o sucesso das intervenções de contingência (definição dos limites de alerta e de perigo);
- Os tempos de resposta dos equipamentos e de análise dos resultados devem ser suficientemente rápidos em relação à potencial evolução do sistema;
- Um plano de contingência deve ser elaborado, contendo os procedimentos a seguir, caso a monitorização revele um comportamento da estrutura fora dos limites aceitáveis;
- Durante a construção a monitorização deve realizar-se como planeado. Normalmente existem dois planos de monitorização, um durante a obra e o seguinte após a sua conclusão;
- O equipamento de monitorização deve ser substituído, ou adicionado novo equipamento, caso se verifique que as leituras são incorrectas ou em quantidade insuficiente.

### 2.3.3 INFLUÊNCIA DA ÁGUA NO TÚNEL

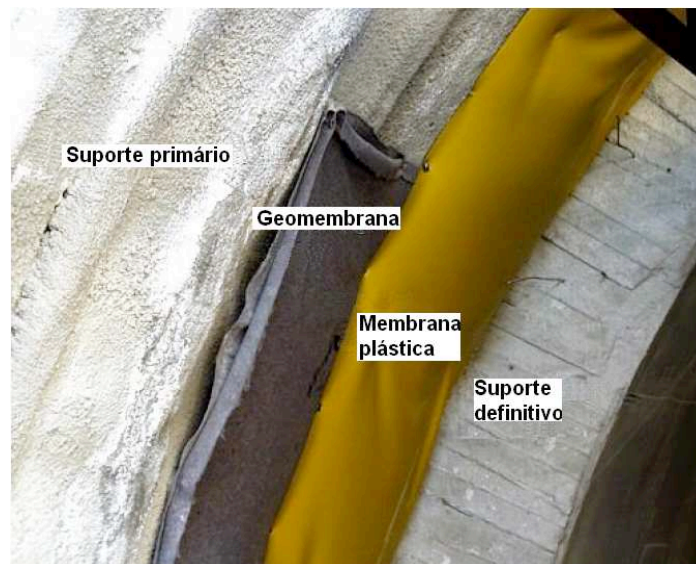


Fig. 2.9 – Camadas constituintes do túnel, adaptado de Hoek [9]

A presença de água afecta significativamente as condições de estabilidade do túnel de duas formas distintas, durante as fases de construção e serviço. A presença da água pode causar problemas significativos durante a fase de construção, como resultado da redução de resistência, devido à deterioração do maciço rochoso ou à redução das tensões efectivas de confinamento. No

dimensionamento dos elementos de suporte deve-se contabilizar a redução de resistência do maciço rochoso. A deterioração física do maciço rochoso pode ser estimada por ensaios realizados em condições semelhantes às experimentadas “in situ”.

Durante a fase construtiva, o túnel funciona como um elemento drenante, por isso nesta fase as pressões neutras não são geralmente problemáticas, salvo em condições muito especiais, por exemplo a pressão da água em falhas com material de enchimento altamente impermeável. No caso da libertação repentina destas pressões as condições segurança no túnel podem baixar significativamente. Quando barreiras deste género são expectáveis, é recomendável a investigação sistemática das condições na frente da escavação, para obter o máximo aviso possível sobre estas situações problemáticas.

Durante a construção, caudais afluentes elevados podem perturbar e mesmo imobilizar a obra, reduzindo as condições de segurança, normalmente estes caudais diminuem no tempo. A presença da água, em volume elevados, é particularmente gravosa durante a fase de construção. Esta afecta os componentes eléctricos dos meios mecânicos, a utilização dos explosivos no desmonte do material e pode provocar sérios problemas de saúde aos trabalhadores.

Na generalidade dos túneis ferroviários e em muitos dos rodoviários, entre o suporte primário e o definitivo é instalada uma membrana plástica e uma geomembrana. Esta camada drenante direcciona a água para os tubos de drenagem na base do túnel, a partir dos quais a água é drenada por gravidade para um dos portais. A estanquidade do túnel é assegurada pela membrana plástica. Este sistema em condições normais funciona bem, por isso, regra geral, no dimensionamento do suporte definitivo não se contabiliza grande parte das pressões hidrostáticas. Em situações especiais para as quais a drenagem não é permitida e é necessário restabelecer o nível freático inicial, por exemplo em parques naturais ou sobre áreas ambientalmente sensíveis, o suporte definitivo deve ser capaz de suportar as pressões hidrostáticas [9].

#### 2.3.4 PROCESSO CONSTRUTIVO

A metodologia do NATM pode ser aplicada em escavações mecânicas (roçadoras) e em escavações com recurso a explosivos. Os principais procedimentos construtivos desta metodologia são descritos seguidamente. Na primeira fase, procede-se a escavação que pode ser parcial ou total da face. O tipo de escavação é determinado pelas características mecânicas do maciço rochoso e de estabilidade da face de escavação.



Fig. 2.10 – Escavação do túnel com uma roçadora [7]

Uma das características chaves deste método consiste na aplicação, logo que concluída a escavação, de uma camada pouco espessa de betão projectado. Esta camada solidariza o maciço rochoso, na envolvente ao túnel, no sentido de mobilizar a sua resistência na máxima extensão possível, através da sua deformação controlada. O suporte primário é em alguns casos também constituído por pregagens, ancoragens, cambotas metálicas e redes electro-soldadas (malhasol).



Fig. 2.11 – Aplicação da camada de betão projectado com malhasol [7]

Nesta fase, e de acordo com a resposta do terreno e das deformações observadas no tempo, activa-se na altura mais conveniente o anel estrutural de suporte. A deformação controlada do túnel permite mobilizar uma maior resistência no maciço rochoso, o que implica uma menor necessidade de resistência ou número de suportes primários a instalar. Após a activação deste anel estrutural procede-se a monitorização e interpretação das deformações, esforços e tensões actuates no túnel.



Fig. 2.12 – Observação das deformações do túnel [7]

Na última fase procede-se a instalação do suporte definitivo, normalmente constituído por segmentos de betão pré-fabricados. O suporte definitivo confere ao túnel o seu acabamento final e tem ainda uma função estrutural.



Fig. 2.13 – Aplicação do suporte secundário ou definitivo [7]

### 2.3.5 PROBLEMAS NA ESCAVAÇÃO

A maioria dos colapsos em túneis executados com a metodologia NATM ocorrem durante a fase de construção. A face de escavação é particularmente susceptível a colapsos quando o suporte primário ainda é fraco ou o comprimento do vão não suportado é excessivo. Em túneis completos e bem construídos, a probabilidade de colapso por insuficiência dos suportes é negligenciável.

Para a aplicação segura da metodologia construtiva do NATM são factores muito importantes a experiência e competência da equipa de engenharia em obra. Esta visão é defendida pelo facto de a maioria dos acidentes estar associada aos turnos nocturnos.

As equipas envolvidas na execução, concepção e supervisão de uma construção com o método NATM devem compreender o funcionamento deste conceito [7].

A concepção de túneis, segundo a metodologia NATM, implica a mobilização da resistência do maciço. Neste sentido é necessário para uma boa concepção, uma boa caracterização e informação sobre as características do maciço, que muitas vezes não está disponível. A grande maioria dos colapsos está associada à ocorrência de condições geológicas-geotécnicas distintas das esperadas [6].

Quadro 2.3 - Colapsos na face de escavação (HSE), adaptado de Isaksson [10]

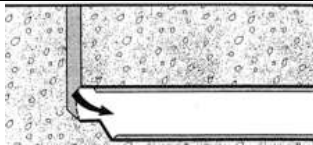
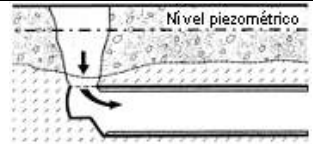
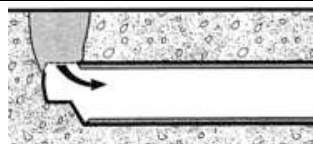
| Tipo de colapso                                                                                                                                                                                                                                                                            | Ilustração do colapso |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <p>O material apresenta características mecânicas insuficientes para garantir a estabilidade da escavação. Possíveis soluções incluem: uma maior parcialização da secção e um menor comprimento do vão não suportado</p> <p>A rotura da banquetta pode ser longitudinal ou transversal</p> | <p>Banqueta</p>       | <p>Coroa</p>         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>Total da face</p>  | <p>Local da face</p> |

Os colapsos na face de escavação são potenciados em situações de:

- Cobertura reduzida, com comprimento do vão não suportado excessivo;
- Presença de massas rochosas não devidamente estabilizadas;
- Inadequada parcialização da secção.

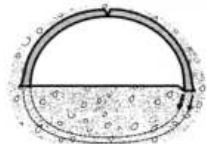
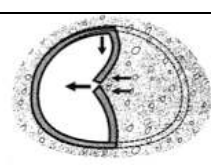
Os colapsos durante a escavação da banquetta podem ocorrer devido ao insuficiente suporte do maciço ou devido ao comprimento excessivo do vão não suportado.

Quadro 2.4 – Colapsos na face de escavação extensíveis à superfície (HSE), adaptado de Isaksson [10]

| Tipo de colapso                                                                                            | Ilustração do colapso                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Instabilidade da cobertura (devido a fissuras verticais e a estruturas humanas (condutas e poços de água)) |   |
| Cobertura insuficiente sobre estrato altamente permeável                                                   |   |
| Cobertura insuficiente                                                                                     |  |

Os colapsos na face de escavação extensíveis à superfície não estão directamente relacionados com a estabilidade da escavação, mas com as propriedades do maciço subjacente.

Quadro 2.5 – Rotura do suporte antes do fecho da secção, adaptado de Isaksson [10]

| Tipo de colapso                                                                                                                | Ilustração do colapso                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotura da fundação pelas cambotas metálicas (reforço da fundação com recurso a micro-estacas ou aplicação de betão projectado) |  |
| Rotura do suporte devido aos esforços induzidos pelos movimentos horizontais e ao levantamento do fundo de escavação           |  |
| Rotura da parede da galeria lateral                                                                                            |  |

As roturas do suporte, geralmente, não conduzem a problemas da mesma gravidade dos que advêm do colapso da face e acontecem primordialmente antes do fecho da secção, altura em que a força instalada no suporte, muita vezes, ainda não é a definitiva.

Os problemas que surgem durante a escavação podem ter consequências distintas ao nível de custos, tempo e vidas humanas. Um bom indicador das consequências de um problema, na execução de um túnel, é o seu custo, uma vez que neste indicador estão implícitos todos os outros. Os valores apresentados no quadro seguinte são válidos também para a escavação com recurso a tuneladoras.

Quadro 2.6 – Relação entre as consequências e custo de problemas durante a construção, adaptado de Isaksson [10]

| Classe da consequência | Descrição              | Custo (% do custo total) |
|------------------------|------------------------|--------------------------|
| I                      | Consequências mínimas  | <10                      |
| II                     | Consequências médias   | 10-50                    |
| III                    | Consequências elevadas | 50-100                   |
| IV                     | Consequências extremas | >100                     |

Quadro 2.7 – Possíveis problemas durante a escavação com os métodos convencionais e seu impacto no custo do projecto, adaptado de Isaksson [10]

| Problema na escavação                                                  | Descrição                               | Classe de consequência |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| Eventos relacionados com as condições geológicas-geotécnicas do maciço |                                         |                        |
| Problemas na face de escavação                                         | Colapso da face                         | II-III                 |
|                                                                        | Colapso com a afluência de água         | II-III                 |
|                                                                        | Colapso da banquetta                    | II-III                 |
|                                                                        | Colapso lateral da escavação            | II                     |
|                                                                        | Afluência excessiva de água             | II-IV                  |
|                                                                        | Colapso da face extensível à superfície | II-III                 |
| Problemas no túnel                                                     | Colapso do suporte                      | I-II                   |
|                                                                        | Deformações excessivas                  | I-II                   |
| Problemas à superfície                                                 | Assentamentos                           | I-III                  |
| Vários                                                                 |                                         |                        |
| Erro humano                                                            | Falhas na execução                      | II-IV                  |

## 2.4 ESCAVAÇÃO MECÂNICA COM TUNELADORAS

### 2.4.1 TIPOS DE TUNELADORAS

As tuneladoras são verdadeiras fábricas moveis para a construção de túneis, com este género de equipamentos é possível escavar, extrair os produtos da escavação e instalar o suporte do túnel, que regra geral é já o definitivo. A escavação mecânica de maciços rochosos pode ser realizada recorrendo a três tipos distintos de tuneladoras:

- Tuneladoras sem escudo (Gripper TBM)
- Tuneladoras de escudo simples (Shielded TBM)
- Tuneladora de escudo duplo (Double Shielded TBM)

As tuneladoras referidas não proporcionam durante o processo de escavação uma contra-pressão na face, através de, por exemplo, lamas bentoníticas (Slurry-Shield) ou mecânicas (EPB). Este tipo de tuneladoras é mais adequado à escavação de maciços terrosos, maciço rochosos brandos, ou na escavação de túneis de elevado diâmetro, para os quais é necessário aplicar uma contra pressão na face de escavação para garantir a sua estabilidade.

A construção de um túnel com recurso a tuneladoras envolve, geralmente as seguintes etapas: escavação, extracção dos produtos de escavação, instalação do suporte, apoio e ocasionalmente a substituição das ferramentas de corte. Um dos grande inconvenientes deste processo construtivo reside no facto de todas as etapas construtivas pertencerem ao caminho crítico. Neste sentido, se uma das actividades sofre uma atraso, devido por exemplo: a avarias na tuneladora, dificuldades no arranjo ou substituição dos discos de corte ou atrasos na escavação, automaticamente todas as actividades seguintes sofrem atrasos, aumentando assim o tempo total de duração da obra. As tuneladoras de escudo duplo ou de escudo telescópico solucionam parcialmente este problema, por permitirem, em condições normais, que o processo de escavação e instalação dos suportes se processe em simultâneo.

As especificações técnicas básicas de uma tuneladora incluem: o diâmetro, o peso da máquina, a máxima força de torção (necessária a rotação da cabeça de corte sobre máxima força de impulsão), potência, rotações por minuto da cabeça de corte, força transmitida aos apoios, penetração, diâmetro do discos de corte, número de instrumentos de corte, força transmitida por disco de corte.

A escavação mecânica com recurso a tuneladoras é normalmente utilizada em maciços rochosos com uma resistência a compressão axial entre 60 e 300MPa [11]. Para maciços mais resistentes ou mais abrasivos este método torna-se menos vantajoso. A utilização das tuneladoras é particularmente adequada em maciços rochosos de resistência a tracção entre 5-25MPa, com um RQD de 50-100% e um espaçamento entre descontinuidades inferior a 0,6m. No entanto, é possível utilizar tuneladoras em condições menos favoráveis, por exemplo, em condições de resistência a compressão de 20MPa, com uma distância entre descontinuidades de 0,2m, um RQD de 20% e a resistência tracção de 2MPa [11].

Quadro 2.8 - Parâmetros geotécnicos otimizados para as diferentes tuneladoras, adaptado de DAUB [11]

| Maciço Rochoso                       | A           | B            |
|--------------------------------------|-------------|--------------|
| Resistência à compressão (MPa)       | 50-300      | 5-50         |
| Resistência à tracção (MPa)          | 5-25        | 0,5-5        |
| RQD(%)                               | 50-100      | 10-50        |
| Espaçamento das descontinuidades (m) | 0,6 a >2    | 0,06-0,6     |
| Tipo de Tuneladora                   | Gripper TBM | Shielded TBM |

Quadro 2.9 - Classificação das rochas quanto a sua resistência à compressão uniaxial, ISRM (1978) [1]

| Rocha                                        | Resistência à compressão (MPa) | Resistência a compressão |
|----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Quartzitos, Granito de grão fino, Anfibolito | 320-250                        | Extremamente elevada     |
| Basalto                                      | 250-200                        | Muito Elevada            |
| Gneiss, Granito de grão médio                | 200-150                        |                          |
| Calcários                                    | 150-100                        |                          |
| Arenito silicioso                            | 100-50                         | Elevada                  |
| Arenito calcário                             | 50-25                          | Média                    |
| Calcário argiloso, Arenito argiloso          | 25-5                           | Baixa                    |

A dimensão do túnel e as condições geológicas do maciço determinam o tipo e a configuração da tuneladora a seleccionar. Os factores geológicos-geotécnicos que influenciam a selecção da tuneladora são [12] ;

- O tipo predominante de minerais (% de quartzo);
- A resistência do maciço rochoso;
- A altura da cobertura;
- A heterogeneidade do material;
- A pressão piezométrica.

Os efeitos negativos provenientes das condições geológicas-geotécnicas imprevisíveis podem ser fortemente ampliados se o tipo de tuneladora é erradamente seleccionado. A decisão final, no que respeita ao tipo de tuneladora a utilizar, depende nas condições de estabilidade do maciço e do nível esperado de água afluyente.

### 2.4.2 TUNELADORA SEM ESCUDO (GRIPPER TBM)

Este tipo de tuneladora, sem escudo, é particularmente sensível a níveis freáticos acima da cota da escavação e no atravessamento de falhas. [13]

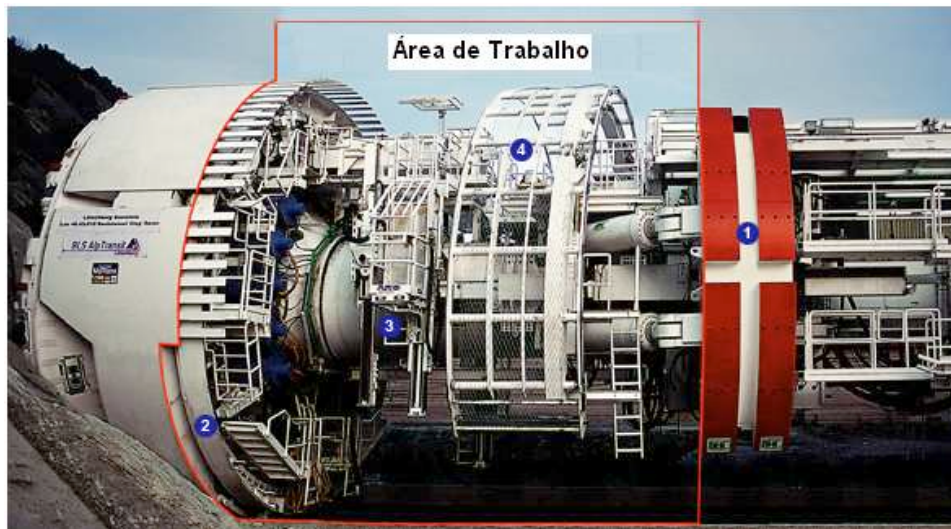


Fig. 2.14 – Tuneladora sem escudo, adaptado de Herrenknecht [14]

O sistema de escavação é constituído pela cabeça de corte, na qual estão instalados os discos de corte, distribuídos de forma a maximizar a penetração. À medida que a cabeça de corte gira, os apoios radiais (1), que vão buscar a sua reacção ao maciço, estão ligados a macacos hidráulicos que empurram os discos de corte contra a face do túnel, provocando a fracturação da rocha. A rocha escavada é depois recolhida através de aberturas na cabeça de corte e finalmente encaminhada para a correia transportadora no corpo principal da tuneladora. Esta encaminha o produto de escavação para um sistema de transporte ou para uma correia transportadora de longa distância que transporta os produtos de escavação a vazadouro.



Fig. 2.15 – Extracção dos produtos de escavação [15]

A concepção destas tuneladoras permite um acesso rápido e directo à zona imediatamente atrás da cabeça da corte. Nesta secção, designada por área de trabalho, estão instalados vários dispositivos mecânicos que permitem a execução de pregagens (3), a instalação de redes metálicas (4) e de cambotas metálicas (2) que constituem o suporte primário do maciço rochoso (semelhante ao utilizado no NATM). O desempenho deste tipo de tuneladoras depende essencialmente do tempo necessário à instalação destes suportes. A aplicação da camada de betão projectado e dos segmentos de betão pré-fabricados é realizada numa secção posterior da tuneladora [13].

Concluído o curso de escavação, cujo comprimento é fixado pela extensão máxima dos macacos hidráulicos ligados aos apoios radiais, a tuneladora é imobilizada e as barras de suporte na secção posterior são baixadas, por forma a garantir a estabilidade para a retracção dos apoios radiais. A estrutura de suporte é movida para a frente, os apoios radiais são tencionados novamente contra o maciço rochoso e as barras de suporte retraídas, procedendo-se assim a um novo ciclo de escavação. O limite máximo das força transmitidas pelos apoios radiais é determinado pela resistência à compressão uniaxial da rocha e situa-se normalmente entre duas a três vezes a força de impulsão da tuneladora.

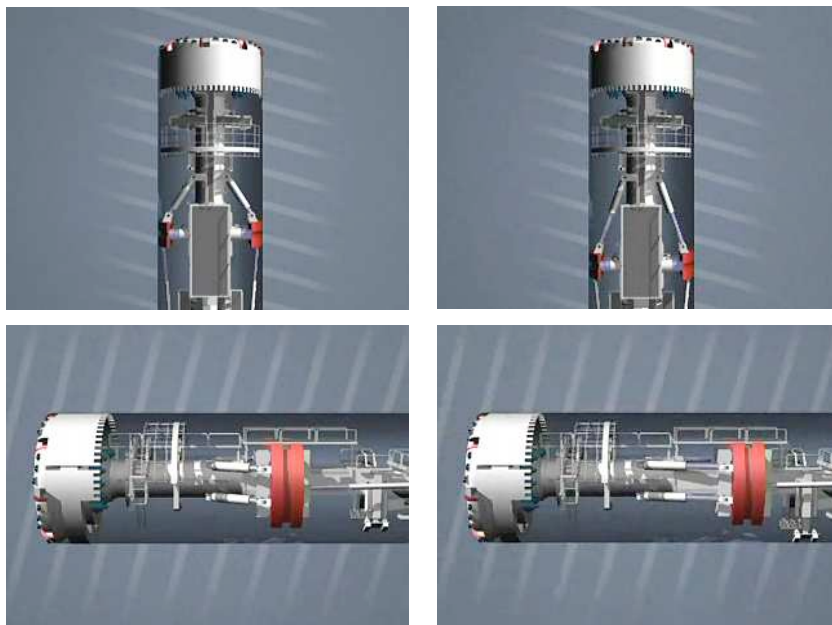


Fig. 2.16 – Movimento dos apoios radiais e barras de suporte para avanço da tuneladora [15]

Dentro da classe das tuneladoras sem escudo podem-se distinguir dois sistemas que diferem essencialmente no número de apoios radiais instalados. O princípio de funcionamento das tuneladoras com um apoio radial ou com dois apoios radiais são essencialmente semelhantes.

Este tipo de tuneladoras, utilizadas na escavação de maciços rochosos mais resistentes atingem altos desempenhos. No entanto, as velocidades de avanço atingidas sofrem reduções drásticas se a tuneladora não se encontrar devidamente adaptada às condições que vai encontrar.

#### 2.4.3 TUNELADORA DE ESCUDO SIMPLES (SINGLE SHIELDED TBM)

As tuneladoras de escudo simples são utilizadas em maciços rochosos instáveis onde existe o risco de colapso. As funções do escudo são essencialmente de protecção dos trabalhadores e equipamentos da queda de blocos rochosos, até que o suporte do túnel possa ser seguramente instalado. O escudo das tuneladoras têm um diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro do túnel para permitir deslocamentos radiais das suas paredes, que em casos extremos podem encravar a tuneladora. O comprimento do escudo é também reduzido, pois à medida que nos afastamos da frente da escavação os deslocamentos radiais são maiores e poderiam encravar a tuneladora.

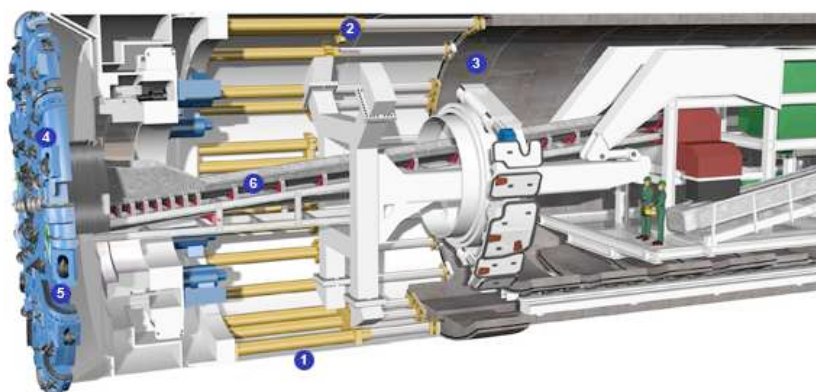


Fig. 2.17 – Tuneladora de escudo simples [16]

Sobre a protecção do escudo (1), a cabeça de corte (4) é pressionada contra o maciço através de um conjunto de cilindros hidráulicos (2), que se apoiam no último anel de segmentos de betão instalados (3). A pressão aplicada pelos discos de corte fractura o maciço causando a sua desagregação. O produto da escavação é recolhido através de aberturas na cabeça de corte (5) e conduzido pelas correias transportadoras da tuneladora (6) para um sistema de transporte ou para uma correia transportadora de longa distância que conduz os produtos de escavação a vazadouro [16].



Fig. 2.18 - Cilindros hidráulicos de impulsão da cabeça de corte [17]

O suporte do túnel é realizado usualmente com segmentos de betão pré-fabricados impermeáveis, de 25 a 50cm de espessura, que são colocados em posição através de um braço robótico manobrado por um operador especializado, sobre a protecção da parte posterior do escudo da tuneladora. A execução destes segmentos está sujeita a um apertado controlo de qualidade. As tolerâncias de execução são muito rigorosas porque o elevado peso destes segmentos, por si só, dificulta bastante a sua colocação. As características fundamentais dos segmentos são uma alta durabilidade, exactidão nas suas dimensões e uma resistência compatível com as pressões exercidas pelo maciço e pela água. As secções realizadas com os segmentos de betão pré-fabricado são inferiores ao diâmetro do túnel escavado, para permitir até um certo limite a convergência radial do túnel. O espaço entre os segmentos e túnel escavado é preenchido, através do escudo posterior da tuneladora ou através de furos nos segmentos, por uma mistura de cimento, água, agregados finos, adjuvantes e aditivos. Este preenchimento previne subsidências do solo, cargas assimétricas nos segmentos e possíveis danos ou fugas através do suporte do túnel [18].

As tuneladoras de escudo simples não proporcionam uma contra-pressão na face da escavação. No entanto, em condições especiais, para as quais se verifique uma redução significativa das condições de estabilidade é possível configurar este tipo de tuneladora para o modo de Mixshield. Neste modo de operação a tuneladora proporciona uma contra-pressão na face de escavação através da utilização de lamas bentoníticas e ar comprimido. Esta mais valia é particularmente importante em maciços heterogêneos, onde alternam maciços rochosos competentes e solos de baixa resistência.

Neste tipo de tuneladoras o processo de escavação e instalação do suporte é realizado sequencialmente.

#### 2.4.4 TUNELADORA DE ESCUDO DUPLO (DOUBLE SHIELDED TBM)

As tuneladoras de escudo duplo são equipamentos tecnicamente muito avançados. Este tipo de tuneladora combina a tecnologia da tuneladora sem escudo (Gripper TBM) com a tecnologia da tuneladora de escudo simples para, em condições geológicas favoráveis, proceder à instalação do suporte do túnel simultaneamente ao processo de escavação. Devido à sua concepção este tipo de tuneladoras é particularmente adequado na escavação de túneis longos em maciços rochosos competentes que são interceptados por falhas preenchidas por materiais de piores características mecânicas.

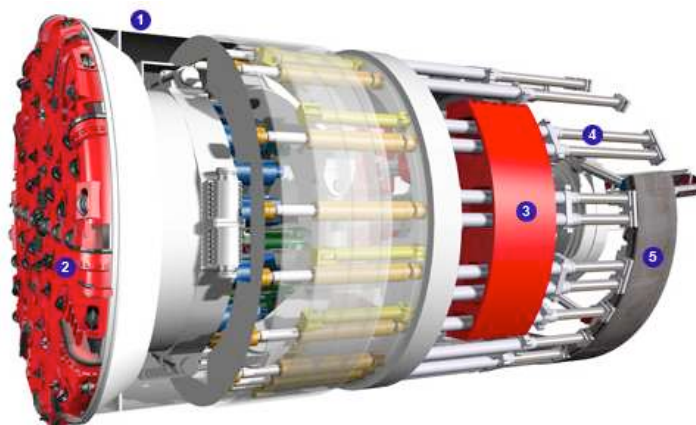


Fig. 2.19 - Tuneladora de escudo duplo [19]

A tuneladora de escudo duplo ou de escudo telescópico deve o seu nome ao escudo frontal extensível (1) que permite a movimentação independente da cabeça de corte (2), enquanto o corpo da tuneladora permanece imobilizado. No modo de operação normal as forças de reacção, torção e forças axiais são transmitidas aos apoios radiais (3). Isto permite a instalação simultânea do suporte do túnel durante a escavação. Esta característica aumenta significativamente as velocidades de avanço atingidas por estes equipamentos.

Concluído o ciclo de escavação, limitado pela máxima extensão do escudo frontal telescópico, os apoios radiais retraem-se e o corpo da tuneladora é impulsionado pelos cilindros hidráulicos auxiliares (4), que se apoiam nos suportes entretanto já instalados. A instalação dos suportes, constituídos por segmentos de betão pré-fabricados, processa-se de forma análoga ao utilizado na tuneladora de escudo simples, através de um braço robótico manobrado por um operador especializado sobre a protecção da parte posterior do escudo da tuneladora (5).

A colocação dos suportes em simultâneo com a escavação é referida na bibliografia [17] como o processo de execução de túneis contínuo. No entanto, a instalação dos suportes em simultâneo com a escavação só ocorre em condições geológicas-geotécnicas favoráveis. Neste caso, os apoios radiais da tuneladora transmitem ao maciço envolvente a totalidade das forças aplicadas durante o processo de escavação. Quando as características do maciço não lhe permitem suportar as forças transmitidas pelos apoios radiais, por exemplo na intersecção de uma falha, o escudo telescópico é retraído e a tuneladora passa a funcionar como uma tuneladora de escudo simples. A tuneladora prossegue a escavação apoiando-se apenas, pelos cilíndricos hidráulicos auxiliares, no último anel de betão instalado. Para proceder a uma nova sequência de escavação é necessário primeiro construir o anel de suporte onde se apoiam os cilindros hidráulicos auxiliares. Neste modo de operação, semelhante ao utilizado pela tuneladora de escudo simples, o processo de escavação e instalação do suporte é realizado sequencialmente. Este processo de construção de túneis é denominado de descontínuo.

Este tipo de tuneladora apresenta como grande vantagem o facto de permitir em simultâneo a escavação e a instalação dos suportes. Em circunstâncias normais, esta característica permite-lhe quase duplicar a velocidade de avanço comparativamente com as tuneladoras de escudo simples.

#### 2.4.5 RISCOS ESPECÍFICOS ASSOCIADOS AS TBM EM MACIÇOS ROCHOSOS

A aplicação de tuneladoras em túneis longos e de grande diâmetro, em condições geotécnicas variáveis, está sujeita a riscos específicos [17]:

- Tuneladoras sem escudo são equipamentos muito sensíveis, especialmente para grandes diâmetros, a rochas de baixa qualidade.
- Tuneladoras de escudo simples não alcançam altos desempenhos em rochas mais resistentes e são particularmente sensíveis a convergências e instabilidades na face de escavação.
- Tuneladoras de escudo duplo embora possam alcançar elevados desempenhos são sensíveis a convergências radiais dos túneis e instabilidades da sua face.

#### 2.4.6 PROBLEMAS NA ESCAVAÇÃO

Os problemas na escavação com recurso a tuneladoras podem ter origem em condições geotécnicas, mecânicas ou outras. Estes problemas ocorrem geralmente na face de escavação e resultam de alterações súbitas das condições geológicas-geotécnicas do maciço. Para minimizar estes riscos devem-se conduzir investigações preliminares cuidadas, especialmente sobre as zonas onde o maciço apresenta piores características, por exemplo, em falhas. As falhas são zonas do maciço fortemente alteradas pelo movimento da rocha, que apresentam condições de estabilidade muito inferiores ao maciço rochoso envolvente. O atravessamento de falhas durante a escavação, requer frequentemente a aplicação de medidas especiais de estabilização como a aplicação de enfilagens, congelamento ou outro tipo de suporte do maciço rochoso.

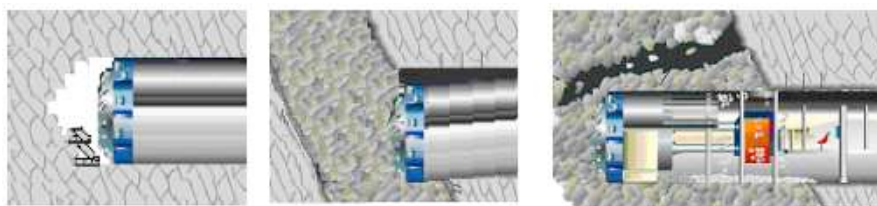


Fig. 2.20 – Problemas na escavação com tuneladoras devido a condicionantes geotécnicas [1]

No primeiro exemplo da figura 2.20, a escavação num maciço rochoso altamente fracturado provocou o colapso parcial da face para dentro da tuneladora, com consequente perda de contacto entre a cabeça de corte e a face da escavação. No segundo exemplo, ilustra-se um desvio vertical que ocorreu no atravessamento de uma falha por insuficiência de resistência do material em suportar o peso da tuneladora. No terceiro exemplo, a baixa resistência ao corte do material da falha originou a rotura do topo da escavação.

Em túneis escavados com tuneladoras a convergência radial excessiva pode encravar o equipamento e se estas condições não forem previstas, à partida, as soluções possíveis passam pelo desmantelamento ou a destruição da tuneladora, o que acarreta um enorme custo e atraso na conclusão da obra. As tuneladoras podem ser concebidas para prevenir este tipo de situações com sistemas de emergência que por exemplo, lhe conferem uma potência auxiliar e aumentam a velocidade de avanço instantaneamente, de forma a escapar a uma situação de rápida convergência. Estes problemas podem ser evitados através da pré-investigação e tratamentos do terreno, anteriores à escavação, das zonas mais sujeitas a este tipo de convergência. Uma estimativa inicial destes problemas pode ser obtida através do gráfico proposto por Hoek [9].

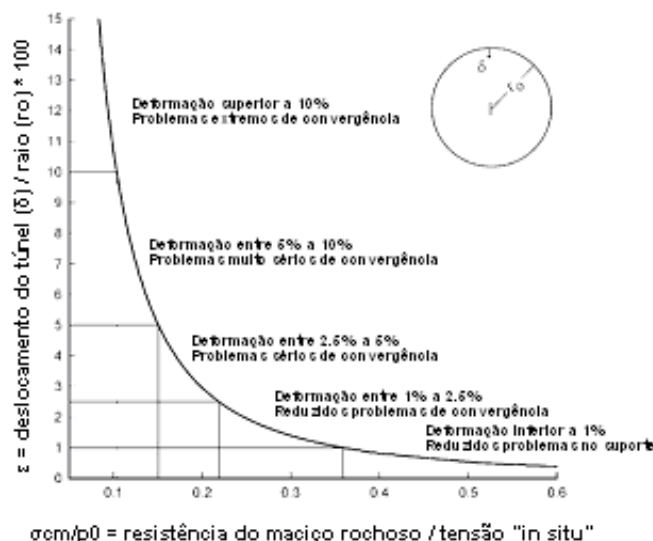


Fig. 2.21 – Grau de magnitude da convergência radial do túnel, adaptado de Hoek [9]

Os problemas específicos abordados são apenas alguns dos possíveis. Neste sentido, apresenta-se de seguida uma lista de problemas observados em diversos casos de obra para tuneladoras e maciços rochosos distintos e a sua influência no custo final do projecto.

Quadro 2.10 – Possíveis problemas na escavação com tuneladoras e seu impacto no custo do projecto [10]

| Problema na escavação                                                  | Descrição                                                 | Classe de consequência |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| Eventos relacionados com as condições geológicas-geotécnicas do maciço |                                                           |                        |
| Problemas na face de escavação                                         | Colapso da face                                           | II-III                 |
|                                                                        | Colapso da face extensível à superfície                   | II-III                 |
|                                                                        | Colapso com a afluência de água                           | III                    |
|                                                                        | Encravamento                                              | II                     |
|                                                                        | Afluência excessiva de água                               | II-III                 |
|                                                                        | Perda de contacto entre a cabeça de corte da TBM e a face | II                     |
| Outros                                                                 | Fuga de gás metano                                        | II-III                 |
| Inaptabilidade do equipamento da tuneladora as condições do maciço     | Sistemas de transporte                                    | II-III                 |
|                                                                        | Discos de corte                                           | II-III                 |
|                                                                        | Apoios radiais                                            | IV                     |
| Problemas no túnel                                                     | Segmentos                                                 | I                      |
| Problemas à superfície                                                 | Subsidências                                              | I                      |
|                                                                        | Assentamentos                                             | I-III                  |
| Eventos devidos a falha do equipamento                                 |                                                           |                        |
| Cabeça de corte                                                        | Componente principal                                      | I                      |
|                                                                        | Correia roscada (EPB)                                     | II                     |
| Escudo                                                                 | Face ou posterior                                         | I                      |
|                                                                        | Componente principal                                      | II                     |
| Vários                                                                 |                                                           |                        |
| Falhas no equipamento                                                  | Hidráulicos                                               | I                      |
|                                                                        | Ventilação                                                | I                      |



## 3

## ANÁLISE FINANCEIRA

## 3.1 PREVISÃO DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO

Um dos aspectos frequentemente utilizados para a comparação de desempenho dos diferentes métodos construtivos é a velocidade de avanço.

$$VA = TP \times U \quad (3.1)$$

- VA – Velocidade de Avanço (progressão/tempo, m/semana)
- TP – Taxa de Penetração (progressão/tempo, m/h)
- U – Taxa de Utilização (%)

O objectivo do construtor/projectista é sempre maximizar a velocidade de avanço através da maximização da taxa de penetração e da taxa de utilização dos equipamentos. Através da velocidade de avanço é possível estimar o tempo de construção do túnel. O tempo de construção é o factor mais relevante na selecção do método construtivo, isto porque uma redução do tempo de escavação resulta geralmente numa redução importante dos custos da obra.

## 3.1.1 ROÇADORAS

As roçadoras são o equipamento mecânico de escavação faseada mais utilizado em maciços rochosos brandos e médios. Os benefícios da escavação com roçadoras incluem um aumento significativo da segurança em obra, a redução do suporte necessário e do número de operários. As principais vantagens destes equipamentos são a sua mobilidade, flexibilidade e baixo custo inicial (aquisição ou aluguer). A mobilidade permite a estes equipamentos acompanhar o avanço da frente de escavação, permite que estes se afastem da frente para dar lugar a equipamentos de escavação por explosivos e permite ainda que estes sejam recolocados com relativa facilidade em caso, por exemplo, de avaria. A flexibilidade destes equipamentos permite uma rápida alteração das condições operacionais, como a alteração do tipo ou tamanho da secção transversal e variações no gradiente ou na curvatura do túnel. Na escavação com roçadoras o acesso à face do túnel é possível para a reparação ou substituição das ferramentas de corte.

A principal limitação destes equipamentos reside na sua capacidade de escavar maciços rochosos mais resistentes. Actualmente, as roçadoras super-pesadas podem escavar economicamente maciços rochosos com resistência à compressão uniaxial até 160MPa, desde que estes apresentem descontinuidades ou planos de estratificação favoráveis e um baixo valor de RQD. A presença de descontinuidades ou outras fragilidades no maciço rochosos facilita a sua escavação, uma vez que se torna possível ripar e extrair os blocos rochosos, em vez de os cortar. Se a rocha é bastante abrasiva ou

a taxa de consumo dos bits é superior a 1 bit/m<sup>3</sup>, a escavação por este método torna-se economicamente desvantajosa, devido à frequente substituição das ferramentas de corte a que está associado um aumento dos custos de manutenção e de vibrações na máquina [20]. A escolha do tipo de roçadora, bem como a selecção das ferramentas de corte e a sua disposição, deve ser optimizada para as condições geológicas-geotécnicas esperadas do maciço rochoso.

Quadro 3.1 – Classificação das roçadoras proposta pelo ITA e AIETS [21]

| Classe       | Peso (t) | Potência (kW) | Secção transversal máxima (m <sup>2</sup> ) | Resistência à compressão uniaxial (MPa) | RQD (%) |
|--------------|----------|---------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|
| Leve         | 8-40     | 50-170        | 25                                          | 40-60                                   | -       |
| Média        | 40-70    | 160-230       | 30                                          | 60-90                                   | -       |
| Pesada       | 70-110   | 250-300       | 40                                          | 90-110                                  | <80     |
| Super Pesada | >100     | 350-400       | 45                                          | 110-140                                 | <60     |

O Earth Mechanics Institute da Universidade de Minas Colorado e o Departamento de Minas da Universidade Técnica de Istambul reuniram numa base de dados numerosos casos de obras mineiras e civis por todo o mundo, onde se utilizaram diferentes classes de roçadoras em condições geotécnicas distintas. Estes parâmetros foram relacionados com o desempenho obtido por estes equipamentos.

A previsão da capacidade de corte instantânea e do rendimento da máquina, para a estimação da sua velocidade de avanço, tem um papel fundamental no planeamento da obra e na determinação da economia da escavação. Neste sentido, diversos autores desenvolveram métodos para a previsão da capacidade de corte instantânea das roçadoras. Os métodos propostos por Farmer, Garrity (1987) e Poole (1987) têm por base o conceito da energia específica, que é a energia gasta para escavar um metro cúbico de material rochoso. Estes autores mostraram que para um roçadora de determinada potência, a capacidade de corte instantânea pode ser estimada através de uma relação com a energia específica dispendida [22].

$$SE = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (3.2)$$

- SE - Energia específica (MJ/m<sup>3</sup>)
- $\sigma_c$  – Resistência a compressão uniaxial
- E – Modulo de Elasticidade

Com base em estudos detalhados em laboratório e investigação das condições “in situ” realizados por McFeat-Smith e Fowell (1979), estes autores demonstraram que existe uma relação entre a energia específica obtida através de ensaios “core cutting tests” e a capacidade de corte instantânea para roçadoras de classe média e super pesada [21].

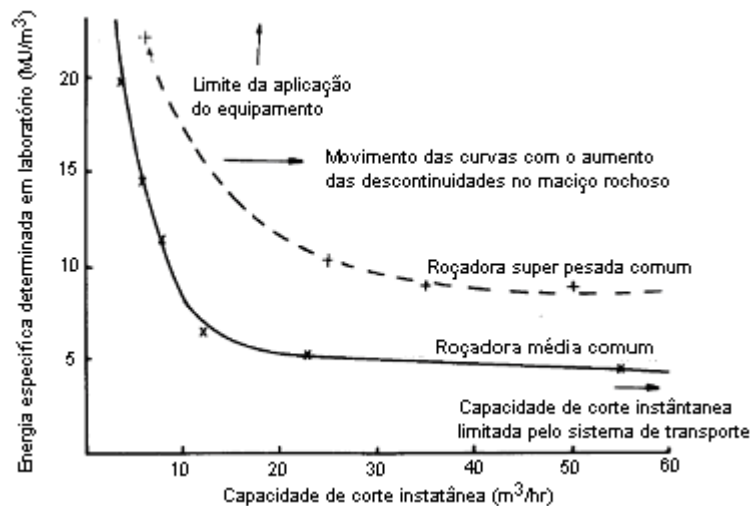


Fig. 3.1 – Relação entre a energia específica e a capacidade de corte instantânea [21]

A aferição da capacidade de corte instantânea, através de ensaios “core cutting test”, é criticada na literatura por não incluir os efeitos devidos à fracturação do maciço na estimação do desempenho. Neste sentido, Bilgin *et al.* 1997 desenvolveu uma expressão empírica para a estimação do desempenho da roçadora que tem em consideração a presença de fracturas no maciço, através da introdução do índice RQD [22].

$$ICR = 0,28 \cdot P \cdot (0,974)^{RMCI} \quad (3.3)$$

$$RMCI = \sigma_c \cdot \left( \frac{RQD}{100} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.4)$$

- ICR – Capacidade de corte instantânea (m³/h)
- RMCI – Índice relativo a facilidade de corte do maciço rochoso
- $\sigma_c$  – Resistência a compressão uniaxial da rocha (MPa)
- P – Potência da cabeça de corte em (Hp)
- RQD – Designação da qualidade do maciço rochoso (%)

Os ensaios de corte de larga escala são a base de um dos métodos mais reconhecidos na previsão da capacidade de corte instantânea de qualquer equipamento mecânico. O método proposto por Rostami e Ozdemir (1996), de previsão do desempenho, relaciona a potência da cabeça de corte com o valor da energia específica dispendida, obtida através de ensaios de larga escala, e um coeficiente de transferência de energia, entre a cabeça de corte e o maciço rochoso [21] [22].

$$ICR = k \frac{P}{SE_{opt}} \quad (3.5)$$

- P – Potência da cabeça de corte em (kW)
- $SE_{opt}$  – Energia específica ótima (KWh/m³)
- k – Coeficiente de transferência de energia

O coeficiente de transferência de energia segundo Rostami *et al.* (1994) varia entre 0,45 e 0,55 para roçadoras e entre 0,85 e 0,90 para tuneladoras [21] [22].

Através dos ensaios de larga escala, realizados sobre amostras de dimensões consideráveis de material rochoso, representativas das condições expectáveis na escavação, é possível estimar a energia específica dispendida. O parâmetro obtido por estes ensaios é o mesmo que o obtido nos ensaios “core cutting test” realizados sobre amostras de dimensões bastante inferiores. A grande vantagem dos ensaios de larga escala, na previsão do desempenho das roçadoras, consiste na determinação da energia específica necessária para escavar o maciço de acordo com o espaçamento e dimensão das ferramentas de corte. Através dos resultados obtidos é possível aferir qual a disposição óptima destas ferramentas, ou seja, a que garante o menor dispêndio de energia e consequentemente maximiza a capacidade de corte instantânea do equipamento. A energia mínima necessária à escavação corresponde o conceito da energia específica óptima ( $SE_{opt}$ ), utilizada no modelo proposto Rostami e Ozdemir (1996) [21] [22].

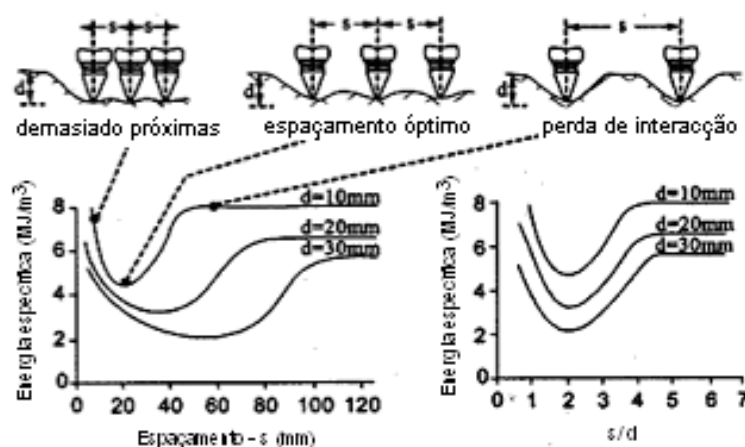


Fig. 3.2 – Resultados obtidos num ensaio de corte de larga escala [21]

Os resultados destes ensaios evidenciaram que para ferramentas de corte mais compridas a energia específica necessária diminui. Este factor está relacionado com o conceito de energia específica, que é a energia gasta para escavar um metro cúbico de material. Ora se as ferramentas de corte são maiores o volume de material escavado aumenta e por isso é menor a energia específica gasta. No entanto, o aumento do comprimento dos bits é condicionado pela potência de corte da roçadora. Este parâmetro deve ser assim ajustado de acordo com as condições geotécnicas-geológicas expectáveis.

A distribuição das ferramentas de corte é um parâmetro fundamental para aumentar a eficiência do equipamento. Se as ferramentas estiverem bastante próximas a área escavada diminui logo a energia específica gasta aumenta. Se as ferramentas estiverem demasiado afastadas o efeito de interacção entre os bits perde-se, e deste modo aumenta também a energia específica dispendida. Neste caso específico, verifica-se que para uma razão entre o espaçamento e o comprimento dos bits de dois é minimizada a energia específica dispendida; consequentemente para esta distribuição a capacidade de corte instantânea é maximizada.

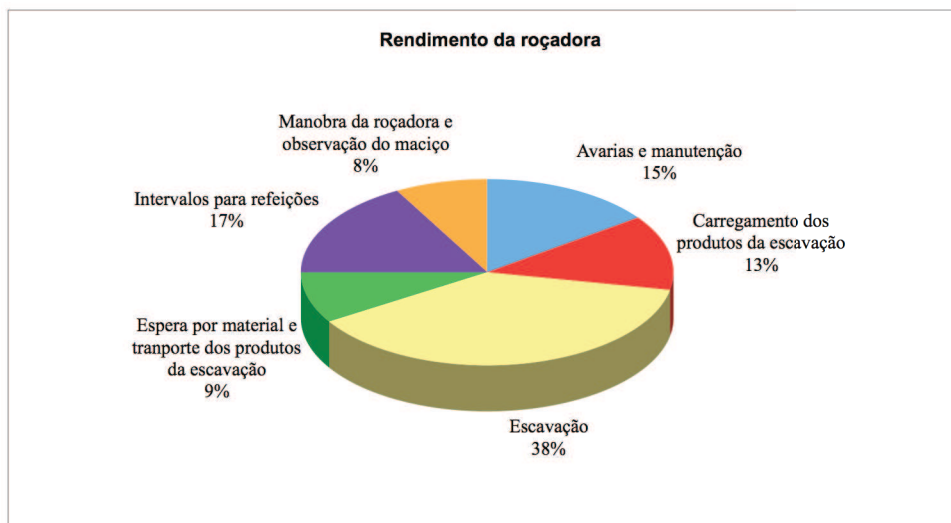


Fig. 3.3 - Distribuição das actividades na escavação com recurso a roçadoras [22]

A taxa de penetração alcançada pela roçadora depende da capacidade de corte instantânea do equipamento e do tamanho da secção transversal a escavar.

A taxa de utilização do equipamento é um parâmetro mais difícil de quantificar mas para situações correntes, em escavações com afluência de água pouco significativas, pode-se considerar um valor da ordem do apresentado na figura 3.3. A presença de água na escavação, geralmente, aumenta a capacidade de corte instantânea do equipamento por facilitar o desmonte do material mas diminui a sua taxa de utilização, devido ao maior dispêndio temporal em actividades associadas à drenagem da água.

### 3.1.2 ESCAVAÇÃO COM RECURSO A EXPLOSIVOS

A previsão do desempenho de uma escavação realizada com recurso a explosivos difere bastante da abordagem adoptada para as escavações realizadas com equipamentos mecânicos. Neste método de escavação a taxa de penetração e a taxa de utilização não influenciam determinantemente a velocidade de avanço. Estes conceitos estão normalmente mais associados a equipamentos mecânicos, a taxa de penetração está associada a velocidade instantânea de corte do equipamento e a taxa de utilização ao seu rendimento. No caso do método com recurso a explosivos a escavação é realizada por desmonte, quase instantaneamente, e portanto a aplicabilidade destes conceitos é limitada aos equipamentos mecânicos utilizados na perfuração, para a instalação dos explosivos. O desempenho da escavação com recurso a explosivos pode variar até 20% devido à facilidade de perfuração do material e ao número necessário de furos para a instalação dos explosivos [23].

O investimento inicial e o tempo de entrega de um novo “jumbo” é bastante reduzido e o equipamento está quase imediatamente operacional quando chega à obra. O investimento inicial para proceder ao início da escavação é baixo e os custos com a escavação não variam significativamente; dependem essencialmente do número de furos, consumo de explosivos e do custo de substituição das ferramentas de corte. A utilização de explosivos tem um efeito económico nefasto nos custos das escavações, devido aos fenómenos de sobreescavações, que conduzem a um maior volume de betão dispendido para a regularização da superfície do túnel, e a fracturação do maciço, que aumenta as necessidades de suporte estrutural e a afluência de água ao túnel, com maiores gastos associados à bombagem.

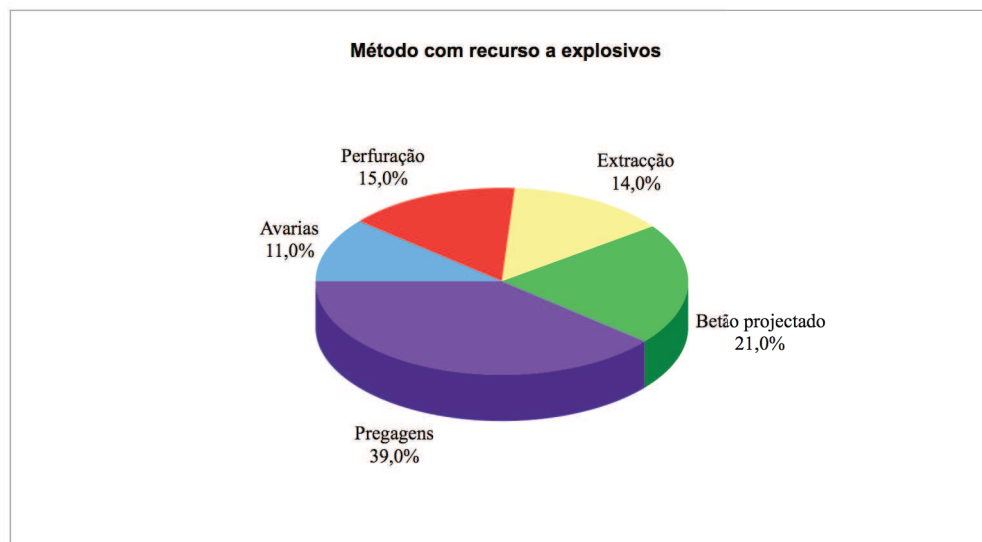


Fig. 3.4 – Distribuição temporal das actividades, adaptado do Hallandsridge Tunnel project [10]

Analisando a distribuição temporal das actividades de uma escavação com recurso a explosivos, pode-se concluir que o principal factor que condiciona a velocidade de avanço da escavação é a instalação do suporte primário do túnel (60%). A definição das características geotécnicas do maciço, para uma estimativa do tipo e número de suportes a instalar, pode ser realizada por diferentes classificações. Na Alemanha, Áustria e Suíça a classe do maciço é a mais utilizada. Na definição destas classes está implícita a influência do suporte na velocidade de avanço da escavação. O índice Q devido a sua enorme difusão é uma classificação bastante utilizada [10].

Quadro 3.2 – Classificação do maciço rochoso e das necessidades de suporte, segundo o índice Q [10]

| Classe do maciço | Índice Q   | Descrição Geotécnica                              | Suporte a instalar                                                                                          |
|------------------|------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | 40-1000    | M. rochoso muito bom                              | Nenhum                                                                                                      |
| 2                | 10-40      | Maciço rochoso bom                                | Pregagens / ancoragens localizadas                                                                          |
| 3                | 4-10       | Maciço rochoso médio                              | Betão projectado na coroa do túnel, malhas metálicas e pregagens                                            |
| 4                | 1-4        | Maciço rochoso fraco                              | Betão projectado na coroa e hasteais do túnel, malhas metálicas e pregagens                                 |
| 5                | 0,1-1      | Maciço rochoso muito fraco                        | Betão projectado, malhas e cambotas metálicas, enfilagens                                                   |
| 6                | 0,01-0,1   | Maciço rochoso altamente fracturado e desagregado | Betão projectado, malhas e cambotas metálicas, enfilagens em toda a secção                                  |
| 7                | 0,001-0,01 |                                                   | Betão projectado, malhas e cambotas metálicas, enfilagens em toda a secção e suporte da frente de escavação |

No método com recurso a explosivos pode-se considerar como referência, uma boa produção semanal de 80m, para uma secção transversal de 50m<sup>2</sup>, para secções transversais mais pequenas uma boa produção ronda os 100m por semana [23].

A velocidade de avanço diminui drasticamente com a deterioração das condições de estabilidade do maciço, devido à necessidade de instalar um maior número de suportes para garantir a estabilidade do túnel. Uma estimativa inicial da velocidade de avanço pode ser obtida através da correlação proposta por Chauhan [10] [24].

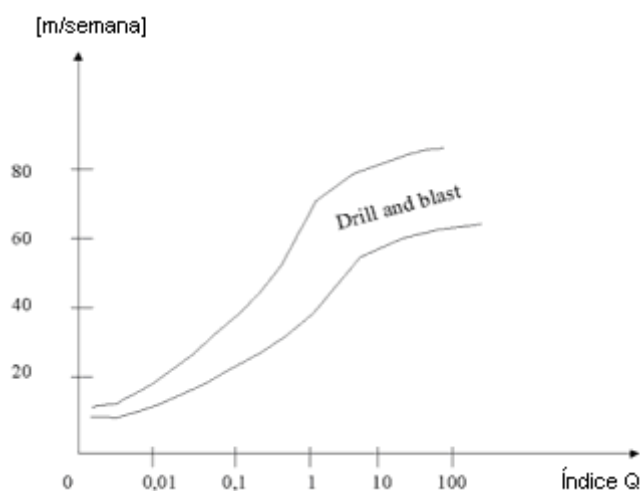


Fig. 3.5 - Relação entre o índice Q e a velocidade de avanço [10] [24]

A poluição do ar gerada pela explosão é um problema em túneis escavados por D-B, devido aos gases tóxicos libertados e à redução de visibilidade no interior do túnel. A ventilação provisória deve ser dimensionada para solucionar ou pelo menos reduzir este problema. De qualquer forma, o processo de escavação sofre uma interrupção significativa devido à utilização dos explosivos. Antes da explosão são produzidos uma série de avisos sonoros para a remoção de todo o equipamento e operários da frente do túnel. Quando estão reunidas todas as condições de segurança procede-se ao desmonte do material por explosivos. Na proximidade da frente do túnel estão instalados equipamentos para a medição da qualidade do ar e opacidade. Quando a concentração de certos gases e partículas estão dentro do nível aceitável para o ser humano é permitido o acesso novamente à frente de escavação. Todo este processo é bastante exigente em termos temporais, na distribuição temporal das actividades presume-se que este tempo esteja contabilizado na parcela referente à perfuração.

### 3.1.3 ESCAVAÇÃO COM RECURSO A TUNELADORAS

As velocidades de avanço atingidas por uma tuneladora são, regra geral, bastante mais elevadas do que as atingidas em escavações com recurso a explosivos. No entanto, as elevadas velocidades de avanço atingidas por estes equipamentos dependem bastante da adaptabilidade da tuneladora às propriedades do maciço rochoso, podendo de acordo com estas propriedades variar mais de 500%. Uma boa produção semanal para uma tuneladora que escava um maciço rochoso competente pode variar, dependendo da secção a escavar, entre os 150 a 400m por semana [23].

Um outro factor que influencia determinantemente a velocidade de avanço alcançada é a taxa de utilização da tuneladora. Estes equipamentos são bastante complexos, estando por isso sujeitos a

avarias e a um rigoroso plano de manutenção, nomeadamente de substituição dos discos de corte. Por estas razões as taxas de utilização das tuneladoras dificilmente superam os 50%.

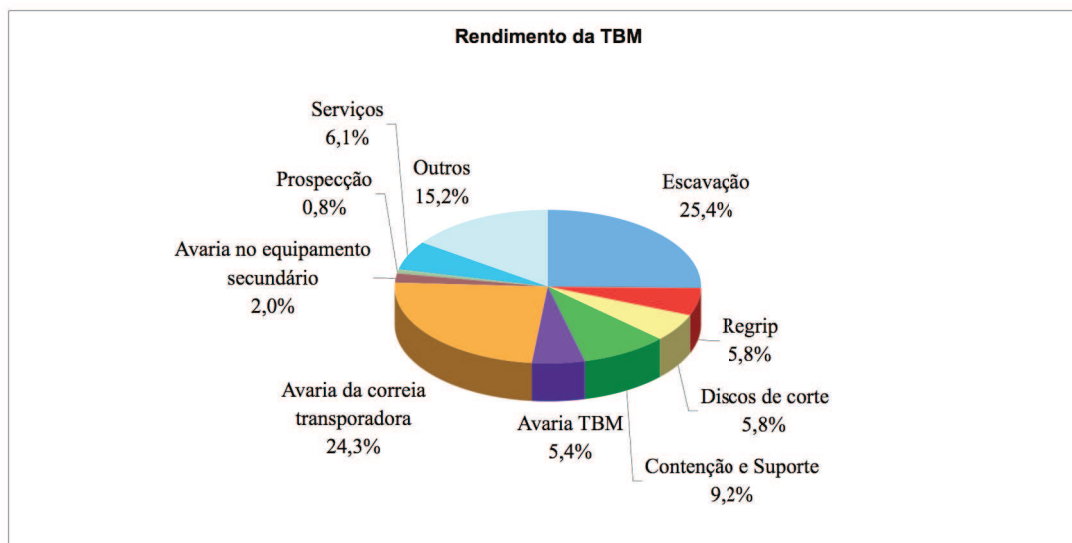


Fig. 3.6 – Distribuição das actividades na escavação com recurso a tuneladoras [25]

Devido à enorme variabilidade da performance das tuneladoras, a correcta previsão do seu desempenho é vital para a estimação do tempo e custos de execução da obra; bem como para proceder a uma análise financeira de comparação entre os diferentes métodos construtivos. Os três modelos de previsão do desempenho de tuneladoras mais utilizados e que conduzem a resultados mais fidedignos são: o Norwegian Institute of Technology (NTH), o Colorado School of Mines (CSM) e o modelo proposto por Barton *et al.*,  $Q_{TBM}$ .

### 3.1.3.1 Norwegian Institute of Technology

O modelo proposto pelo NTH resulta do estudo dos parâmetros obtidos em 33 casos de obra, que representam cerca de 230km de túneis escavados com recurso a tuneladoras, na Noruega e em outros países. Neste modelo empírico, a formulação resultou de um conjunto de regressões entre as propriedades do maciço, rocha intacta, parâmetros da tuneladora e taxas de penetração incluindo, deste modo, no modelo a complexidade do comportamento do terreno e equipamento de escavação [26].

Na base deste método encontram-se três ensaios [27]:

- Brittleness test “S<sub>20</sub>”, mede a % de passados através do peneiro de 11,2mm após 20 impactos de um peso de 14 kg sobre uma amostra do material rochoso que fica retido entre o peneiro de 16mm e 11,2mm. Este ensaio mede a facilidade em se iniciarem e propagarem as fracturas (facilidade de desmonte do material);
- Sievers’ J índice “Sj”, mede a penetração de um broca de propriedades e geometria bem definidas sobre um provete ao fim de 200 rotações. Este ensaio avalia a dificuldade de penetração do material;
- Abrasion testing steel “AVS”, mede a perda de peso em miligramas, ao fim de 20 rotações, de um bit de aço de um disco de corte novo pressionado por um peso de 10kg contra uma camada de rocha pulverizada com menos de 1mm de espessura.

Estes ensaios permitem obter dois parâmetros fundamentais para o modelo, o Drilling Rate Index (DRI) e o Cutter Life Index (CLI). O DRI e o estado de fracturação da rocha são os dois parâmetros do maciço que mais influenciam a taxa de penetração da tuneladora [26].

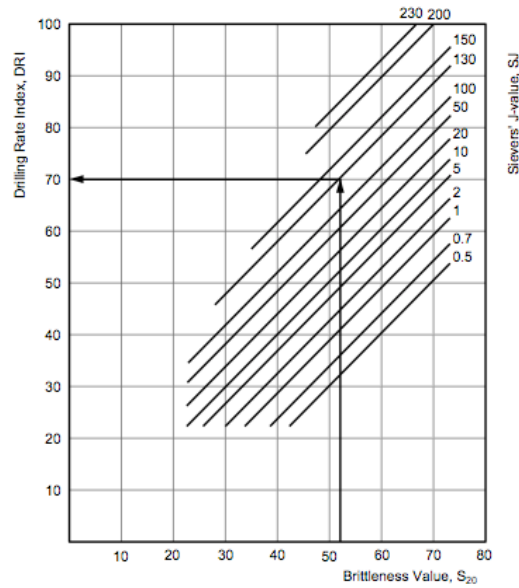


Fig. 3.7 – Determinação do DRI através dos índices  $S_{20}$  e  $S_j$  [28]

Através do CLI é possível obter uma estimativa da duração dos discos de corte. Este parâmetro permite estimar o custo associado à substituição destes discos e o tempo dispendido na sua substituição. A substituição dos discos de corte afecta significativamente a velocidade de avanço da escavação.

$$CLI = 13,84 \cdot \left( \frac{S_j}{AVS} \right)^{0,3847} \quad (3.6)$$

Um intervalo de valores para os índices DRI e CLI, caso estes não sejam determinados pelos ensaios específicos apresentados, podem ser estimados a partir de ábacos que relacionam estes índices com o tipo de rocha e a sua resistência à compressão uniaxial [26] [28].

O método do NTH permite determinar a velocidade de corte instantânea ( $i$ ), medida em mm/rev (mm/revolução), através de uma relação com a força equivalente ( $M_{EQV}$ ), simplificada a força transmitida em média a cada disco de corte, e o denominado factor de fracturação equivalente ( $K_{EQV}$ ).

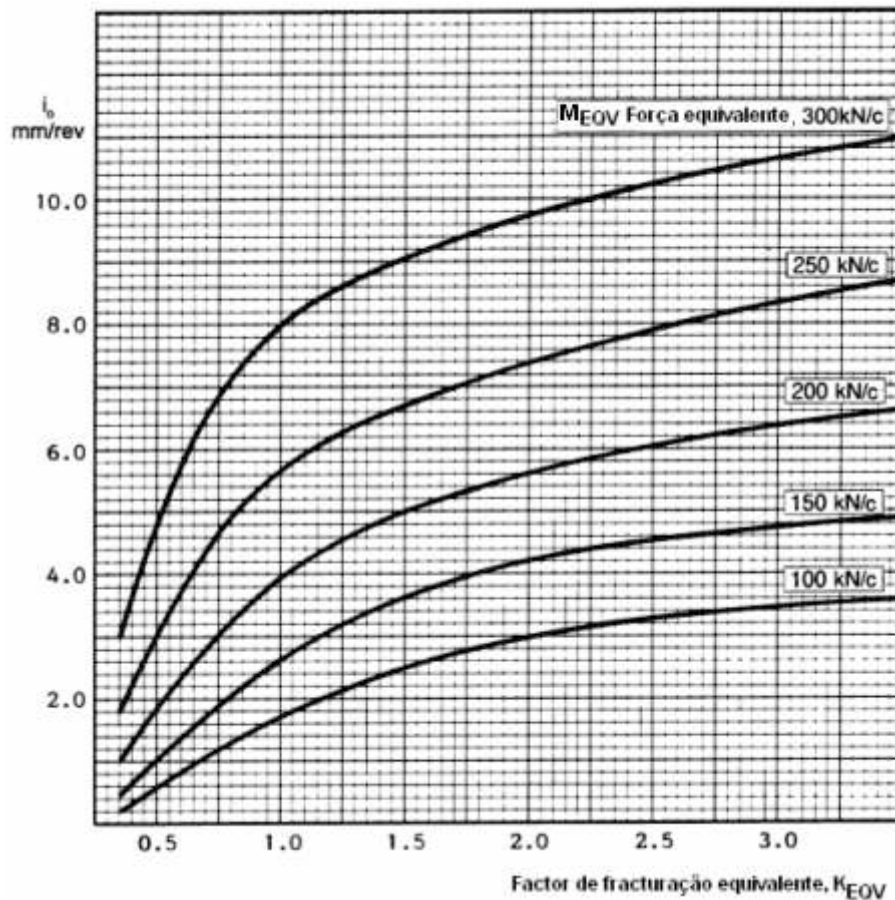


Fig. 3.8 - Ábaco para a aferição da velocidade de corte instantânea, adaptado do ITA [26]

O factor de fracturação equivalente ( $K_{EQV}$ ) expressa as propriedades do maciço rochoso ao incluir um índice representativo da fracturação do maciço ( $K_S$ ), ajustado do valor de DRI ( $K_{DRI}$ ) que é igual à unidade para um valor de DRI de 49.

$$K_{EQV} = K_S \times K_{DRI} \quad (3.7)$$

O factor de fracturação ( $K_S$ ) resulta da combinação da classe de fracturação do maciço rochoso com o ângulo que o eixo de túnel faz com estes planos de fraqueza. A fracturação é o parâmetro mais relevante na escavação de túneis com tuneladoras, compreendendo as descontinuidades e fissuras existentes na rocha. Os planos de fraqueza por apresentarem uma baixa ou reduzida resistência ao corte facilitam a escavação. Quanto menor a distância entre os planos de fraqueza maior é a sua influência na velocidade de corte instantânea da tuneladora.

As descontinuidades são fracturas no maciço que podem ser observadas em toda a envolvente do túnel. As fissuras são fracturas descontínuas que só podem ser observadas em parte da envolvente do túnel.

Quadro 3.3 – Classes de fracturação (Planos de fraqueza) [29]

| Descontinuidades |                 | Fissuras |                 |
|------------------|-----------------|----------|-----------------|
| Classe           | Espaçamento (m) | Classe   | Espaçamento (m) |
| 0                | >1,6            | 0        | >1,6            |
| 0-I              | ≈1,6            | I        | 0,8-1,6         |
| I                | 0,8-1,6         | II       | 0,4-0,8         |
| I-II             | 0,4-0,8         | II-III   | 0,2-0,4         |
| II               | 0,2-0,4         | III      | 0,1-0,2         |
| II-III           | 0,1-0,2         | III-IV   | 0,1-0,05        |
| >III             | Não valido      | IV       | <0,05           |

O ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza é dado pela seguinte equação:

$$\alpha = \arcsin(\sin \alpha_f - \sin(\alpha_t - \alpha_s)) \quad (3.8)$$

Os ângulos ( $\alpha_f$ ) e ( $\alpha_s$ ) são respectivamente, a orientação e o pendor dos planos de fraqueza. O ângulo ( $\alpha_t$ ) refere-se a orientação do túnel.

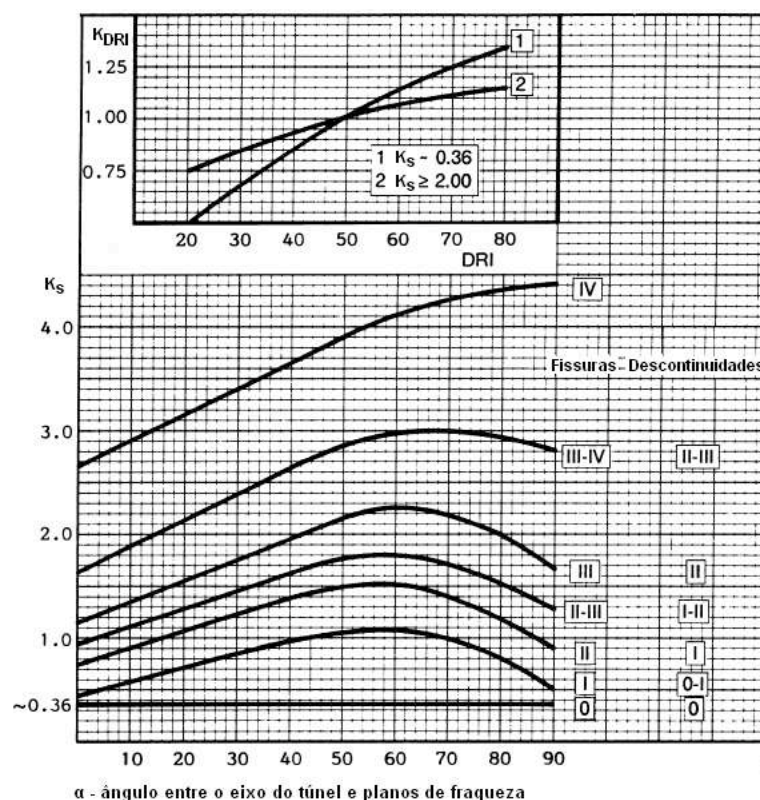


Fig. 3.9 – Ábaco para a determinação do grau de fracturação equivalente, adaptado do ITA [26]

A força equivalente ( $M_{EQV}$ ) é um factor que tem em conta a força transmitida em média a cada disco de corte da tuneladora ( $M_B$ ). Este parâmetro ( $M_{EQV}$ ) é ajustado de acordo com o espaçamento médio ( $K_A$ ) e o diâmetro dos discos de corte ( $K_D$ ). Quando os discos de corte têm um diâmetro de 483mm e o seu espaçamento médio é de 70mm os factores de correcção  $K_A$  e  $K_D$  são iguais à unidade.

$$M_{EQV} = M_B \times K_A \times K_D \text{ (kN / disco)} \quad (3.9)$$

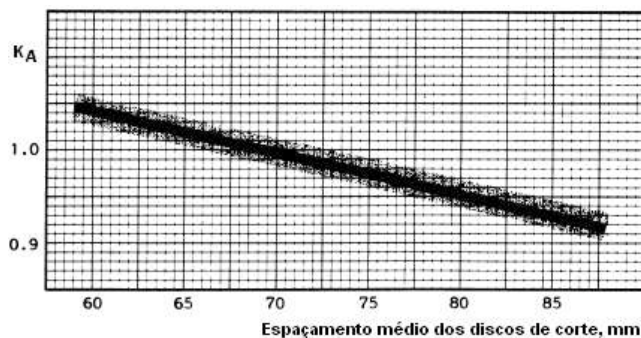


Fig. 3.10 – Factor correctivo ao espaçamento médio dos discos de corte,  $K_A$

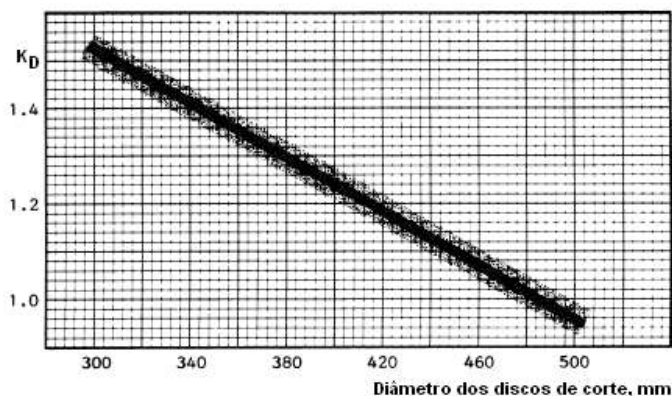


Fig. 3.11 – Factor correctivo ao espaçamento dos discos de corte,  $K_D$

A força transmitida em média a cada disco de corte ( $M_B$ ) pode ser obtida dividindo a força de impulsão instalada na tuneladora pelo número total de discos de corte. A admissão de uma força média transmitida aos discos de corte é uma simplificação da distribuição de forças na cabeça de corte. A correcta simulação desta distribuição de forças pelos discos de corte obrigaria a introdução de pelo menos dez novos parâmetros, complicando bastante o modelo. A simplificação efectuada não se traduz numa diferença substancial na previsão da velocidade de corte instantânea (i) [30].

A força transmitida em média a cada disco de corte é no entanto limitada pela sua capacidade resistente (figura 3.12).

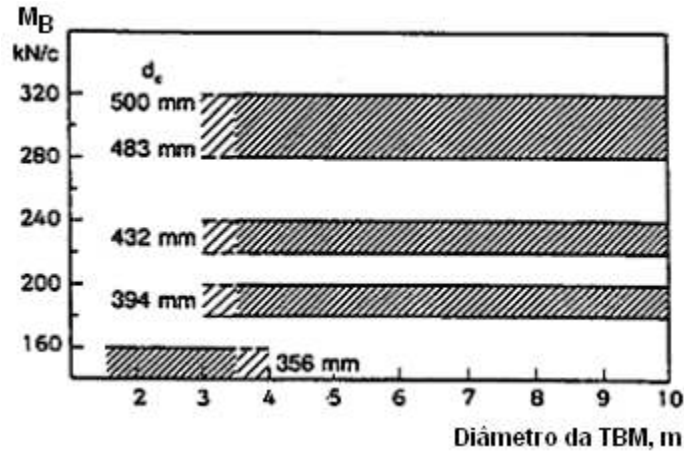


Fig. 3.12 – Força máxima aplicável aos discos de corte de acordo com o seu diâmetro, adaptado do ITA [26]

A taxa de penetração ( $I$ ) é o produto entre a velocidade de corte instantânea ( $i$ ) e as rotações por minuto da cabeça de corte da tuneladora. As rotações por minuto (rpm) da tuneladora estão por sua vez limitadas pela velocidade linear máxima aplicável aos discos de corte ( $V$ ), que no caso dos discos de 432mm, são de 160m/min. As rotações por minuto dependem também do diâmetro da tuneladora ( $D$ ).

$$rpm = \frac{V}{\pi D} \quad (3.10)$$

Determinadas as rpm da tuneladora, a taxa de penetração ( $I$ ) obtém-se a partir da seguinte expressão:

$$I = i \times rpm \times \frac{60}{1000} (m/h) \quad (3.11)$$

Deve-se verificar se a potência instalada ( $P_N$ ) na tuneladora, fornece uma força de torção ( $T_{REQ}$ ) suficiente a rotação da cabeça de corte sempre que a taxa de penetração obtida é elevada ou o maciço rochoso é muito fracturado. Caso a potência instalada na tuneladora não seja suficiente para transmitir ao maciço a força de torção necessária para alcançar a taxa de penetração inicial ( $I$ ), deve-se reduzir a força de impulso da tuneladora até que a força de torção seja igual ou inferior a permitida pela potência instalada. Esta força de torção é a que corresponde a real taxa de penetração do equipamento.

$$T_{REQ} = 0,59 \times R_{TBM} \times N_{TBM} \times M_{EQV} \times Kc \quad (kN \cdot m) \quad (3.12)$$

- 0,59 - Posição relativa do disco de corte médio na cabeça de corte
- $R_{TBM}$  - Raio da cabeça de corte
- $N_{TBM}$  - Número de discos de corte na cabeça da tuneladora
- $M_{EQV}$  - Força equivalente por disco de corte
- $Kc$  - Coeficiente de resistência ao rolamento dos discos de corte

$$Kc = C_c \times i^{0,5} \quad (3.13)$$

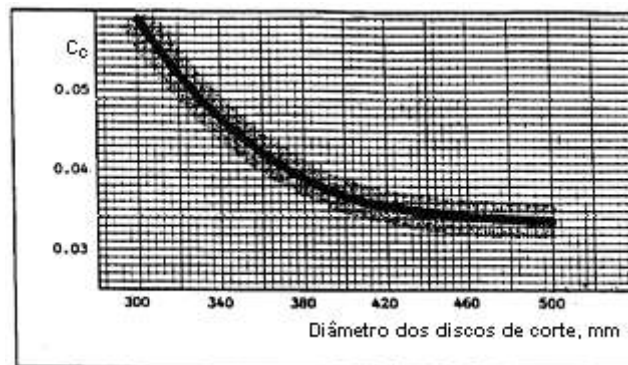


Fig. 3.13 – Variação do  $C_c$  com o diâmetro dos discos de corte, adaptado do ITA [26]

A potência instalada ( $P_N$ ) necessária para transmitir à cabeça de corte uma força de torção suficiente a sua rotação é dada por:

$$P_N = T_{REQ} \times 2\pi \times \frac{rpm}{60} \quad (kW) \quad (3.14)$$

A velocidade de avanço, medida em m/semana, depende: da taxa de penetração (m/h), do número de horas de trabalho por semana e da taxa de utilização do equipamento. A taxa de utilização do equipamento é a percentagem do tempo dispendido efectivamente na escavação em relação ao tempo total dispendido.

$$T_B = T - T_T - T_C - T_{TBM} - T_{BAK} - T_A \quad (3.15)$$

O tempo de escavação ( $T_B$ ) pode ser obtido através da subtracção ao tempo total de horas de trabalho, por semana ( $T$ ), dos tempos dispendidos em outras actividades, como:

- $T_T$  – Recolocação dos apoios da tuneladora (depende da extensão máxima dos macacos hidráulicos, que anda entre os 1,5 e 2m, em média 4 a 5 minutos);
- $T_C$  – Substituição e inspecção das ferramentas de corte (depende da sua vida útil; tempo necessário à substituição dos discos de corte entre 30 a 60 min);
- $T_{TBM}$  - Manutenção e serviço da tuneladora;
- $T_{BAK}$  – Manutenção e serviço do equipamento de apoio;
- $T_A$  – Inclui outros tempos dispendidos (suporte do maciço rochoso em boas condições, espera pelo transporte dos produtos da escavação, prospecção e movimentação do laser da tuneladora, afluência de água, ventilação, limpeza, tempo de deslocação da tuneladora, alterações de turno e outros).

O tempo dispendido na manutenção e serviços da tuneladora, equipamento de apoio e outros influenciam determinantemente a taxa de utilização. No entanto, estes tempos estão também associados à taxa de penetração, porque para taxas mais elevadas existe uma maior facilidade de escavação do maciço com consequente redução das vibrações e menor desgaste da tuneladora. Desta

forma, para taxas de penetração mais elevadas, há um aumento da taxa de utilização do equipamento pois diminuem os tempo dispendidos em serviços e manutenções.

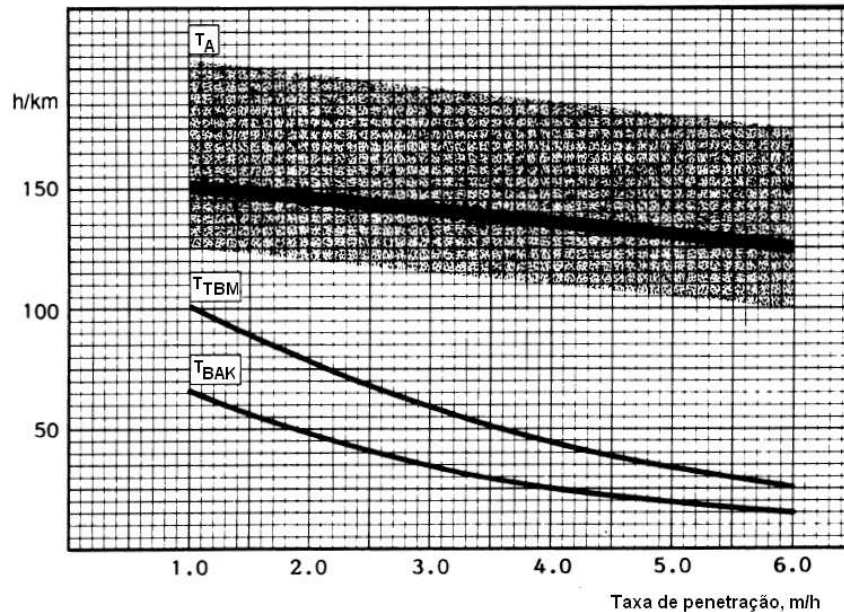


Fig. 3.14 – Relação entre  $T_{BM}$ ,  $T_{BAK}$  e  $T_A$  com a taxa de penetração, adaptado ITA [26]

A determinação da vida útil das ferramentas de corte é extremamente relevante na determinação da velocidade de avanço da escavação. Isto porque, devido ao seu peso elevado e ao reduzido espaço disponível, a substituição dos discos de corte é uma tarefa bastante complexa e demorada. O custo da substituição dos discos de corte é bastante elevado, por isso a não ser que apresentem um desgaste excessivo os discos de corte são reparados para recuperar o seu perfil inicial.

A determinação da vida útil dos discos de corte é fulcral para a avaliação do custo da escavação por metro de desenvolvimento. Segundo o modelo do NTH, a vida útil das ferramentas de corte depende de determinadas propriedades do maciço rochoso e de certas características da tuneladora.

Quadro 3.4 – Variáveis que condicionam a vida útil das ferramentas de corte, segundo o modelo NTH [29]

| Propriedades do maciço rochoso | Características da tuneladora          |
|--------------------------------|----------------------------------------|
| Cutter Life Index (CLI)        | Número de discos de corte              |
| Percentagem de quartzo (%)     | Diâmetro dos discos de corte           |
|                                | Diâmetro da tuneladora                 |
|                                | Rotações por minuto da cabeça de corte |

O tempo de vida útil médio dos discos de corte pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$H_H = (H_0 \times K_\phi \times K_Q \times K_{RPM} \times K_N) / N_{TBM} \quad (h/disco) \quad (3.16)$$

A variável  $H_0$  (figura 3.15) permite estimar a duração dos discos de corte de acordo com o seu diâmetro e com as características do maciço (CLI). As restantes variáveis são factores correctivos a esse desgaste.

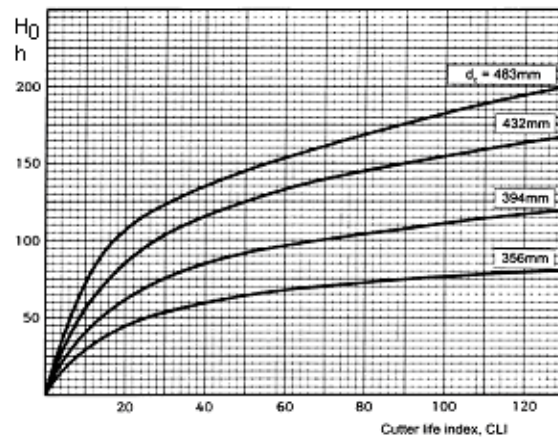


Fig. 3.15 – Variação do  $H_0$  com o diâmetro dos discos de corte e CLI, adaptado do ITA [26]

O factor  $K_\phi$  é um factor correctivo ao diâmetro e à geometria da cabeça de corte (plana ou curva).

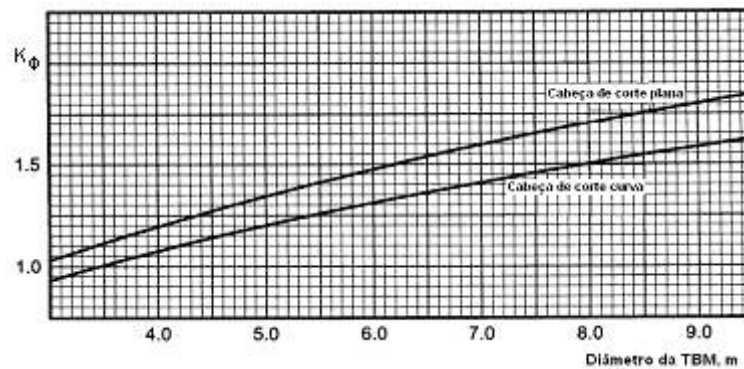


Fig. 3.16 – Variação do  $K_\phi$  com o diâmetro da tuneladora, adaptado do ITA [26]

O factor ( $K_Q$ ) tem em conta o conteúdo de quartzo no maciço rochoso, mineral bastante abrasivo para os discos de corte da tuneladora.

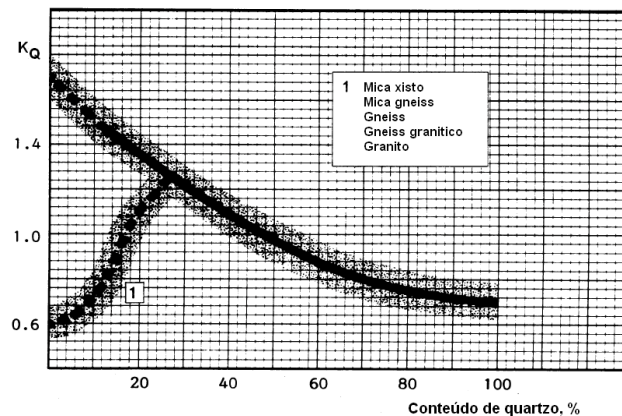


Fig. 3.17 – Variação do  $K_Q$  com a percentagem de quartzo encontrada no maciço, adaptado do ITA [26]

O factor de correcção  $K_{RPM}$  contabiliza o desgaste provocado nos discos de corte pela rotação da cabeça de corte. Quanto maior o número de rotações maior é a velocidade linear dos discos de corte e por isso maior o seu desgaste.

$$K_{RPM} = 38/(D \times rpm) \quad (3.17)$$

O factor correctivo  $K_N$ , introduz-se quando o espaçamento (s) entre as ferramentas de corte é diferente de 65mm. Regra geral, quanto mais próximos estiverem as ferramentas maior é o seu tempo de vida útil.

$$K_N = 65/s \quad (3.18)$$

Depois de determinados todos estes parâmetros, e sabendo que o  $N_{TBM}$  é o numero de discos na cabeça de corte da tuneladora, é possível determinar o tempo médio de vida útil dos discos de corte ( $H_H$ ). No sentido de aferir a sua influência na velocidade de avanço da tuneladora, o desgaste dos discos de corte pode ser estimado por metro de avanço ( $H_m$ ).

$$H_m = H_H \times i \text{ (m/disco)} \quad (3.19)$$

O tempo médio necessário à substituição dos discos pode ser consultado junto do fabricante e, desta forma, estimado o tempo dispendido nesta actividade.

A velocidade de avanço da tuneladora, em m/semana, pode ser finalmente determinada. Na determinação da velocidade de avanço da escavação não estão incluídos os tempos dispendidos com as seguintes actividades:

- Montagem e desmontagem da tuneladora e equipamento de apoio;
- Escavação de estruturas secundárias;
- Suporte da rocha em condições de reduzida estabilidade;
- Condições geológicas-geotécnicas inesperadas;
- Suporte definitivo do maciço rochoso;
- Avarias significativas do equipamento;
- Desmontagem dos carris, ventilação provisória e limpeza.

O método do NTH é bastante completo. Este método tem em consideração diversos parâmetros que influenciam o desempenho das tuneladoras e ao longo dos anos sofreu diversas actualizações, à medida que se adicionaram mais casos de obra. A versão apresentada, nesta tese, corresponde ao “Project Report de 1994”.

### 3.1.3.2 Colorado School of Mines

O Earth Mechanics Institute da Universidade de Minas do Colorado desenvolveu ao longo de mais de 25 anos o modelo de previsão do desempenho de tuneladoras CSM, para maciços rochosos. Este modelo semi-empírico desenvolveu-se inicialmente a partir do estudo da formação e propagação das fracturas e das forças actuantes durante o processo de corte. Por este motivo este método é também conhecido como o modelo das forças de corte [31].

A escavação do maciço inicia-se com a penetração dos discos de corte na rocha. Na proximidade do disco de corte a rocha é pulverizada e desagregada, passando as suas partículas a possuir uma dimensão bastante reduzida. Esta rocha muito desagregada exerce uma pressão do tipo hidrostática no maciço circundante que conduz a formação de fendas ou fracturas radiais. À medida que estas fendas radiais se expandem e alcançam as fendas provocadas por outros discos de corte ocorre a rotura na forma de lascas de rocha. Este fenómeno de rotura, pela formação de lascas de rocha, foi observado e detalhadamente analisado, através de vídeos gravados durante o processo de corte e inspecções consequentes.

Na formulação inicial do modelo a resistência à compressão uniaxial da rocha foi relacionada com a penetração alcançada pelos discos de corte e a resistência à tracção, determinada através de ensaios de tracção indirecta, relacionada com os fenómenos de formação e propagação das fendas, que promovem o corte do maciço pela formação de lascas.

A razão óptima entre o espaçamento dos discos de corte e a sua penetração é de 10 a 20. Utilizam-se razões mais baixas para rochas mais duras e razões mais elevadas para maciços rochosos mais frágeis [32].

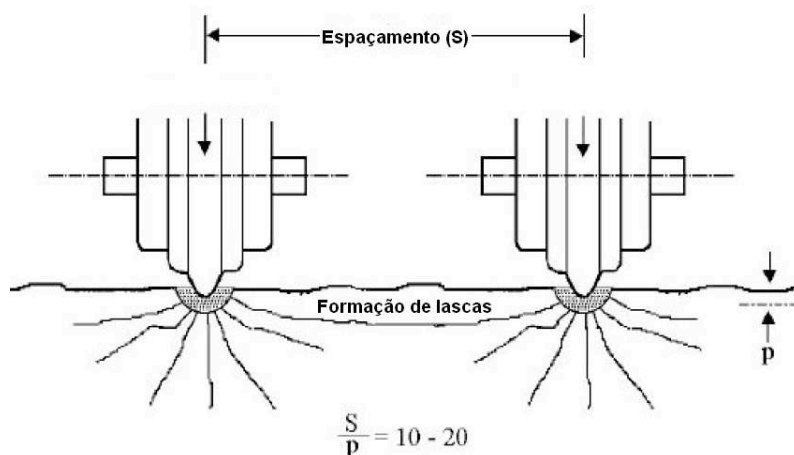


Fig. 3.18 – Propagação das fendas radiais e formação das lascas de rocha durante o processo de corte, adaptado de Rostami [31]

Para além das propriedades resistentes do maciço rochoso a capacidade de penetração é influenciada pela força transmitida pelos discos de corte ao maciço, função da sua dimensão e geometria. As forças transmitidas pelos discos de corte podem ser estimadas através dos ensaios de corte de larga escala, realizados por uma “linear cutting machine” (LCM), ou através das fórmulas propostas pelo modelo CSM. Estas fórmulas resultaram de uma compilação e interpretação de diversos resultados obtidos em ensaios de corte de larga escala para diferentes rochas, geometrias e dimensões de discos de corte. No entanto, a realização destes ensaios permite reduzir a incerteza associada a estimativa destas forças, aumentando assim o grau de fiabilidade do modelo [33].

$$F_t = \frac{P^o \phi RT}{1 + \psi} \quad (3.20)$$

- $F_t$  – Força total transmitida por disco de corte (lbs)
- $R$  – Raio do disco de corte (in)
- $T$  – Espessura da ponta do disco de corte (in)
- $\psi$  - Coeficiente relativo a distribuição da pressão aplicada pelos discos de corte (varia entre 0,2 e - 0,2 de acordo com a espessura da ponta do discos de corte)
- $\phi$  - Ângulo de contacto entre o disco de corte e a rocha (adimensional)
- $P^o$  - Pressão exercida na rocha pelo disco de corte

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{R - p}{R} \right) \quad (3.21)$$

- $p$  – Penetração por revolução do disco de corte (in)

O modelo CSM estima as forças actuantes sobre cada discos de corte ao contrário do modelo NTH, que admite uma simplificação e considera uma força equivalente ou média aplicada a todos os discos de corte.

A equação (3.22) traduz a pressão exercida na rocha pelo disco de corte. Esta equação resultou de uma regressão logarítmica efectuada sobre uma extensa base de dados, que foi sendo actualizada para incorporar uma maior gama de discos de corte e tipos de rocha.

$$P^o = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t}{\phi \sqrt{RT}}} \quad (3.22)$$

- $C$  – Coeficiente que vale 2,12 (adimensional)
- $S$  – Espaçamento dos discos de corte (in)
- $\sigma_c$  – Resistência à compressão uniaxial (psi)
- $\sigma_t$  – Resistência à tracção (psi)

A força total transmitida ao maciço pelos discos de cortes decompõe-se numa força normal ( $F_n$ ) e numa força rotacional ( $F_r$ ).

$$F_n = F_t \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad F_r = F_t \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.23)$$

A relação entre as forças total, normal e rotacional pressupõe uma distribuição uniforme da pressão na área de contacto entre o disco de corte e o maciço ( $\beta = \phi/2$ ).

Depois de analisado em pormenor o processo de corte ao nível dos discos, nomeadamente na determinação das forças envolvidas, o modelo procura determinar quais os requisitos mínimos da tuneladora em termos da potência instalada (HP), força de torção (Tq) e força de impulsão (Th).

$$Th^* = \sum_{i=1}^N F_n \approx N \cdot F_n \quad (3.24)$$

$$Tq^* = \sum_{i=1}^N F_{ri} \cdot R_i \approx 0,3 \cdot D \cdot N \cdot F_r \quad (3.25)$$

$$RPM = \frac{V}{\pi D} \quad (3.26)$$

$$HP^* = \frac{Tq^* \cdot RPM}{5250} \quad (3.27)$$

- $Th^*$  - Força de impulsão necessária (Ton)
- $Tq^*$  - Força de torção necessária (kN.m)
- $HP^*$  - Potência da cabeça de corte necessária (kW)
- $D$  – Diâmetro da TBM (in)
- $N$  – Número total de discos de corte
- $V$  – Velocidade máxima linear aplicável aos discos de corte ( ft/min)

A estes parâmetros aplica-se um coeficiente de transferência de energia, que simplificado traduz a eficiência do sistema ( $\eta$ ). Para as tuneladoras este parâmetro varia entre 0,85 e 0,90, segundo Rostami *et al* (1994) [21].

$$Th^* = Th \cdot \eta \quad (3.28)$$

O modelo CSM funciona de uma forma iterativa. Para determinar as forças de corte transmitidas ao maciço, o modelo atribui um valor baixo a penetração por revolução dos discos de corte ( $p$ ). Esta variável é uma incógnita. Após o cálculo das forças transmitidas ao maciço, para uma dada penetração por revolução, é possível calcular quais os requisitos que a tuneladora deve possuir em termos de potência, força de torção e impulsão, bem como verificar se a capacidade máxima dos discos de corte permite alcançar a penetração por revolução admitida inicialmente.

Os valores obtidos são comparados com as características da tuneladora seleccionada ou a construir, e se nenhum destes requisitos for violado o modelo reinicia-se. Admitindo desta vez um valor mais elevado para a penetração por revolução dos discos de corte. À medida que se vai aumentando a penetração por revolução, maiores são as forças e a potência requerida à tuneladora. Quando um destes limites é alcançado obtém-se a penetração máxima por revolução (Basic Penetration Rate) e consequentemente a taxa de penetração (Rate of Penetration).

Os resultados tipo do modelo são apresentados na figura 3.19. Neste caso tanto a potência da tuneladora como a sua força de torção são completamente mobilizadas.

| MACHINE PERFORMANCE EVALUATION |                            |               |        |                          |                  |
|--------------------------------|----------------------------|---------------|--------|--------------------------|------------------|
|                                | Machine Thrust :           | O.K.          | 90%    | of machine thrust used   |                  |
|                                | Machine Torque :           | O.K.          | 100%   | of machine torque used   |                  |
|                                | Machine Power :            | O.K.          | 100%   | of machine power used    |                  |
|                                | Cutter Load Capacity :     | O.K.          | 90%    | of max. cutter load used |                  |
|                                | ROP Limit :                | O.K.          | 52%    | of ROP Limit used        |                  |
|                                |                            |               |        |                          | See Model Result |
|                                | Basic Penetration Rate:    | 0,116         | mm/rev |                          |                  |
|                                | Rate of Penetration:       | 1,900         | m/hr   | Calculate ROP            |                  |
|                                | "Maximum ROP controlled by | Machine Power |        | Save Result              |                  |
|                                |                            | 1             |        |                          |                  |

Fig. 3.19 – Resultado final do modelo CSM [34]

Analisando os resultados tipo (figura 3.19), verifica-se que este modelo é particularmente indicado na comparação e optimização da capacidade de corte de tuneladoras. No caso de reutilização, este modelo é bastante útil porque permite comparar a taxa de penetração das diferentes tuneladoras disponíveis. Para casos de obra em que se justifique a construção de uma nova tuneladora, com este modelo é possível optimizar a distribuição dos discos de corte, bem como ajustar as características do equipamento (potência, força de impulsão e força de torção) as condições geológicas-geotecnicas expectáveis.

A grande desvantagem da formulação inicial do CSM prende-se com o facto de este modelo não considerar na estimativa da taxa de penetração certas propriedades do maciço rochoso como: as descontinuidades, a sua orientação relativa ao eixo do túnel e a fragilidade da rocha (bom indicador da facilidade de desmonte do material) [34]. Por estas razões, verificou-se que apenas para maciços rochosos intactos as taxas de penetração estimadas pelos modelos do CSM e NTH são muito semelhantes [33]. Esta limitação da aplicabilidade do modelo, a maciços rochosos fracturados, conduziu inicialmente a um ajuste das estimativas obtidas, para a penetração por revolução dos discos de corte, (i) no modelo NTH, de acordo com as correcções propostas neste modelo.

O modelo CSM acabou por ser reformulado por Yagiz (2002) [33] que introduziu, na estimativa da taxa de penetração (ROP), as propriedades associadas a fracturação do maciço rochoso. Esta correcção resultou de uma análise das taxas de penetração estimadas pelo modelo CSM original e as taxas de penetração verificadas em obra. Com base nestes dados procedeu-se a uma correlação entre as propriedades do maciço rochoso e as taxas de penetração efectivamente alcançadas, obtendo-se um factor de correlação de 0,82.

$$ROP = 0,859 - 0,0187 \cdot F_s + 1,44 \cdot \log(\alpha) + 0,0157 \cdot P_s + 0,0969 \cdot CSM_{(b-rop)} \quad (3.29)$$

- ROP – Taxa de penetração (ft)
- $F_s$  – Espaçamento entre fracturas (in)
- $\alpha$  - Ângulo entre os planos de fraqueza e o eixo do túnel (°)
- $P_s$  – Peak Slope, determinado através de ensaios “Punch Penetration” (adimensional)
- $CSM_{(b-rop)}$  – Taxa de penetração obtida pelo formulação inicial do CSM (ft/hr)

O maciço rochoso é classificado quanto ao seu grau de fracturação em classes ( $F_s$ ), segundo o critério proposto pelo modelo NTH (Quadro 3.3). O ângulo entre os planos de fraqueza e o eixo de túnel é determinado de acordo com a equação 3.8.

Nesta revisão do modelo CSM o espaçamento entre fracturas ( $F_s$ ) e o ângulo entre os planos de fraqueza e o eixo de túnel ( $\alpha$ ) constituem o índice de fracturação do maciço rochoso (RFI) [33].

$$RFI = 1,44 \cdot \log(\alpha) - 0,0187 \cdot F_s \quad (3.30)$$

O índice relativo à fragilidade do material rochoso ou “Brittleness Index” (BI) pode ser determinado através do ensaio “Punch Penetration”. Neste ensaio são medidas as forças e os deslocamentos provocados pela penetração de uma peça metálica de forma cónica, numa amostra de material rochoso confinada por um anel de aço. O declive da recta de aproximação ao gráfico força-deslocamentos, obtido durante o ensaio, permite determinar o “Peak Slope” ( $P_s$ ). Através deste ensaio é possível aferir o grau de escavabilidade do maciço rochoso porque, para além da dureza da rocha, no gráfico força-deslocamentos interferem a rigidez, a fragilidade e a porosidade da amostra.

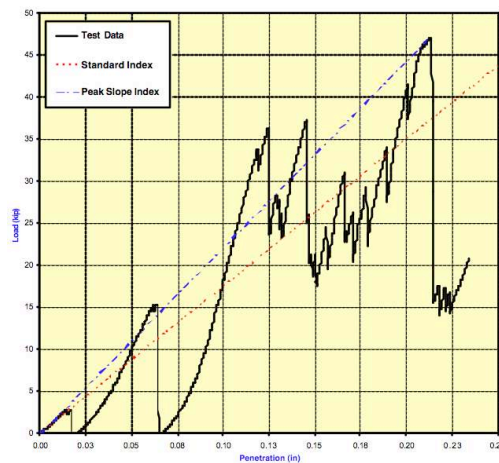


Fig. 3.20 – Resultados obtidos num ensaio “Punch Penetration” [31]

O declive da curva obtida, através do ensaio “Punch Penetration”, é um factor indicativo da facilidade de desmonte do material e implicitamente da sua fragilidade (BI).

$$BI = 0,0157 \cdot P_s \quad (3.31)$$

Depois de definidos estes índices, a fórmula proposta por Yagiz [34] sofre uma simplificação, passando a ser definida por:

$$ROP = 0,859 - RFI + BI + 0,0969 \quad (3.32)$$

| INPUT DATA FOR ROCK MASS PROPERTIES              |                |                      |           |                  |              |           |                  |         |             |               |                   |
|--------------------------------------------------|----------------|----------------------|-----------|------------------|--------------|-----------|------------------|---------|-------------|---------------|-------------------|
| "ROCK FRACTURE & BRITTLENESS INDICES" (RFI & BI) |                |                      |           |                  |              |           |                  |         |             | Go to ROP     |                   |
| Tunnel Stations                                  | Tunnel Bearing | FRACTURE ORIENTATION |           | INPUT PARAMETERS |              |           |                  |         | Alpha Angle | Rock Fracture | Brittleness Index |
| (m)                                              | (deg)          | Strike (deg)         | Dip (deg) | I. Bearing (deg) | Strike (deg) | Dip (deg) | Peak Slope Index | Fs (cm) | (deg)       | Index         |                   |
| 269                                              | N47E           | N31W                 | 36SW      | 47               | 149          | 36        | 200              | 160     | 35          | 1,05          | 3,14              |
| 280                                              | N47E           | N35E                 | 90        | 47               | 35           | 90        | 172              | 160     | 12          | 0,38          | 2,70              |
| 301                                              | N47E           | N15W                 | 44SW      | 47               | 165          | 44        | 172              | 80      | 38          | 1,68          | 2,70              |

Fig. 3.21 – Quadro para a introdução de dados referentes as propriedades do maciço rochoso [34]

A actualização realizada sobre o modelo do CSM surge como uma correcção à taxa de penetração, de modo a que o modelo passe a contabilizar, nas suas estimativas, certas propriedades do maciço rochoso como, por exemplo, o seu grau de fracturação. Isto não implica assim que a formulação inicial do modelo, que caracterizava as forças transmitidas pelos discos de corte e as pressões transmitidas ao maciço deixassem de ser válidas. O maciço rochoso continua a ser caracterizado pelas propriedades da rocha intacta, nomeadamente a resistência à compressão uniaxial e resistência à tracção.

Actualmente um conjunto de considerações relativas ao ensaio de tracção indirecta, ou ensaio Brasileiro, preconizam que o carregamento deve ser realizado segundo o ângulo entre o eixo do túnel e os planos de estratificação da rocha, caso estes existam. Desta forma é possível caracterizar melhor o fenómeno de propagação das fracturas geradas durante o processo de corte. Se a direcção do corte for paralela aos planos de estratificação, as fracturas geradas propagam-se ao longo deste planos, que por apresentarem características de resistência mais baixas, facilitam a escavação. Se a direcção da escavação for perpendicular a estes planos a propagação das fracturas ocorre através da rocha intacta, dificultando a escavação.

Para a correcta previsão da velocidade de avanço das TBM, para além da taxa de penetração (ROP), é necessário avaliar a sua taxa de utilização. A taxa de utilização destes equipamentos é fortemente condicionada pelas avarias, manutenções e pela substituição dos discos de corte (figura 3.6). Esta actividade devido ao espaço reduzido e ao peso elevado dos discos de corte é bastante complexa e demorada.

O modelo CSM estima a duração dos discos de corte, em horas ou  $m^3$ /disco, através dos resultados obtidos pelo ensaio de abrasividade de Cerchar. No ensaio de Cerchar, um pino metálico com a ponta em forma cónica e de características semelhantes aos discos de corte é pressionado por um peso de 70N e deslocado ao longo de 10mm sobre uma amostra de material rochoso. O desgaste provocado no pino metálico, nomeadamente, o diâmetro da secção circular que se desenvolve na sua ponta é medido com recurso ao microscópio. À unidade do Índice de Abrasividade de Cerchar (CAI) corresponde um desgaste do pino metálico de 0,1mm de diâmetro (figura 3.22). O valor de CAI varia entre valores inferiores a 0,5, para rochas brandas, e valores superiores a 5, para rochas duras [35].

A formulação deste modelo (CSM) ainda não foi totalmente publicada e por isso não é possível, nesta altura, apresentar a relação utilizada para estimar a duração dos discos de corte. Apresentam-se, por isso de seguida, as relações propostas por diversos autores entre o Índice de Abrasividade de Cerchar (CAI) e a duração média dos discos de corte.



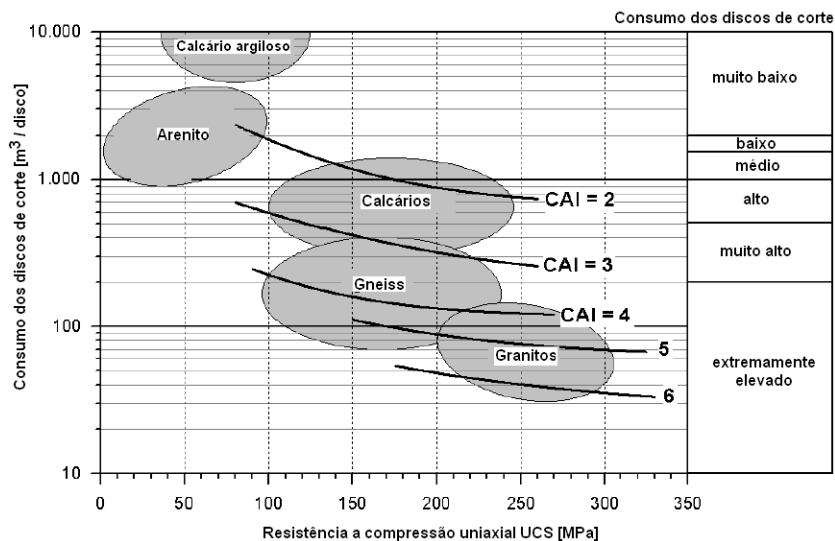
Fig. 3.22 – Determinação do Índice de Abrasividade de Cerchar (CAI) [36]

Com base no valor do CAI, Ozdemir (1992) propôs a seguinte relação para a avaliação da duração média dos discos de corte da tuneladora (CL), de acordo com o desenvolvimento da escavação em pés [37]:

$$CL = \frac{6,24 \times 10^6}{CAI} \quad (3.33)$$

Para a estimativa da duração média dos discos de corte, em número de horas ou por metro cúbico de material escavado, é necessário conhecer a taxa de penetração do equipamento. A duração média dos discos de corte aumenta à medida que também aumenta a taxa de penetração, isto porque a cada revolução há mais material extraído.

Mais recentemente (2001), diversos autores [38] compilaram informação relativa a diversos casos de obra, sugerindo a seguinte relação entre o CAI e a resistência a compressão uniaxial da rocha (UCS), para a avaliação da duração média dos discos de corte por metro cúbico de material escavado.

Fig. 3.23 – Correlação entre a duração dos discos de corte, UCS e CAI para alguns tipos de rochas, adaptado de Maidl *et al.*

Para concluir, salienta-se que a modelação do CSM pode ser realizada com maior ou menor dificuldade através das macros disponíveis no programa de cálculo automático “Excel”.

### 3.1.3.3 Modelo de Barton

Através da observação de um grande número de escavações subterrâneas, Barton, Lien e Lund do Norwegian Geotechnical Institute, propuseram, em 1974, uma classificação que assenta na definição de um índice de qualidade Q. Este índice é baseado na análise de 6 factores considerados relevantes para a caracterização do comportamento dos maciços rochosos [39].

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (3.34)$$

O valor numérico do índice Q apresenta um largo campo de variação, entre  $10^{-3}$  e  $10^3$ , e é função dos seguintes parâmetros:

- RQD - Rock Quality Designation
- $J_n$  – Índice relativo às famílias de descontinuidades
- $J_r$  – Índice de rugosidade das descontinuidades
- $J_a$  – Grau de alteração das descontinuidades
- $J_w$  – Índice das condições hidrogeológicas
- SRF – Factor de redução das tensões

Com base no índice de qualidade para a classificação dos maciços rochosos, o sistema Q, Barton (2000) propôs uma metodologia empírica para a previsão do desempenho de tuneladoras sem escudo, na escavação de maciços rochosos ( $Q_{TBM}$ ). Na base deste sistema está o índice  $Q_0$  (equação 3.34), com um RQD calculado segundo o eixo do túnel ( $RQD_0$ ) e com a relação entre  $J_r/J_a$  representativa da resistência ao corte das descontinuidades cuja família mais influencia o processo de corte. O valor de  $Q_{TBM}$  é calculado a partir de  $Q_0$ , com a inclusão de outros parâmetros que estão directamente relacionados com o desempenho da tuneladora [40]. Esta classificação ( $Q_{TBM}$ ) foi baseada no estudo de 145 projectos de escavação com recurso a tuneladoras.

$$Q_{TBM} = Q_0 \cdot \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \cdot \frac{20}{CLI} \cdot \frac{q}{20} \cdot \frac{\sigma_\theta}{5} \quad (3.35)$$

- *SIGMA* - Valor estimado da resistência do maciço à penetração (MPa)
- F – Força de impulso de corte média (tnf)
- CLI – (Cutter Life Index) Índice relativo à duração dos discos de corte
- q – Conteúdo de quartzo (%)
- $\sigma_\theta$  - Estimativa da tensão perimetral na face (MPa)

Um dos aspectos fundamentais deste modelo é a comparação entre a força de corte transmitida pela tuneladora (F) e uma medida empírica da resistência do maciço rochoso (*SIGMA*). Este parâmetro depende da orientação das descontinuidades em relação à escavação. Simplificadamente, quando a inclinação das descontinuidades é baixa, esta é favorável à escavação e a rotura do maciço ocorre predominantemente por tracção ( $SIGMA_{TM}$ ). Quando a inclinação das descontinuidades é elevada, situação mais prejudicial, a rotura ocorre predominantemente por compressão ( $SIGMA_{CM}$ ).

$$SIGMA_{CM} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_c^{1/3} \quad ou \quad SIGMA_{TM} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_t^{1/3} \quad (3.36)$$

Os valores normalizados de  $Q_c$  e  $Q_t$ , de acordo com a resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e o índice normalizado da carga pontual ( $I_{50}$ ), são dados respectivamente por:

$$Q_c = Q_0 \cdot \frac{\sigma_c}{100} \quad ou \quad Q_c = Q_0 \cdot \frac{I_{50}}{4} \quad (3.37)$$

Os parâmetros de desempenho da tuneladora, velocidade de avanço (AR) e a velocidade de penetração (PR), expressos em m/h, podem ser finalmente estimados através do valor obtido para  $Q_{TBM}$ .

$$PR \approx 5 \cdot (Q_{TBM})^{-0,2} \quad (3.38)$$

$$AR = PR \times U \quad (3.39)$$

As parcelas de SIGMA, F e  $\sigma_0$  são parâmetros relacionados apenas com a taxa de penetração da tuneladora

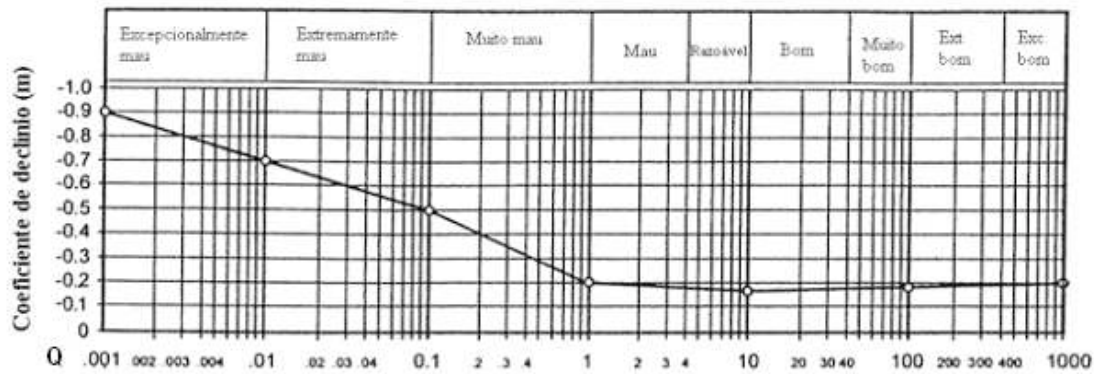
A taxa de utilização da tuneladora depende parcialmente do tempo de vida útil dos discos de corte, visto que a sua substituição ou reparação é bastante complexa e demorada. O tempo de vida útil dos discos de corte depende da abrasividade do material escavado e da taxa de penetração.

A taxa de utilização (U) da tuneladora depende do intervalo de tempo considerado, normalmente esta diminui à medida que aumenta o intervalo de tempo. Estes equipamentos apresentam, em condições excepcionais, velocidades de avanço e taxas de utilização muito elevadas,. Este alto desempenho, no entanto, não é sustentável a longo termo devido à necessidade de proceder a reparações/manutenções, às avarias e às alterações das condições geológicas-geotécnicas.

A velocidade de avanço pode assim ser estimada em ordem ao tempo (T), em função de  $T^m$ :

$$AR \approx 5 \cdot (Q_{TBM})^{-0,2} \cdot T^m \quad (3.40)$$

Em que  $m$  é um gradiente negativo que depende do desempenho dos trabalhos de escavação e T é uma unidade de tempo (turno, dia, semana, ano) para a qual se quer determinar o valor médio da velocidade de avanço, expressa em m/h. O valor inicial do coeficiente de declínio  $m_I$  pode ser estimado através da seguinte relação com o índice Q (figura 3.24).

Fig. 3.24 – Variação de  $m_1$  com o valor de  $Q$  [40]

$$m = m_1 \cdot \left(\frac{D}{5}\right)^{0,20} \cdot \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0,15} \cdot \left(\frac{q}{20}\right)^{0,10} \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^{0,05} \quad (3.41)$$

- CLI – (Cutter Life Index) Índice relativo a duração dos discos de corte
- D – Diâmetro do túnel (m)
- q – Conteúdo de quartzo (%)
- n – Porosidade (%)

Com base neste sistema é também possível estimar o tempo necessário à escavação de um troço do túnel, de comprimento ( $L$ ), com características aproximadamente homogêneas.

$$T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (3.42)$$

### 3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS

A execução bem sucedida de um túnel depende, em boa medida, da correcta selecção do método construtivo a utilizar. Os métodos construtivos influenciam determinadamente o tempo e o custo global da obra. Para além das condicionantes específicas do projecto, os métodos construtivos mecânicos (onde se incluem as roçadoras e as tuneladoras) e o método com recurso a explosivos apresentam, à partida, uma série de condicionantes, vantagens e desvantagens que podem favorecer ou restringir a sua aplicabilidade.

Quadro 3.5 – Vantagens e desvantagens na utilização das tuneladoras [17]

| Vantagens                           | Desvantagens                                            |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Velocidades de avanço mais elevadas | Secção transversal circular                             |
| Escavação contínua                  | Adaptabilidade a novas condições geológicas-geotécnicas |
| Menor perturbação do maciço rochoso | Maior tempo de mobilização inicial                      |
| Saúde e segurança                   | Maior investimento inicial / Disponibilidade financeira |
|                                     | Número de frentes de escavação                          |

### 3.2.1 VELOCIDADES DE AVANÇO

As velocidades de avanço atingidas pelas tuneladoras em condições geológicas-geotécnicas favoráveis ao seu desempenho são, em regra geral, entre duas a três vezes superiores às atingidas pelos métodos com recurso a explosivos. No entanto, estes equipamentos são pouco adaptáveis a novas condições geológicas-geotécnicas, exibindo, em casos extremos, diminuições drásticas da velocidade de avanço. A velocidade de avanço por semana estimada para a tuneladora não deve ser assim directamente extrapolada para a sua performance mensal ou anual porque, em túneis longos, a probabilidade de se encontrarem zonas geotécnicas menos adaptadas às características da tuneladora é mais elevada.

De acordo com Barton (2001), os métodos de escavação com recurso a explosivos são bastante competitivos em relação às tuneladoras para: maciços rochosos intactos e de boa qualidade e para maciços bastante fracturados e alterados (nestas condições a escavação com roçadoras pode ser mais económica). Para zonas onde o maciço rochoso apresenta um índice de qualidade  $Q$  entre 0,1-10, a tuneladora apresenta velocidades de avanço até três vezes superiores ao método com recurso a explosivos [10].

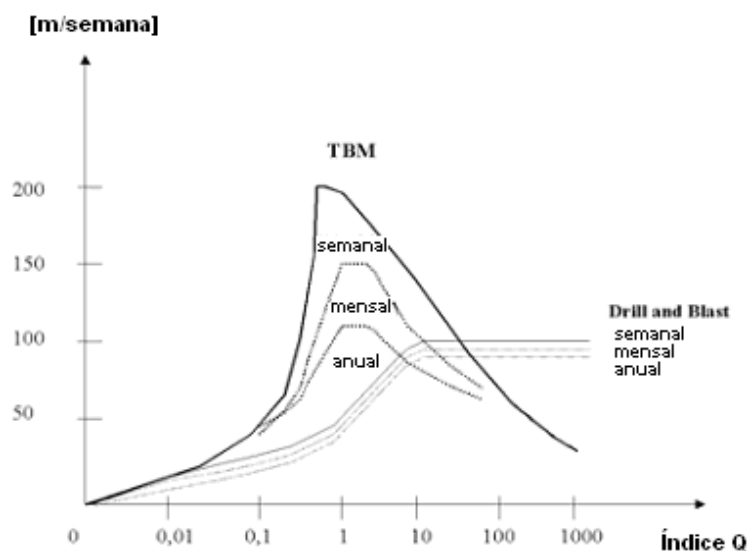


Fig. 3.25 - Curvas hipotéticas de comparação entre as velocidades de avanço obtidas por TBM e D-B, adaptado de Isaksson [10]

À medida que o diâmetro das tuneladoras aumenta para além dos 5m, estes equipamentos têm uma maior dificuldade em competir com a escavação com recurso a explosivos. A taxa de penetração de uma tuneladora é inversamente proporcional às rotações por minuto da cabeça de corte que é limitada pela velocidade linear máxima aplicável aos discos de corte periféricos, mais solicitados nesta matéria. Assim, a velocidade de avanço de uma tuneladora decresce com o aumento do seu diâmetro.

Na escavação com recurso a explosivos, o decréscimo da velocidade de avanço com o aumento da área do túnel é inferior ao verificado para as tuneladoras, porque o aumento do diâmetro do túnel disponibiliza, neste caso, uma maior área para a utilização de equipamentos [41].

### 3.2.2 ESCAVAÇÃO CONTÍNUA

Na escavação com recurso a explosivos o material é desmontado instantaneamente pelo accionamento de uma carga explosiva a que se segue um período de inactividade, devido à concentração de gases e à

redução da visibilidade na frente de escavação. Logo que se reúnam as condições mínimas de segurança o produto da escavação é retirado, geralmente por processos mecânicos, e o suporte é instalado. Este processo de escavação é descontínuo.

As tuneladoras proporcionam uma escavação parcialmente contínua do túnel. Esta é uma das razões para que este tipo de método construtivo apresente maiores velocidades de avanço e uma maior rapidez na execução do projecto. A expressão escavação parcialmente contínua pretende distinguir as tuneladoras convencionais, em que o processo de escavação é seguido da instalação dos suportes, das tuneladoras de escudo duplo. Estas são verdadeiras máquinas de escavação contínua, onde o processo de escavação e instalação dos suportes, em condições normais, se processa simultaneamente [17].

### 3.2.3 PERTURBAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO E INSTALAÇÃO DO SUPORTE

Os métodos de escavação convencionais a que se associa o processo de construção NATM implicam, à partida, maiores deslocamentos na face e de convergência do túnel, bem como maiores assentamentos à superfície. Em áreas urbanas, os assentamentos são fortemente restringidos devido à presença de edificações. A escavação de túneis, neste ambiente, favorece claramente a utilização de tuneladoras pois a utilização de explosivos é bastante problemática devido ao barulho e às vibrações produzidas na vizinhança da escavação. No sentido de minimizar estes problemas, várias restrições são usualmente aplicadas:

- Redução da quantidade de explosivos utilizada, através da redução do vão de avanço ou através da maior parcialização da frente de escavação;
- Restrição de horários para a utilização de explosivos, muitas vezes total durante o período nocturno;
- Monitorização das vibrações e de possíveis danos às edificações vizinhas.

A necessidade de reforço estrutural em escavações realizadas com tuneladoras é drasticamente reduzida, em cerca de 30 a 50%, comparativamente a escavações executadas com recurso a explosivos (D-B). A fracturação provocada no maciço rochoso, devido a utilização de explosivos, provoca uma redução da estabilidade da escavação, aumentando as necessidades de suporte estrutural [23].

### 3.2.4 SAÚDE E SEGURANÇA

A poluição atmosférica gerada pela explosão, devido aos gases tóxicos libertados e à redução de visibilidade no interior do túnel, é um inconveniente dos túneis executados com recurso a explosivos. No entanto, esta não é a única fonte de poluição, pois o transporte dos produtos de escavação é normalmente efectuado com recurso a dumpers ou comboios de motorização diesel. O recurso a correias transportadoras (eléctricas) pode minimizar este tipo de poluição. A ventilação a instalar durante a obra deve ser dimensionada para solucionar ou pelo menos reduzir estes problemas.

Nas tuneladoras, o processo de escavação e remoção dos produtos de escavação realizado através de correias transportadoras é exclusivamente eléctrico. O maior problema de poluição destes equipamentos é a poeira mineral resultante do processo de corte, que é particularmente gravosa em rochas com um elevado teor em quartzo. Uma possível solução para este problema é a pulverização de água na frente da escavação e na zona de transição do material, entre a correia transportadora da tuneladora e a correia transportadora, dumpers, ou vagões que conduzem os produtos de escavação a vazadouro.

O comprimento óptimo de um túnel executado com explosivos é de aproximadamente 3km e de 8Km para um túnel realizado com tuneladoras. Quando estes limites são ultrapassados o custo marginal da escavação por metro de desenvolvimento aumenta significativamente, especialmente no caso do D-B, devido aos custos crescentes da ventilação. Em túneis extensos, o tempo necessário à ventilação após uma explosão pode reduzir drasticamente a velocidade de avanço [23].

Quadro 3.6 – Emissões produzidas na escavação que afectam a saúde dos trabalhadores [1]

| Emissões resultantes do processo de escavação |                                                                  |                   |                                 |                               |                            |            |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| Origem                                        | Instantânea                                                      |                   | Contínua                        |                               |                            |            |
| Operação                                      | Explosão                                                         |                   | Transporte do material escavado |                               |                            | Escavação  |
| Substância                                    | Pó mineral                                                       | Gases da explosão | Pó mineral                      | Fumos Diesel                  | Emissões Diesel            | Pó mineral |
| Risco                                         | Silicose                                                         | Intoxicação       | Silicose                        | Cancro, visibilidade reduzida | Irritação e/ou intoxicação | Silicose   |
| Emissões de gases naturais                    |                                                                  |                   |                                 |                               |                            |            |
| Origem                                        | Instantânea                                                      |                   | Contínua                        |                               |                            |            |
| Gases com potencial explosivo                 | Bolsas contendo possíveis gases explosivos (por exemplo: Metano) |                   | Fugas através do maciço         |                               |                            |            |
| Sulfureto de hidrogénio                       | Irritação ou intoxicação                                         |                   | Irritação ou intoxicação        |                               |                            |            |
| Radônio                                       | -                                                                |                   | Radiação                        |                               |                            |            |

O radônio é um gás radioactivo, produto do decaimento do urânio. A sua concentração em espaços confinados é particularmente gravosa para a saúde dos seres humanos.

### 3.2.5 SECÇÕES TRANSVERSAIS

A escavação com recurso a tuneladoras implica uma secção transversal circular de dimensões fixas. A alteração das dimensão da secção é um processo oneroso e demorado, mas possível [23]. Nos métodos convencionais não existem restrições quanto à forma da secção, excepto as geológicas-geotécnicas. A secção circular produzida pelas tuneladoras não é particularmente ajustada às dimensões dos túneis rodoviários, onde a largura exigida para a escavação é bastante superior à altura. A escavação com tuneladoras conduz nestes casos a uma maior área de escavação comparativamente aos métodos convencionais. Uma possível solução para reduzir a dimensão da tuneladora passa pela utilização de explosivos na parte inferior da secção transversal. Esta solução mista é utilizada em zonas urbanas onde existem fortes limitações de vibrações e poluição, conjugando por exemplo, a utilização de uma Gripper TBM, cujo tipo de suporte é semelhante ao utilizado na metodologia NATM, com escavação por explosivos.

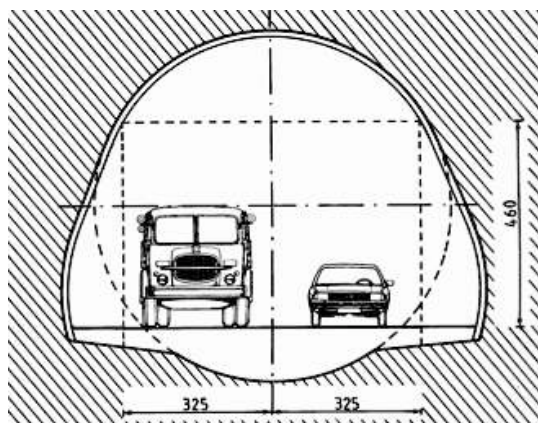


Fig. 3.26 – Secção transversal de um túnel escavado com recurso a tuneladora e D-B na parte inferior [42]

### 3.2.6 MAIOR TEMPO DE MOBILIZAÇÃO INICIAL

A aquisição de um novo “jumbo” ou roçadora requer um tempo de entrega bastante reduzido e o equipamento está geralmente operacional quando chega à obra. O equipamento pode ser transportado facilmente e os custos com transporte e revisão são muito reduzidos. O tempo dispendido para iniciar a escavação depois de adjudicada a empreitada é de duas a seis semanas.

As tuneladoras são equipamentos tecnicamente muito avançados, que para atingirem elevados desempenhos necessitam de possuir características compatíveis com as condições geológicas-geotécnicas expectáveis. Neste sentido, a concepção das tuneladoras é realizada com vista à utilização num projecto específico, com tempos de entrega que rondam os seis a doze meses. Devido ao elevado investimento associado a estes equipamentos, o mercado de usados prolifera. A reutilização de uma tuneladora implica uma revisão geral e adaptação das suas características ao projecto em causa. O tempo dispendido nestas actividades é bastante inferior ao da concepção de uma nova tuneladora.

A tuneladora e o equipamento de suporte, devido ao seu peso e dimensões, são transportados em peças separadas que depois são montadas em estaleiro na proximidade da obra. Dependendo das condições locais, tamanho e complexidade da tuneladora é necessário entre três a seis semanas para colocar o equipamento a funcionar.

O peso total de uma tuneladora pode variar entre as duzentas e mil toneladas, sem contabilizar o peso do equipamento de suporte. A peça solta mais pesada pode atingir as 50 ou 100 toneladas [23]. Neste sentido, pode ser necessário o reforço de estradas e pontes e a instalação de gruas de alta capacidade para a montagem do equipamento. Para além do tempo dispendido na construção ou revisão e montagem da tuneladora é habitual haver um período inicial de aprendizagem e testes, para os quais as velocidades de avanço são bastante limitadas.

Para túneis de pequena e média extensão, devido ao intervalo de tempo entre a adjudicação da empreitada e seu início, a escavação com recurso a tuneladoras é desvantajosa. A selecção da tuneladora, caso se identifique à partida como uma solução vantajosa, deve ser realizada o mais atempadamente possível. A maior velocidade de avanço destes equipamentos permite compensar o tempo dispendido na sua mobilização inicial. A escavação com recurso a tuneladoras implica sempre a escavação de um troço inicial de 50 a 150m, recorrendo a métodos convencionais, que funciona como apoio inicial da tuneladora.

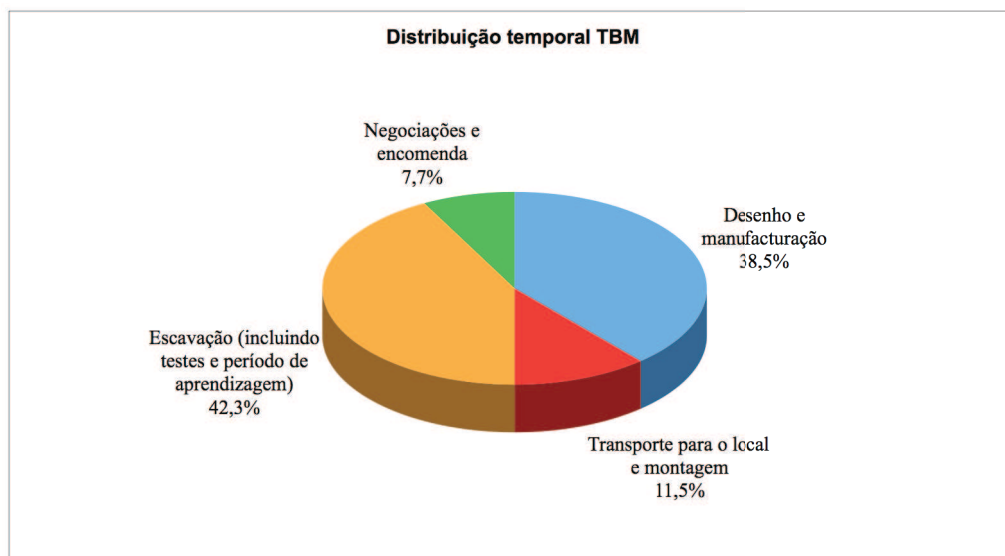


Fig. 3.27 - Distribuição temporal de um projecto com recurso a tuneladoras [25]

O projecto ilustrado na figura 3.27 corresponde à concepção de uma Gripper TBM com 5m de diâmetro. A distribuição temporal alerta para o peso das actividades para além da escavação que podem colocar em risco o prazo de execução ou a competitividade destes equipamentos face aos métodos construtivos convencionais.

### 3.2.7 ADAPTABILIDADE A NOVAS CONDIÇÕES GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS

Os métodos convencionais permitem o acesso directo à face da escavação e, por isso, apresentam maior flexibilidade. As tuneladoras por serem afectas a uma área fechada são menos adaptáveis a condições geotécnicas variáveis. Estas considerações devem ser incorporadas na fase de concepção ou escolha da tuneladora, visto que as alterações são demoradas e dispendiosas, podendo colocar em risco a execução do projecto [25]. Neste sentido, é necessário avaliar previamente a adaptabilidade da tuneladora a novas condições geológicas, através de uma pormenorizada caracterização geológica e tradução por parâmetros relacionados com a operacionalidade da TBM.

### 3.2.8 MAIOR INVESTIMENTO INICIAL / DISPONIBILIDADE FINANCEIRA

Os métodos de escavação convencionais implicam um investimento inicial reduzido na compra ou revisão dos equipamentos de perfuração, “jumbos” ou roçadoras. Uma grande vantagem dos métodos convencionais é a sua capacidade em se complementarem. A escavação com recurso a roçadoras é, regra geral, um método mais económico do que o D-B devido aos custos mais elevados dos explosivos e à maior necessidade de apoio estrutural. No entanto, a capacidade de escavação de maciços rochosos mais resistentes é um grande inconveniente deste método mecânico.

A escavação com tuneladoras implica um investimento inicial muito elevado. Estes métodos são particularmente adequados a túneis extensos, onde este investimento pode ser melhor distribuído ao longo da escavação. O investimento realizado com a aquisição ou revisão de uma tuneladora pode ascender aos 5% a 20% do custo total da obra [25]. O facto de este investimento ser realizado antes do início da construção constitui um entrave importante à utilização destes equipamentos, pois implica

uma grande disponibilidade financeira por parte da entidade financiadora. O custo por metro linear de escavação, por norma, é menor para as tuneladoras do que para os métodos convencionais.

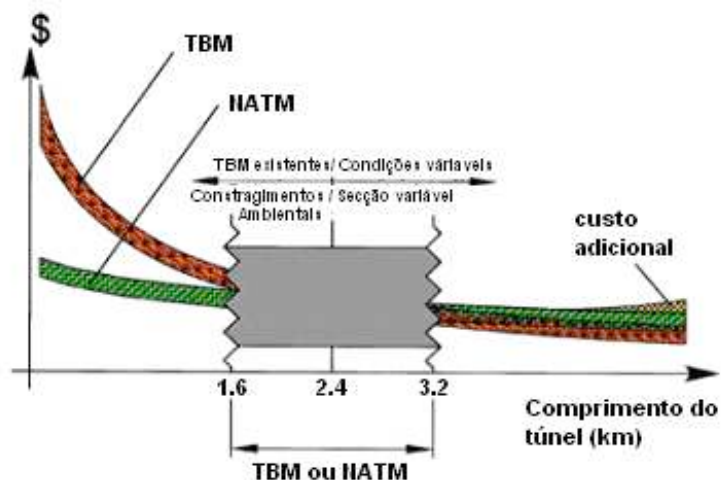


Fig. 3.28 – Comparação entre o custo total de construção para soluções TBM e NATM, Sauer (2004) [17]

Numa análise comparativa entre o custo total de túneis realizados com diferentes métodos construtivos, Sauer (2004), demonstrou que para túneis de extensão inferior a 2,4 km, de geometria variável e em condições geológicas-geotécnicas variáveis os métodos convencionais são mais económicos. Existe, no entanto, uma área de sobreposição onde a escavação recorrendo a métodos construtivos convencionais ou a tuneladoras deve ser equacionada. Em túneis com extensão superior a 3,2 km, a escavação com tuneladoras é mais económica mas apresenta uma diferença marginal mínima em relação ao custo da construção recorrendo aos métodos convencionais [17].

As estimativas para os custos totais de projectos de túneis rodoviários e ferroviários com diâmetros da ordem dos 10 metros, com recurso a tuneladoras ou a métodos convencionais, são bastante aproximadas. No entanto, é necessário contabilizar o risco financeiro que é mais elevado para as tuneladoras. Em cerca de 60% dos projectos, com um nível de caracterização e pré-investigação corrente, o risco associado à utilização de tuneladoras não ultrapassa o dos métodos convencionais [25]. Nos restantes casos, investigação suplementar pode ser necessária para reduzir os riscos, ou então, opta-se por uma solução convencional.

A decisão final da selecção do método construtivo não deve ser baseada nas relações entre o comprimento e o custo global da obra. Em situações concretas deve-se avaliar correctamente as condições geológicas-geotécnicas expectáveis, para proceder à estimativa das velocidades de avanço e dos custos globais da empreitada para os diferentes métodos construtivos.

### 3.2.9 NÚMERO DE FRENTES DE ESCAVAÇÃO

Os métodos de escavação convencionais permitem a escavação simultânea do túnel por diferentes frentes. Normalmente, é possível estabelecer pelo menos duas frentes de trabalho, uma no portal de entrada e outra no portal de saída do túnel. A duplicação das frentes de trabalho permite reduzir o risco associado ao projecto. Isto porque a probabilidade da ocorrência, em simultâneo, de problemas nas duas frentes de escavação é reduzida. A duplicação das frentes permite também o aumento da velocidade de avanço e, conseqüentemente, a diminuição do tempo de construção. Nestas condições

deve haver um controlo mais apertado durante a execução, nomeadamente topográfico, e a mobilização de mais um estaleiro.

As vantagens do maior número de frentes de escavação (NATM), comparativamente aos métodos com recurso a TBM com apenas uma frente de escavação, são mais significativos em túneis bidireccionais. Para túneis unidireccionais com tubos paralelos, a tuneladora apresenta geralmente um desempenho muito elevado na construção do segundo túnel por já se encontrar adaptada às condições geológicas-geotécnicas do maciço. Nestes casos, o ganho em velocidade de avanço pela multiplicação das frentes da escavação são bastante reduzidos quando comparados com as velocidades de avanço atingidas pelas TBM.

# 4

## ANÁLISE DE RISCO

### 4.1 GESTÃO DOS RISCOS

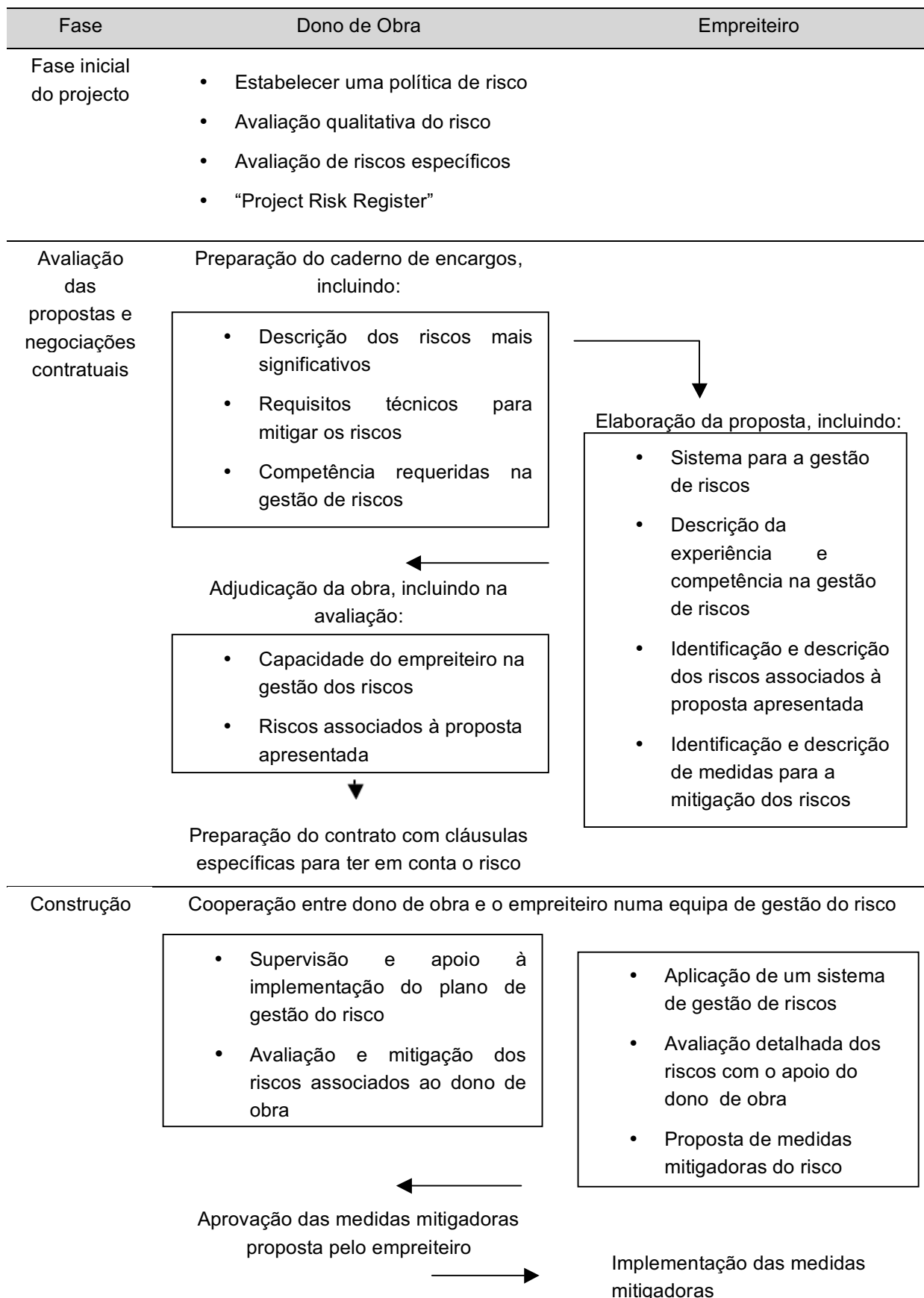
De acordo com um relatório elaborado pelo Banco Mundial, o custo final de diferentes projectos de escavação para fins hidroeléctricos é, em média, 27% superior ao estimado inicialmente e os prazos de conclusão são, em média, 28% superiores ao previsto. No entanto, uma análise efectuada sobre vários projectos apontou que, em média, menos de 1% do custo global da obra é dispendido em estudos de viabilidade e no reconhecimento das condições geológicas-geotécnicas e hidrológicas antes do início do projecto [43]. O valor dispendido na prospecção e estudos prévios é muito reduzido quando comparado com os possíveis acréscimos no custo global da obra, sendo o risco associado a execução destes projectos muito elevado.

Admitindo como exemplo um túnel de 25Km de extensão escavado num maciço rochoso competente, sob uma montanha, com uma cobertura de terras média de 300m. Com base na experiência local é expectável, a cada 500m a presença de uma falha ou de uma área de contacto, mais frágil, entre diferentes tipos de rochas. Uma campanha de prospecção razoável consistiria na execução de furos de sondagem a cada 250m para a caracterização da rocha intacta, falhas e zonas de contacto, totalizando 30000m de sondagens. O custo de mobilização deste equipamento e execução das sondagens, bem como o tempo dispendido são proibitivos mas, mesmo com uma investigação pormenorizada e extensiva, a eliminação completa do risco devido a condições geológicas-geotécnicas inesperadas não é possível [43]. Daí a importância da gestão do risco, que procura minimizar os custos para o dono de obra, maximizando simultaneamente os lucros do empreiteiro através da cooperação entre ambas as partes no planeamento da obra, na resolução de problemas, na elaboração de prazos e na definição de medidas de mitigação de possíveis atrasos. Devido à necessidade de aumentar o nível de segurança e tornar o processo de decisão mais transparente, através de documentação elaborada, a gestão do risco tornou-se num elemento inerente aos projectos de obras subterrâneas.

A gestão do risco num projecto de construção de um túnel engloba [44]:

- Identificação dos riscos;
- Avaliação dos riscos (probabilidade de ocorrência e potenciais consequências, em vidas humanas ou monetárias);
- Análise dos riscos;
- Eliminação dos riscos;
- Redução do risco e medidas de mitigação.

Quadro 4.1 – Evolução das responsabilidades no processo de gestão dos riscos, adaptado de Eskesen [45]



#### 4.1.1 FASE INICIAL DO PROJECTO

##### 4.1.1.1 Política de riscos

Na fase inicial do projecto é da responsabilidade do dono de obra estabelecer uma política de riscos e proceder à gestão dos riscos iniciais associados ao projecto em questão. A elaboração da política de riscos serve como referência a todos os intervenientes da obra (projectista, dono de obra, empreiteiro, seguradoras), ao definir:

- Âmbitos;
- Objectivos perante os riscos;
- Estratégias de gestão do risco.

No âmbito da política de riscos definem-se quais os riscos que devem ser contabilizados ou os riscos que devem ser negligenciados para além dos riscos identificados.

Os objectivos gerais definem qual deve ser a atitude e o comportamento dos vários intervenientes perante o risco podendo consistir, simplesmente, na obrigação de gerir o risco ao longo de todas as fases do projecto, através da:

- Identificação dos riscos;
- Identificação de medidas para eliminar ou mitigar os riscos;
- Implementação dessas medidas sempre que economicamente possível, de acordo com os objectivos específicos de redução de risco ou devido à legislação de saúde e segurança em vigor.

Para além dos objectivos gerais definem-se objectivos específicos, perante diferentes tipos de riscos, e considerações de âmbito geral. Por exemplo, a gestão dos riscos deve ser atribuída à entidade com maior capacidade na sua gestão. Um outro objectivo da gestão de riscos pode passar pela minimização dos riscos com elevado impacto mas de baixa probabilidade de ocorrência comparativamente com os riscos de maior probabilidade mas de impacto mais reduzido.

Uma estratégia eficaz na gestão do risco consiste na sua reavaliação, ao longo das diversas fases do projecto e construção, à medida que novas informações são disponibilizadas. A actualização da informação relativa aos riscos permite a tomada de novas decisões e o ajuste de decisões anteriores, melhorando a gestão. Qualquer estratégia de gestão de risco deve incluir:

- Definição das responsabilidades das diversas entidades na gestão do risco (departamentos pertencentes ao dono de obra, empreiteiro e consultores);
- Descrição breve das actividades a realizar nas diversas fases do projecto/construção e seus objectivos;
- Recolha e tratamento dos dados obtidos através das actividades de gestão do risco e sua organização e compilação num formato que facilite a transmissão entre os diferentes intervenientes, “Project Risk Register”;
- Verificação das suposições admitidas inicialmente;
- Monitorização, auditoria e revisão dos procedimentos.

##### 4.1.1.2 Gestão dos riscos na fase inicial do projecto

Uma elevada eficácia na gestão do risco em qualquer projecto de obras subterrâneas é vital. Esta gestão deve ser implementada desde as fases iniciais do projecto e dos estudos de viabilidade, influenciando assim decisões tão importantes como a escolha do alinhamento e processo construtivo do túnel. No entanto, o sucesso e benefício de uma gestão de riscos depende da qualidade das medidas

mitigadoras previstas para os riscos identificados e do envolvimento activo e experiência do dono de obra, empreiteiro e projectista.

Para uma gestão inicial dos riscos é necessário estabelecer:

- Política de risco;
- Avaliação qualitativa dos riscos;
- Critérios de aceitação dos riscos;
- Avaliação específica de riscos.

A gestão do risco deve sempre obedecer à estratégia, âmbito e objectivos fixados na política de riscos.

Durante a fase inicial do projecto deve-se realizar uma avaliação qualitativa dos riscos associados as várias actividades da construção e dos riscos especificados na política estabelecida. O objectivo principal desta avaliação é identificar os principais riscos associados à construção de modo a otimizar a concepção do projecto. A avaliação qualitativa dos riscos pode ser actualizada ao longo da fase inicial do projecto, para ter em conta alterações substanciais devidas à implementação de novas soluções técnicas. Os riscos identificados por esta avaliação constituem a base para a gestão de risco nas fases seguintes do projecto. A avaliação qualitativa dos riscos é organizada da seguinte forma:

- Identificação dos riscos;
- Classificação dos riscos identificados;
- Identificação de medidas mitigadoras;
- Transcrição destes conteúdos para o “Project Risk Register”.

Na concepção de túneis, independentemente das condições geológicas-geotécnicas presentes e alinhamento seleccionado, os riscos associados à sua construção variam de acordo com o processo construtivo utilizado. Qualquer entidade de gestão de risco deve assim, à partida, conhecer quais as principais vantagens, desvantagens, limitações e riscos associados aos métodos construtivos convencionais (NATM) e à escavação com tuneladoras (TBM). As principais características associadas ao risco de uma escavação executada pelos métodos construtivos convencionais (NATM) são [46]:

- A sub-divisão das frentes de trabalho com redução dos riscos de interrupção da obra em caso de acidente;
- As menores consequências de um acidente, comparativamente com os túneis escavados com tuneladoras;
- O risco de colapso em caso de deformações excessivas com afectações à superfície;
- O menor risco financeiro global;
- A instabilidade de blocos rochosos em zonas com pouca cobertura;
- Problemas de convergência radial;
- A instabilidade na face e hastes do túnel;
- Subsídências à superfície;
- A afluência de elevados caudais de água;
- Alterações frequentes das propriedades do maciço rochoso (risco mais elevado para as tuneladoras);
- Os produtos da escavação aderente, com elevado teor de humidade ou conteúdo argiloso, dificultam o transporte a vazadouro;
- A presença de gases explosivos como, por exemplo, o metano;
- A elevada abrasividade da rocha com alto teor em quartzo (risco mais elevado para as tuneladoras).

As principais características associadas ao risco na escavação com tuneladoras são [46]:

- O reduzido risco de colapso com afectações à superfície;
- O menor risco de acidentes;
- A dificuldade de adaptação tecnológica a realidades geológicas distintas das esperadas;
- O risco de bloqueio por impossibilidade de observação da frente;
- O risco de bloqueio por fluência radial excessiva do maciço (especialmente em falhas);
- O maciço rochoso muito fracturado ou intacto com elevada resistência à compressão uniaxial;
- As altas pressões aplicadas ao maciço rochoso com grandes deslocamentos;
- A instabilidade de blocos rochosos em zonas com pouca cobertura;
- A presença de gás que se infiltra no ambiente da escavação;
- A instabilidade da face do túnel pode originar o seu colapso sobre a cabeça de corte da tuneladora;
- Os colapsos sobre o escudo da tuneladora;
- A presença de blocos rochosos intactos em maciços rochosos brandos;
- A afluência de elevados caudais de água;
- Os produtos da escavação aderente, com elevado teor de humidade ou conteúdo argiloso, dificultam o processo de escavação (obstrução dos discos de corte e acumulação na correia transportadora);
- A elevada abrasividade da rocha com alto teor em quartzo;
- A deformação excessiva sobre a parte posterior do escudo da tuneladora, devida às altas pressões a que está sujeito o maciço rochoso em zonas de falhas.

A utilização de tuneladoras acarreta comparativamente com os métodos convencionais riscos específicos associados ao equipamento:

- Avaria do equipamento de corte;
- Incêndio na TBM;
- Avaria da correia transportadora e interrupção da extracção do material.

Os riscos identificados para os diferentes métodos construtivos são em alguns casos semelhantes, como a afluência de um volume excessivo de água à escavação, mas as suas consequências podem ser distintas.

À partida não se pode considerar que um dos métodos apresenta um risco global maior do que o outro. No entanto, as limitações e riscos específicos associados a cada método podem condicionar a sua aplicação ao projecto.

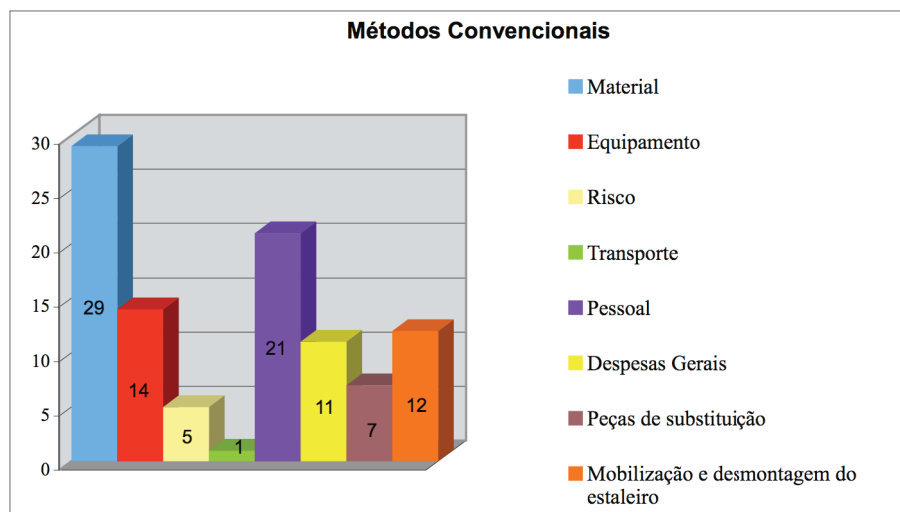


Fig. 4.1 - Distribuição típica dos custos para a escavação pelos métodos convencionais, adaptado de Wagner [47] [48]

Analisando a distribuição típica dos custos da escavação destes dois métodos, para um túnel de metro em maciços rochosos brandos, conclui-se que o acréscimo de risco associado à escavação com tuneladoras é pouco significativo. São de realçar as diferenças existentes na distribuição do custo entre os dois métodos ao nível do equipamento (a utilização de tuneladoras é bastante dispendiosa), do custo do transporte (mais difícil e demorado para as tuneladoras), do custo com os materiais, resultante da utilização de explosivos (fenómenos de sobreescavação e fracturação) e dos custos associados a mobilização e a desmontagem do estaleiro.

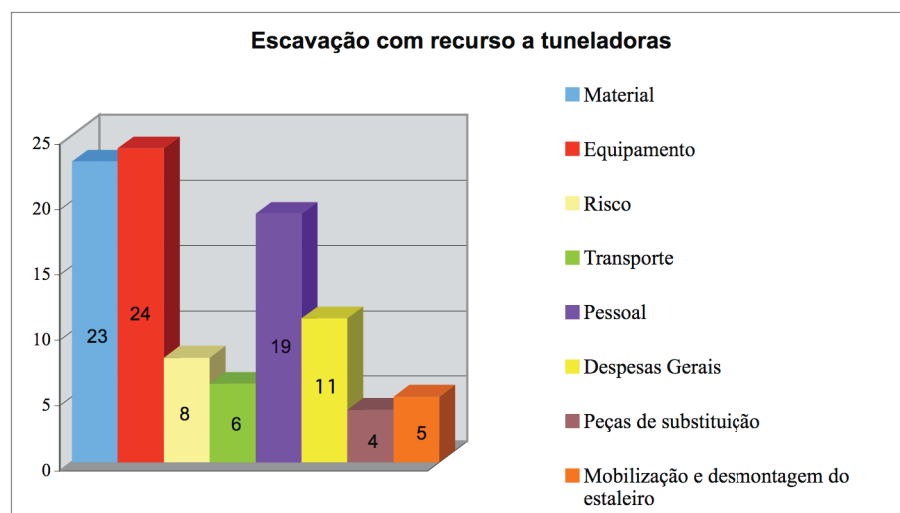


Fig. 4.2 - Distribuição típica dos custos para escavação com tuneladoras, adaptado de Wagner [47] [48]

Os riscos são classificados com o objectivo de avaliar a sua magnitude e de identificar as medidas mitigadoras mais apropriadas. A magnitude de um risco é definida pelo produto entre o seu impacto e a sua probabilidade de ocorrência.

$$Risco = Impacto \times Probabilidade$$

O nível de impacto avalia as consequências para o projecto da ocorrência do risco previsto. Os impactos mais severos são aqueles que provocam acidentes com danos humanos ou danos materiais avultados. Os de menor impacto são aqueles que podem ser controlados através da aplicação de medidas mitigadoras, medidas estas que em casos mais severos podem ser bastante dispendiosas. A probabilidade da ocorrência de determinado risco é bastante difícil de avaliar com precisão. Na avaliação qualitativa dos riscos, por simplificação, estimam-se os valores dessa probabilidade.

Quadro 4.2 – Exemplo de uma matriz de risco utilizada num projecto na Áustria, adaptado Schubert [49]

| Probabilidade |     | Impacto                                |                                         |                                  |                                       |                                             |
|---------------|-----|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
|               |     | 10                                     | 5                                       | 3                                | 1                                     | 0,5                                         |
|               |     | Acidente com danos humanos e materiais | Acidente provoca apenas danos materiais | Medidas mitigadoras excepcionais | Medidas mitigadoras comuns            | Medidas mitigadoras comuns                  |
|               |     | Danos afectam terceiros                | Danos limitados ao projecto             | Não previstas no contrato        | Risco de subavaliação das quantidades | Confiança elevada na quantificação do risco |
| Frequente     | 10  | 100                                    | 50                                      | 30                               | 10                                    | 5                                           |
| Ocasional     | 5   | 50                                     | 25                                      | 15                               | 5                                     | 2,5                                         |
| Fortuito      | 2   | 20                                     | 10                                      | 6                                | 2                                     | 1                                           |
| Raro          | 1   | 10                                     | 5                                       | 3                                | 1                                     | 0,5                                         |
| Improvável    | 0,5 | 5                                      | 2,5                                     | 1,5                              | 0,5                                   | 0,25                                        |

A matriz de risco é uma ferramenta bastante útil na sua classificação. A concepção e a aplicabilidade desta matriz é limitada ao projecto específico em estudo, visto que na sua elaboração são consideradas as políticas de risco estabelecidas para o projecto.

Quadro 4.3 – Definição das classes de probabilidades, adaptado Schubert [49]

| Probabilidade |                                                                            |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Frequente     | Pode ocorrer várias vezes ao longo do projecto                             |
| Ocasional     | Pode ocorrer durante o projecto                                            |
| Fortuito      | Inesperado neste projecto, mas ocorreu em projectos similares              |
| Raro          | Inesperado neste projecto, mas já ocorreu raramente em projectos similares |
| Improvável    | Altamente improvável de ocorrer ao longo projecto                          |

O ITA recomenda, para a classificação do risco, a consideração de quatro níveis distintos: inaceitável, não desejável, aceitável e negligenciável.

Quadro 4.4 – Matriz de classificação do risco, adaptado Schubert [49]

## Classificação do risco

|         |                                                                                                |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| >20     | Inaceitável, estudo de novas soluções técnicas conduz a alterações significativas da concepção |
| 10 - 19 | Crítico, necessárias medidas especiais ao nível da concepção                                   |
| 5 - 9   | Risco remanescente aceitável, gestão do risco                                                  |
| 0 - 4   | Risco remanescente reduzido                                                                    |

Quando, através da classificação, se identificam níveis de risco que entram em conflito com os critérios de aceitação fixados é necessário prever medidas para a sua redução e registar na documentação específica, “Project Risk Register”, o tipo e as características das acções mitigadoras previstas.

Os objectivos gerais, estabelecidos na política de risco, devem ser aplicados na definição dos critérios de aceitação dos riscos empregues nas análises qualitativas e quantitativas dos riscos. Para todos os riscos sujeitos a uma análise quantitativa é estabelecido:

- Um limite superior inaceitável de risco, para qual as medidas mitigadoras devem ser implementadas independentemente do seu custo;
- Um limite inferior, a partir do qual não é considerada uma redução suplementar do risco;
- Um intervalo entre estes dois valores onde as medidas mitigadoras devem ser consideradas de acordo com as circunstâncias específicas, segundo os objectivos fixados na política de risco.

Para riscos de interesse específico, devido à sua magnitude ou extrema importância no projecto, pode ser necessária uma análise mais detalhada. Os resultados desta análise devem ser incluídos no “Project Risk Register”.

Toda a informação relativa ao risco recolhida e analisada durante a fase inicial do projecto é compilada e transmitida a todos os intervenientes através de um documento, o “Project Risk Register”.

#### 4.1.2 AVALIAÇÃO DAS PROPOSTAS E NEGOCIAÇÕES CONTRATUAIS

##### 4.1.2.1 Gestão do risco na elaboração do concurso

As propostas dos empreiteiros reflectem a sua capacidade e a sua perspectiva sobre a gestão do risco. Nesta fase, o principal responsável pela gestão do risco é o dono de obra porque é da sua responsabilidade a selecção da proposta vencedora e dos seus riscos intrínsecos, devendo para isso avaliar as vantagens, desvantagens e riscos associados a cada proposta.

No interesse de promover a competição e o sucesso na avaliação das propostas, especial atenção deve ser dedicada à elaboração do caderno de encargos, incluindo neste documento:

- Informações técnicas e outras para promover a gestão dos riscos de acordo com a política estabelecida;
- A última actualização da avaliação qualitativa dos riscos, realizada preferencialmente na altura de preparação do caderno de encargos;
- A informação requerida aos concorrentes, para a avaliação da sua capacidade em gerir os riscos e avaliação dos riscos associados a cada proposta;
- Os requisitos associados à gestão de risco levada a cabo pelo empreiteiro durante a execução do contrato.

Para uma avaliação completa do risco associado a cada proposta, devem ser requeridas aos concorrentes as seguintes informações:

- Informação sobre a gestão de riscos empregue em projectos similares e os seus resultados;
- O CV das pessoas responsáveis pela gestão de risco e os detalhes sobre qualquer outro interveniente neste processo;
- Descrição geral da organização e dos seus objectivos na gestão do risco;
- Enumeração e descrição dos riscos mais significativos associados à sua proposta;
- Estratégia empregue na gestão dos riscos mais significativos do projecto.

As informações recolhidas permitem ao dono de obra avaliar a capacidade de cada concorrente em proceder às necessárias análises de riscos e estimar o seu desempenho na gestão destes ao longo do projecto. Estas informações são muito relevantes na comparação do nível de competência das equipas envolvidas no projecto de cada concorrente e, implicitamente, do risco associado a cada proposta.

No caderno de encargos deve ser especificado que a gestão de risco a realizar pelo empreiteiro deve obedecer à política de risco definida pelo dono de obra. A gestão do risco realizada por estas duas entidades deve ser compatível, de modo a minimizar e a facilitar o controlo dos riscos das diversas entidades envolvidas. Neste sentido, no caderno de encargos definem-se os requisitos a que deve obedecer a gestão de riscos implementada pelo empreiteiro, e que incluem:

- Organização e qualificação da equipa responsável pela gestão do risco;
- Tipo de riscos a considerar e avaliar, imputáveis ao empreiteiro de acordo com a proposta elaborada;
- Actividades mínimas a realizar durante a gestão do risco (análise sistemática do risco e sua classificação por frequência e impacto e identificação de medidas para a sua eliminação ou mitigação);
- Elaboração de prazos para as diversas actividades associadas à gestão do risco, incluindo os requisitos para a sua identificação atempada para que seja possível a implementação das medidas mitigadoras previstas com sucesso;
- Coordenação entre a equipa de gestão do risco e dono de obra;
- Coordenação com a gestão do risco de outros concorrentes;
- Coordenação entre a gestão do risco e outros departamentos dentro da estrutura do empreiteiro, nomeadamente o controlo de qualidade e o controlo ambiental;
- Controlo do risco associado às actividades sub-contratadas;
- Requisitos específicos na gestão do risco (por exemplo: modificações do método construtivo em áreas críticas do projecto, aferição do risco afecto a estruturas de terceiros e riscos associados à manutenção ou rebaixamento do nível freático).

Para além destes requisitos, deve ser especificado no caderno de encargos que o empreiteiro é o responsável por uma gestão eficaz do risco, independentemente da extensão e qualidade da informação sobre o risco disponibilizada pelo dono de obra. Durante a construção é fundamental a cooperação entre o dono de obra e o empreiteiro através da constituição de uma equipa mista para a gestão do risco.

#### 4.1.2.2 Gestão do risco na avaliação e selecção das propostas

Nesta fase, a aplicação da gestão do risco pelo dono de obra é fundamental para a avaliação e selecção da melhor proposta. A avaliação das propostas pode ser qualitativa, através de um sistema de pontos que têm por base a matriz de risco, ou quantitativa, através de uma análise mais pormenorizada do risco que avalia o custo efectivo das diversas propostas.

A principal desvantagem da abordagem simplista da avaliação qualitativa dos riscos é o facto de esta não traduzir as incertezas associadas à determinação do risco, atribuindo valores determinísticos para a probabilidade e impacto de determinado evento.

Na avaliação quantitativa define-se um intervalo e o valor mais provável para o impacto e para a probabilidade de ocorrência, assumindo-se uma distribuição estatística destes valores na determinação do risco. Estes valores são fixados através da compilação de informação estatística de projectos similares ou através da consulta de especialistas com vasta experiência em projectos de características semelhantes. As principais vantagens deste tipo de avaliação são:

- Melhor descrição do risco, definição do valor mais provável, mínimo e máximo em comparação com a definição de risco determinística da avaliação quantitativa;
- A fixação de um intervalo de valores é mais simples para a estimação do risco do que a fixação de apenas um valor (devido às incertezas associadas à determinação das probabilidades e impactos que, normalmente, são estabelecidas com base na experiência e bom senso e só muito raramente em informação estatística);
- A possibilidade de definir valores característicos do risco (a estimativa do risco é uma função distribuição da probabilidade e não um valor determinístico)

A quantificação dos riscos é particularmente adequada na avaliação do risco económico e do risco de atrasos na conclusão do projecto. No entanto, os resultados produzidos por esta análise para certos riscos podem não ser de confiança. Neste caso uma comparação qualitativa dos riscos pode ser a única solução. A avaliação quantitativa, pelo seu grau de complexidade, pode ser preterida a favor de uma solução mais expedita como a avaliação qualitativa dos riscos.

A maioria dos riscos identificados são eliminados durante o processo de concepção, considerados no mapa de trabalhos e quantidades ou previstos no contrato através de cláusulas específicas. Os riscos remanescentes não eliminados ou previstos no caderno de encargos são quantificados para cada proposta. Através desta quantificação é possível estabelecer um nível semelhante de comparação entre as propostas, mesmo que o valor absoluto do risco associado seja incerto. Para a comparação das propostas submetidas através de uma análise quantitativa dos riscos é aconselhável, durante o período de tempo entre a abertura do concurso e apresentação das propostas, a avaliação quantitativa dos riscos previstos no projecto pelo dono de obra. O risco associado a cada proposta é quantificado através da comparação com a avaliação realizada pelo dono de obra, considerando para cada risco as diferenças de probabilidade e impactos estimados. O risco associado a cada proposta é um factor decisivo para a sua selecção.

Na avaliação das propostas, para o túnel ferroviário de Wienerwald (Áustria), para além do custo global, aplicaram-se outro tipo de critérios para aferir o custo real ou modificado de cada proposta, incluindo [46]:

- Custo global;
- Aumento ou redução do tempo de construção base (factor a);
- Aumento ou redução do risco identificado (factor b);
- Custos adicionais dos trabalhos subsequentes (factor c).

Neste caso, para diferentes métodos construtivos (TBM e NATM) foi estimado um tempo médio de construção pelo dono de obra. Também foram estimados, em função do tempo de construção, os custos para o dono de obra da gestão do projecto, supervisão da construção, interpretação geotécnica da monitorização instalada e outros. Nas propostas apresentadas, o tempo de construção foi estimado de acordo com as velocidades de avanço previstas pelo empreiteiro que, caso não cumpra os prazos estabelecidos, pode ser penalizado.

O factor a contabiliza os custo para o dono de obra do aumento ou redução do tempo de construção relativamente ao previsto pelo dono de obra. O factor b contabiliza o custo do risco associado a cada proposta e para a escavação com tuneladora compara os parâmetros do equipamento proposto com as especificações definidas em projecto. Esta é a maneira encontrada para contabilizar, na comparação das proposta, o risco associado ao equipamento. O factor c, contabiliza os custos de cada proposta para os trabalhos subsequentes à escavação como, por exemplo, a instalação dos carris. A melhor oferta é aquela que, tendo em consideração todos estes parâmetros, apresenta um custo real ou modificado mais baixo [46].

#### 4.1.2.3 Caso do Metro de Copenhaga

As avaliações quantitativas e qualitativas do risco têm sido aplicadas com sucesso a vários projectos de obras subterrâneas. Um bom exemplo da gestão do risco na avaliação de propostas e selecção da proposta final é do Metro de Copenhaga.

Neste caso, o dono de obra realizou uma análise quantitativa dos riscos associados ao projecto em questão. De acordo, com o bom senso da equipa de projectistas e experiência de consultores externos avaliaram-se as diferenças em termos de probabilidade e consequências dos riscos identificados, para as diferentes propostas, em relação à avaliação inicial do risco do projecto. Paralelamente à quantificação dos riscos, realizou-se uma avaliação qualitativa do risco de danos a terceiros. Este tipo de análise foi escolhido porque, de acordo com a política de riscos estabelecida, o risco de danos a terceiros era inaceitável. O risco total das propostas foi quantificado através de uma análise de Monte Carlo. Esta análise permitiu estimar o valor mais provável para o custo do risco presente em cada proposta.

Na avaliação das propostas, para além do seu preço, contabilizou-se o custo do risco, o custo de actualização e outros. O custo de actualização contabiliza os melhoramentos que são necessários introduzir na estrutura do empreiteiro, no sentido de melhorar o seu nível de qualidade para o exigido em projecto. Os outros custos estão associados a manutenções e operações adicionais que não foram contabilizados na avaliação inicial. Uma especial atenção deve ser conferida à atribuição dos custos de actualização, visto que estes podem já ter sido contabilizados no custo do risco [45].

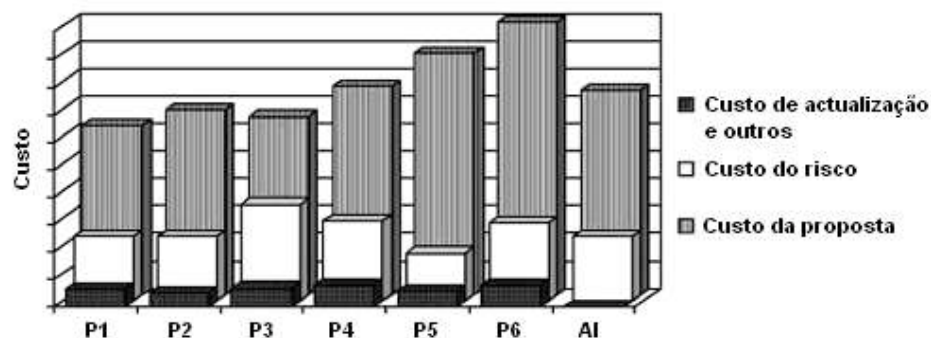


Fig. 4.3 – Resultado da avaliação de seis proposta (Pi) e avaliação inicial (AI) [45]

Pela análise das propostas e comparação com a avaliação inicial, constata-se que o nível de risco varia significativamente e que o valor mais baixo não está associado à proposta mais elevada. O risco mais baixo corresponde à proposta cinco, mas o seu preço elevado não justifica por si só esta redução. A obra acabou por ser adjudicada à empresa que apresentou a proposta um. No entanto, é de salientar que sem a análise de risco uma decisão sobre a adjudicação da obra seria mais difícil, pois as propostas um, dois e três apresentaram preços muito idênticos. O nível de risco muito elevado identificado na proposta três conduziu à sua eliminação. Após uma revisão dos riscos presentes nas propostas restantes concluiu-se que o nível de risco apresentado pela proposta um era o mais baixo.

#### 4.1.2.4 Gestão do risco na elaboração do contrato

Na elaboração do contrato deve ser incluída uma descrição do sistema de gestão do risco a implementar. Entre as duas partes devem existir negociações no sentido de prever soluções técnicas alternativas para os riscos identificados e referidos no contrato. Nesta fase podem ser identificados riscos não previstos ou que requerem atenções especiais. Caso estes existam devem ser previstas cláusulas, no contrato, para a implementação de medidas mitigadoras adicionais.

#### 4.1.3 CONSTRUÇÃO

Durante a construção o principal responsável pela implementação do sistema de gestão do risco é o empreiteiro. A função do dono de obra é de supervisionar e apoiar o empreiteiro nesta gestão e de aferir e mitigar os riscos que ainda lhe estão associados. Para uma gestão do risco eficiente é importante uma boa cooperação entre dono de obra e o empreiteiro numa equipa mista.

Na fase inicial do projecto, ou durante a avaliação das propostas e negociações contratuais, certos riscos podem ser transferidos contratualmente ou segurados, outros podem ser mantidos e alguns podem ainda ser eliminados ou mitigados. Durante a construção, a capacidade de transferir o risco é mínima. Desta forma, a estratégia mais vantajosa tanto para o dono de obra como para o empreiteiro é de reduzir ao máximo a sua magnitude, através do planeamento e da implementação de medidas para a eliminação ou mitigação dos riscos.

##### 4.1.3.1 Gestão do risco por parte do empreiteiro durante a construção

O sistema utilizado para a identificação e gestão do risco pelo empreiteiro deve ser compatível com o sistema utilizado pelo dono de obra.

Nos casos em que a implementação destas medidas origine atrasos significativos, prejuízo financeiro ou outro tipo de inconvenientes para o dono de obra, esta entidade deve aprovar a implementação destas medidas. A antecipação do risco e a rápida adopção de medidas mitigadoras são a chave para um controlo eficaz do risco. Neste sentido, é importante que os processos de identificação, classificação, decisão e mitigação dos riscos sejam completamente compreendidos pelo empreiteiro de modo a agilizar todo este processo.

A identificação e o controlo dos risco e técnicas envolvidas devem ser vistas como uma parte essencial das actividades de construção.

A estratégia empregue na gestão do risco deve ser implementada por todos os trabalhadores envolvidos na construção, a quem deve ser fornecida informação e treino específico de acordo com a

sua função. O dono de obra deve ser convidado a assistir e participar nas reuniões, apresentações e sessões de treino promovidas pelo empreiteiro.

O empreiteiro deve elaborar e actualizar um documento, o “Project Risk Register”, que contém todos os detalhes sobre os riscos identificados e sua classificação. Todos os acidentes, incidentes e outras experiências devem ser incluídos neste documento e analisados. Os resultados desta análise devem ser divulgados para prevenir eventos semelhantes e para melhorar o sistema implementado de gestão do risco.

Os planos de contingência e emergência para situações de risco devem ser elaborados e mantidos durante o período de construção. A cooperação entre as entidades envolvidas no projecto e os serviços de emergência, bem como a realização de exercícios regulares, contribui para a eficácia destes planos.

#### 4.1.3.2 Gestão do risco por parte do dono de obra durante a construção

O dono de obra deve continuar a gerir os riscos que lhe são imputáveis, dedicando especial atenção aos riscos económicos e de atrasos na construção. A implementação de medidas mitigadoras associadas a estes riscos são da sua responsabilidade. Este deve também, encorajar e monitorizar a gestão do risco realizada pelo empreiteiro através de, por exemplo, auditorias de qualidade.

A monitorização permite ao dono de obra permanecer informado sobre os riscos identificados pelo empreiteiro, assegurando-se desta forma que a gestão de risco está a ser correctamente implementada. O dono de obra ou a equipa mista de gestão do risco devem procurar, durante a construção, discrepâncias entre as medidas mitigadoras previstas e as realmente aplicadas. Este controlo permite determinar quais as falhas no sistema de gestão de risco do empreiteiro e corrigi-las.



# 5

## **SISTEMAS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS EXTENSOS**

### **5.1 SISTEMAS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS EXTENSOS**

A segurança é cada vez mais um aspecto fundamental na construção, ao ponto de a viabilidade de uma obra estar directamente relacionada com a sua segurança. Devido à relativa novidade dos túneis rodoviários extensos em Portugal, é fundamental para o sucesso deste tipo de empreendimento um elevado nível de segurança durante a fase de serviço.

Para qualquer tipo de obra, os aspectos relacionados com a segurança na fase da construção são distintos dos aspectos que surgem durante a fase de exploração.

Nesta tese vamos abordar os sistemas de segurança na fase de exploração do túnel porque, devido ao seu elevado custo e exigências de nível técnico e de segurança, são fundamentais para o seu funcionamento. No sentido de regularizar e regulamentar estes sistemas foi publicado a 27 Março de 2006, o Decreto-Lei 75/2006, que define quais os requisitos mínimos de segurança para os túneis rodoviários com extensão superior a 500m. Importa no entanto salientar que este documento define apenas os requisitos mínimos de segurança, ou seja, é possível que em certos túneis devido a condicionantes específicas, seja prudente instalar dispositivos de segurança que excedam os requisitos mínimos.

Um sistema de segurança funcional tem por base uma organização constituída por diversas entidades, cuja função é integrar elementos como os equipamentos de segurança e a sinalização num plano global de segurança.

Nesta tese, a análise destes sistemas irá recair sobre os seus principais constituintes [50]:

- As entidades de segurança;
- Os equipamentos de segurança;
- A sinalização rodoviária do túnel.

A concepção do túnel e os seus sistemas de segurança são fulcrais para a avaliação do risco na fase de exploração da obra. Este tipo de avaliação foi recentemente realizado, pela primeira vez em Portugal, para o túnel de Benfica/CRIL. A avaliação dos riscos durante a fase de exploração engloba: a análise do risco associado ao transporte de materiais perigosos, a optimização de procedimentos de segurança, a minimização de possíveis danos humanos e materiais (provocados pelo fogo) e a optimização da concepção do túnel.

## 5.2 ENTIDADES DE SEGURANÇA

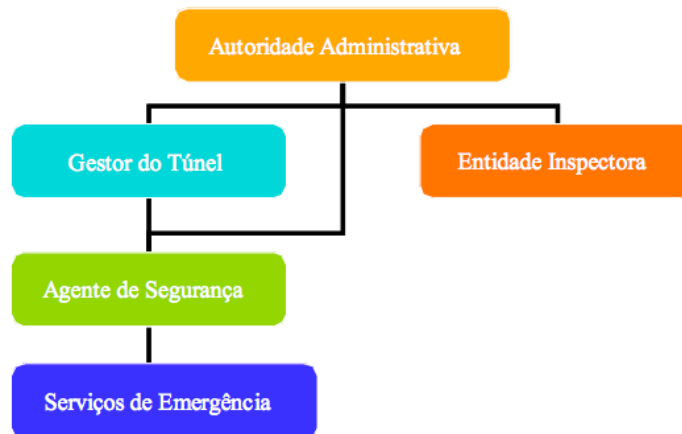


Fig. 5.1 - Organograma dos principais intervenientes e responsáveis pela segurança em túneis rodoviários

### 5.2.1 AUTORIDADE ADMINISTRATIVA

Esta autoridade é exercida pela Estradas de Portugal, organismo máximo responsável pelo respeito de todos os aspectos relacionados com a segurança de um túnel.

Principais deveres e funções deste organismo:

- Realização de testes e inspeções regulares aos túneis e a elaboração dos respectivos requisitos de segurança;
- Aplicação de programas de organização, funcionamento e formação, incluindo os planos de resposta de emergência e o equipamento dos serviços de emergência;
- Definição dos procedimentos para o encerramento imediato de um túnel em caso de emergência;
- Aplicação de medidas necessárias à redução do risco;
- Suspensão ou restrição da exploração do túnel, caso não sejam respeitados os requisitos de segurança;
- Definir em que condições pode ser restabelecida a circulação.

A autoridade administrativa está habilitada a desempenhar as funções de gestor do túnel e de entidade inspetora. No entanto, por uma questão de conflito de interesses nunca pode desempenhar ambas as funções simultaneamente.

### 5.2.2 GESTOR DO TÚNEL

Esta entidade é responsável pela gestão global do túnel.

Principais deveres e funções deste organismo, associados à segurança da exploração:

- Elaboração de relatórios de ocorrência para qualquer incidente ou acidente importante ocorrido no túnel;
- Nomeação do Agente de Segurança, em concordância com a autoridade administrativa.

### 5.2.3 ENTIDADE INSPECTORA

Organismo com elevado nível de competência, responsável por inspecções, avaliações e ensaios à segurança do túnel.

Principais deveres e funções deste organismo:

- Realização de inspecções regulares (período de intervalo inferior a 6 anos);
- Realização de análises de risco.

### 5.2.4 AGENTE DE SEGURANÇA

Entidade coordenadora de todas as medidas preventivas e de salvaguarda, cujo objectivo é garantir a segurança dos utentes e do pessoal afecto à exploração do túnel.

Principais deveres e funções deste organismo:

- Assegurar a coordenação com os serviços de emergência e participação na preparação dos programas operacionais;
- Participar na planificação, execução e avaliação das operações de emergência;
- Participar na definição dos planos de segurança, na especificação da estrutura e dos equipamentos dos novos túneis e dos já existentes, através de, neste último caso, da introdução de modificações;
- Verificar se o pessoal operacional e dos serviços de emergência recebe formação e participa nos exercícios realizados periodicamente;
- Emitir pareceres relativos à entrada em serviço da estrutura e dos equipamentos;
- Garantir que a estrutura e os equipamentos são mantidos em bom estado de funcionamento;
- Participar na avaliação de qualquer incidente ou acidente importante.

O agente é independente da sua entidade patronal (Gestor do Túnel) em todas as questões relacionadas com a segurança do túnel rodoviário.

### 5.2.5 SERVIÇOS DE EMERGÊNCIA

Todos os serviços locais, públicos ou privados e parte do pessoal afecto ao túnel que intervém em caso de acidente, incluindo os serviços de polícia, os bombeiros e as equipas de salvamento.

## 5.3 EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA

Os equipamentos de segurança a instalar num túnel rodoviário são parte fundamental do sistema de segurança. De facto, sem estes elementos é impossível garantir níveis elevados de segurança por muito boa que seja a sinalização rodoviária ou a coordenação por parte das entidades responsáveis.

Os requisitos mínimos de segurança para estes equipamentos estão previstos no Decreto-Lei 75/2006. No entanto, a análise deste regulamento pode tornar-se bastante complexa devido aos inúmeros equipamentos a instalar. Neste sentido, resolveu-se agrupar por função os diversos equipamentos e, a partir daí, analisar quais os requisitos mínimos a que devem obedecer. Os principais grupos de equipamentos de segurança são assim: os equipamentos de emergência, a iluminação, a ventilação e os sistemas de comando e controlo.

O regulamento Português consiste na transcrição para a ordem jurídica nacional de uma directiva europeia criada com o objectivo de assegurar um nível mínimo de segurança para este tipo de estruturas em toda a rede rodoviária transeuropeia. Após os desastres fatais nos túneis de Mont-Blanc e Gottard, a Comissão Europeia para a Energia e Transporte decidiu implementar esta directiva como um requisito mínimo de segurança. No entanto, diversos países europeus como a Áustria, a Suíça, a França e o Reino Unido, ao contrário de Portugal, já possuíam os seus próprios regulamentos de segurança para túneis rodoviários. Em muitos casos estes regulamentos são mais exigentes e detalhados que a própria directiva europeia. Assim torna-se imperativo realizar uma análise dos requisitos de segurança nacionais destes países, de forma a tirar partido da sua experiência na utilização deste tipo de estruturas. A definição dos equipamentos de segurança a instalar, bem como os requisitos mínimos a que devem obedecer, foram assim produto de uma investigação e compilação de vários regulamentos, para além do já em vigor em Portugal.

A metodologia utilizada consistiu em:

- Identificar os principais equipamentos de segurança e respectivas funções;
- Analisar os requisitos mínimos a que devem obedecer recorrendo ao DL 75/2006;
- Comparar as exigências deste com a de outros regulamentos Europeus;
- Complementar a informação em falta utilizando outros regulamentos.

Quadro 5.1 - Requisitos mínimos para os equipamentos de segurança a instalar num túnel rodoviário segundo o DL 75/2006 [50]

| Função                               | Condições / Requisitos                                                                                                                          | Art °  |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Instalações de segurança             |                                                                                                                                                 |        |
| Saídas de Emergência                 | Localizadas a uma distância $\leq 500$ m (ex: ligações transversais entre galerias do túnel)                                                    | 2.3.8  |
| Acesso dos Serviços de Emergência    | Devem existir ligações transversais entre as galerias que permitam o acesso dos serviços de emergência, a uma distância sempre inferior a 1500m | 2.4.1  |
| Áreas de Paragem de Emergência       | Não é obrigatória para túneis de apenas um sentido de circulação                                                                                | 2.5    |
| Postos de Emergência                 | Distanciados no máximo de 150m são equipados com um telefone e dois extintores                                                                  | 2.10   |
| Alimentação de água                  | Bocas de incêndio afastadas no máximo de 250m                                                                                                   | 2.11   |
| Alimentação de energia de emergência | Assegura o funcionamento do equipamento de segurança indispensável à evacuação dos utentes                                                      | 2.17.1 |

Quadro 5.1 (continuação) - Requisitos mínimos para os equipamentos de segurança a instalar num túnel rodoviário segundo o DL 75/2006 [46]

| Função                                        | Condições / Requisitos                                                                                                                                                                                | Art °           |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Iluminação                                    |                                                                                                                                                                                                       |                 |
| Iluminação normal                             | Assegurar uma boa visibilidade na entrada e interior do túnel                                                                                                                                         | 2.8.1           |
| Iluminação de segurança                       | Assegurar a visibilidade mínima, em caso de corte do fornecimento de energia                                                                                                                          | 2.8.2           |
| Iluminação de evacuação                       | Localizadas a uma altura nunca inferior a 1,5m, as luzes de marcação devem guiar os utentes numa situação de emergência                                                                               | 2.8.3           |
| Ventilação                                    |                                                                                                                                                                                                       |                 |
| Ventilação mecânica                           | Deve ser utilizada em túneis com extensão superior a 1000m                                                                                                                                            | 2.9.2           |
| Ventilação transversal ou semi-transversal    | Deve ter capacidade para extrair fumo e controlar a propagação do incêndio                                                                                                                            | 2.9.4/<br>2.9.5 |
| Sistemas de comando e controlo                |                                                                                                                                                                                                       |                 |
| Centro de controlo                            | Previsto em túneis de extensão superior a 3000m                                                                                                                                                       | 2.13            |
| Sistemas de vigilância                        | Circuito interno de televisão e sistemas automáticos de detecção de incidentes de trânsito                                                                                                            | 2.14            |
| Equipamentos de encerramento do túnel         | Instalação na entrada do túnel de semáforos e, opcionalmente, de meios adicionais como painéis ou sinais de mensagem variável, por forma a permitir o encerramento do túnel em caso de emergência     | 2.15.1          |
| Equipamentos de encerramento parcial do túnel | Equipamento destinado a imobilizar os veículos em caso de emergência em intervalos não superiores a 1000m, constituído por semáforos, altifalantes, painéis, sinais de mensagem variável ou barreiras | 2.15.2          |
| Sistemas de comunicação                       | Equipamento de retransmissão de radiodifusão para uso do serviço de emergência e para difundir mensagens de rádio e de emergência para os utentes do túnel                                            | 2.16            |
| Sistemas eléctricos de medição e comando      | Devem ser concebidos e construídos de forma a que uma avaria local não afecte os circuitos que se encontrem ainda em funcionamento                                                                    | 2.17.2          |

Seguidamente são apresentados os resultados desta pesquisa pela função e tipo de equipamento de segurança a instalar.

### 5.3.1 INSTALAÇÕES DE SEGURANÇA

#### 5.3.1.1 Saídas de Emergência



Fig. 5.2 – Saída de emergência [51]

Em caso de acidente ou incêndio, as saídas de emergência devem permitir a evacuação do túnel e proporcionar o acesso dos serviços de emergência. Como exemplos de saídas de emergência, citam-se os seguintes [52]:

- Saídas directas do túnel para o exterior;
- Ligações transversais entre galerias do túnel;
- Saídas para uma galeria de emergência;
- Abrigos com uma via de evacuação independente da galeria do túnel.

No caso de túneis paralelos torna-se economicamente e tecnicamente mais viável estabelecer ligações transversais entre os túneis como saída de emergência. Estas passagens transversais devem ser ventiladas, iluminadas e retardadoras do fogo, para isso, nas suas extremidades devem existir duas portas corta-fogo (CF120 a CF240). Em caso de incêndio, o operador deve imediatamente encerrar o tráfego no túnel de sentido contrário para salvaguardar as pessoas que estão a evacuar para esse túnel.

A distância entre as saídas de emergência não deve ser superior a 500m. Para determinar a distância mínima entre as saídas deve-se, no entanto, proceder a uma análise de risco, como definido no Artigo 20º, onde se analisam [50]:

- As características do tráfego;
- A extensão do túnel;
- O tipo de tráfego;
- A geometria do túnel;
- O número de veículos pesados e de mercadorias previstos por dia.

Após esta análise de risco, é possível estimar a eficácia do sistema de ventilação e assim fixar a distância mínima entre as saídas de emergência. Os regulamentos Alemão e Suíço recomendam, respectivamente, distâncias mínimas para as saídas de emergência de 350 e 300m [53].

### 5.3.1.2 Áreas de Paragem de Emergência



Fig. 5.3 – Área de paragem de emergência [51]

As áreas de paragem de emergência devem ser utilizadas apenas em casos de emergência por veículos avariados que, de outra forma, parariam na faixa de rodagem. Esta medida é assim implementada no sentido de garantir uma fluidez do trânsito. As áreas de paragem de emergência devem possuir um posto de emergência.

No regulamento português, para o caso de túneis unidireccionais, não é definida a obrigatoriedade em construir estas zonas. No entanto, através de uma análise de vários regulamentos, concluímos que a sua presença é recorrente mesmo neste tipo de túneis.

O regulamento Austríaco determina que em túneis unidireccionais, com extensão superior a 1000m, são obrigatórias áreas de paragem de emergência em intervalos de 850m a 1000m, devendo estas ser localizadas do lado direito da faixa de rodagem. O regulamento Suíço difere muito pouco do anterior, ao propor para túneis unidireccionais com extensão superior a 1500m, áreas de paragem de emergência em intervalos de 600m a 900m [53].

### 5.3.1.3 Acesso dos Serviços de Emergência



Fig. 5.4 - Ligação transversal utilizada pelos serviços de emergência [51]

Nos túneis de galeria dupla que se situem ao mesmo nível devem existir, pelo menos de 1500 m em 1500 m, ligações transversais apropriadas para serem utilizadas pelos serviços de emergência [50].

### 5.3.1.4 Galerias de inversão

As galerias de inversão são ligações transversais estabelecidas entre os dois túneis paralelos, com o propósito de evacuar os veículos em caso de emergência. Não estão previstas no regulamento Português. No entanto, depreende-se que caso seja necessário proceder à evacuação de veículos as áreas de acesso dos serviços de emergência possam ser utilizadas como galerias de inversão.

A grande vantagem deste tipo de ligações é permitir aos serviços de emergência evacuar os veículos que se encontram dentro do túnel, mas ainda longe das zonas de incêndio. Como desvantagem refere-se o elevado custo da execução destas ligações.

As galerias de inversão, de acordo com o regulamento Austríaco, devem ser dispostas alternadamente nas áreas de paragem de emergência, ou seja, estas galerias distam entre si 2000m. O regulamento Alemão obriga a uma distância mínima de aproximadamente 3000m [53].

#### 5.3.1.5 Postos de Emergência



Fig. 5.5 – Posto de emergência [47]

Os postos de emergência são caixas ou nichos na parede lateral equipados, pelo menos, com um telefone e dois extintores. Caso o posto de emergência se encontre separado do túnel por uma porta, deve existir sinalização em varias línguas que indique “Esta área não garante protecção em caso de incêndio siga os sinais que indicam a saída de emergência”. O intervalo entre postos de emergência deve ser inferior a 150m [50].

#### 5.3.1.6 Alimentação de água

Todos os túneis deverão dispor de alimentação de água. Devem ser previstas bocas de incêndio perto das entradas e no interior dos túneis, em intervalos não superiores a 250 m [50]. Caso não exista alimentação contínua de água é obrigatório o fornecimento de água por outros meios.

Após uma análise dos regulamentos de diversos países europeus concluiu-se que as bocas de incêndio em túneis devem ter uma pressão mínima de 6 bar e uma capacidade de 20l/s [52].

#### 5.3.1.7 Alimentação de energia de emergência

Todos os túneis devem possuir um sistema de emergência de alimentação de energia capaz de assegurar o funcionamento dos equipamentos de segurança indispensáveis à evacuação do túnel.

### 5.3.2 ILUMINAÇÃO

#### 5.3.2.1 Iluminação Natural

A iluminação natural deve assegurar em todas as alturas uma boa visibilidade na zona de entrada do túnel.

### 5.3.2.2 Iluminação de Segurança

Deve ser prevista iluminação de segurança por forma a assegurar uma visibilidade mínima que permita a circulação dos veículos e/ou evacuação dos utentes, em caso de corte do fornecimento de energia. Esta iluminação é garantida por uma unidade de alimentação ininterrupta (UPS) que normalmente está ligada a uma em cada três ou quatro luzes do sistema de iluminação normal, bem como a toda a iluminação de evacuação.

### 5.3.2.3 Iluminação de Evacuação



Fig. 5.6 – Iluminação de evacuação [51]

Em caso de evacuação as luzes de marcação, localizadas a uma altura nunca inferior a 1,5m, devem guiar os utentes para as saídas de emergência. Estes sistemas devem permanecer sempre ligados no sentido de alertar os condutores para a sua presença e de forma a verificar o seu correcto funcionamento. Para além destas luzes, todos os sinais internacionais de saídas de emergência e de distância para estas, em todas as alturas, devem permanecer operacionais [50].

### 5.3.2.4 Aspecto Geral do Túnel



Fig. 5.7 – Guia de encaminhamento [51]

Embora o tipo de acabamento interior do túnel não seja abordado pelo regulamento [50], este aspecto está directamente relacionado com a segurança, especialmente em túneis extensos onde o cansaço visual pode ser a causa de acidentes. Recomenda-se assim, muitas vezes, a quebra desta monotonia através da aplicação de padrões e variações no design interior das paredes do túnel. Um outro aspecto a salientar, é a utilização de guias de cores vivas nas paredes, que permitem em condições de visibilidade reduzida encaminhar os utentes do túnel para as saídas de emergência (figura 5.7) [53].

### 5.3.3 SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A concepção, a construção e o funcionamento dos sistemas de ventilação devem ter em conta [52]:

- O controlo da poluição no interior do túnel em condições de tráfego normais e em situações de paragem devido ao congestionamento do tráfego;
- O controlo de poluição nos portais e nas condutas, de forma a garantir uma qualidade mínima no ar poluído libertado para o exterior;
- A garantia das condições mínimas de visibilidade e segurança através do controlo do fumo proveniente de incêndios.

As normas europeias de controlo da poluição dos veículos motorizados “EURO IV” estão cada vez mais exigentes. Com o tempo espera-se assim uma redução das emissões produzidas pelos veículos e, consequentemente, da potência necessária dos sistemas de ventilação mecânicos.

No futuro, o principal critério para o dimensionamento destes sistemas será assim a sua capacidade para a extracção de fumos devidos a incêndio.

Quadro 5.2 – Sistemas de ventilação existentes [52]

| Tipo de ventilação                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------|
| Ventilação Natural (provocada pelas condições meteorológicas e tráfego) |
| Ventilação Mecânica (Longitudinal, Transversal, Semi-Transversal)       |
| Ventilação Natural combinada com sistema mecânico                       |

#### 5.3.3.1 Ventilação Natural

O sistema de ventilação natural tem por base fenómenos naturais, como o vento e as diferenças de pressão, para movimentar o ar no interior dos túneis. Outro efeito a ter em conta é a ventilação induzida pelo tráfego, especialmente em túneis com apenas um sentido de circulação.

Este tipo de sistemas é muita vezes complementado por um sistema mecânico, normalmente “jet-fans”, utilizadas em condições adversas ou de tráfego parado. Este tipo de ventilação pode apenas ser utilizado em túneis de extensão inferior a 1000m.

#### 5.3.3.2 Ventilação Mecânica Longitudinal

O sistema de ventilação mecânico longitudinal é o sistema mais económico para ventilar túneis rodoviários, sendo particularmente adequado a túneis com apenas um sentido de circulação onde a ventilação induzida pelo tráfego auxilia o sistema mecânico. Neste tipo de sistema de ventilação, o ar entra limpo por um portal e fica gradualmente mais poluído à medida que circula para o portal de saída. A sua utilização apenas é autorizada se for possível demonstrar que esta solução é aceitável (através de uma análise de risco) ou se forem adoptadas medidas específicas, tais como a gestão adequada do tráfego, menores distâncias entre as saídas de emergência, ou extractores de fumo em intervalos regulares.

### 5.3.3.3 Ventilação Mecânica Transversal e Semi-Transversal

Para casos em que a análise de risco não autorize a utilização de sistemas de ventilação longitudinais, o regulamento propõe a utilização de sistemas transversais ou semi-transversais.

Os sistemas transversais são mais dispendiosos e difíceis de instalar. Neste tipo de ventilação, o ar limpo entra por condutas dispostas paralelamente ao túnel e é recolhido por condutas de exaustão no lado oposto. Assim, a qualidade do ar ao longo do túnel é constante. O ar ventilado circula em condutas propositadamente construídas para o efeito. Em túneis de grande extensão é necessária a instalação de condutas de grande dimensão devido ao elevado caudal de ar. Em caso de incêndio, nessa secção, a exaustão é aumentada para o máximo enquanto o caudal de ar nas secções transversais adjacentes é controlado, de forma a direccionar o fumo longitudinalmente. Este sistema, pelas suas características, é particularmente adequado em túneis de grande extensão.

Os sistemas de ventilação semi-transversais funcionam através da adição de ar limpo por condutas paralelas ao túnel enquanto o ar poluído circula longitudinalmente. Este tipo de sistema é mais económico que o transversal dado que prescinde da conduta específica para a exaustão. Em caso de incêndio é possível reverter este processo passando as condutas paralelas ao túnel a funcionar, na secção do incêndio, em exaustão.

Ambos os sistemas devem ser capazes de extrair o fumo, em caso de incêndio, e controlar a sua propagação [52].

### 5.3.4 SISTEMAS DE COMANDO E CONTROLO

#### 5.3.4.1 Centro de controlo



Fig. 5.8 - Centro de comando e controlo [51]

O centro de controlo é responsável pela gestão de toda a informação (obtida pelas câmaras de vigilância, sistemas de detecção de incêndio e sensores de opacidade), pelo controlo dos sistemas de ventilação e pela coordenação com os serviços de emergência.

Está previsto em todos os túneis de extensão superior a 3000 m e volume de tráfego superior a 2000 veículos por via [50].

#### 5.3.4.2 Sistemas de Vigilância

Os sistemas de vigilância têm como finalidade alertar as autoridades para possíveis incidentes no interior do túnel. Estes sistemas são particularmente adequados em túneis extensos, onde é necessária uma boa coordenação dos serviços de emergência para localizar rapidamente qualquer tipo de incidente.

Os sistemas de vigilância actualmente aplicados em túneis rodoviários são [52]:

- Circuito interno de televisão;
- Sistemas automáticos de detecção de incidentes;
- Sistemas automáticos de detecção de incêndios.

Um dos sistemas mais adequados para a vigilância deste tipo de infra-estruturas é o circuito interno de televisão, que pode ser complementado com equipamento de detecção automática de incêndios.

O regulamento Português estipula que, para túneis com centros de controlo, devem ser instalados sistemas de videovigilância capazes de facilmente identificar e localizar possíveis incidentes no túnel. Este sistema deve ser complementado por um sistema automático de detecção de incidentes de trânsito que utiliza tecnologias de ponta, em conjunção com as câmaras de vigilância, para detectar veículos parados e tráfico lento. Desta forma, é possível detectar incêndios nos veículos logo que estes parem, sendo a câmara automaticamente realçada no centro de controlo, permitindo ao operador identificar facilmente o incêndio. Reduz-se assim drasticamente o tempo de actuação bem como os falsos alarmes.

Em túneis onde não exista um centro de controlo e em que o funcionamento da ventilação mecânica de emergência seja distinto da ventilação normal, deve ser instalado um sistema de detecção de incêndios. Isto porque, em caso de incêndio não detectado, os sensores de opacidade vão identificar o monóxido de carbono em excesso como poluição decorrente da circulação dos veículos, introduzindo automaticamente a máxima quantidade de ar fresco, quando a medida a adoptar seria reduzir ou parar a sua admissão e começar a extracção dos fumos.

Os sistemas de detecção de incêndios podem ser [52]:

- Activados pela temperatura, soando um alarme quando a temperatura ultrapassa um valor pré-determinado ou sobe mais rapidamente que o normal;
- Activados através de detectores de fumo, soando um alarme quando a visibilidade atinge um valor mínimo pré-determinado.

Este tipo de sistemas devem ser capazes de detectar o incêndio de 20 litros de combustível e, muito frequentemente, são complementados por um circuito interno de televisão que permite identificar falsos alarmes. Na Europa a aplicação destes sistemas não é consensual. Existem mesmo países, como a França e Reino Unido, que não o aplicam aos túneis rodoviários, preferindo antes utilizar, pela sua maior fiabilidade, o circuito interno de televisão conjuntamente com sistemas de detecção automática de incidentes.

#### 5.3.4.3 Equipamentos de encerramento do túnel

Em todos os túneis de extensão superior a 1000m devem ser instalados na sua entrada semáforos e, opcionalmente, meios adicionais como painéis, sinais de mensagem variável ou barreiras, com o objectivo de permitir encerrar o túnel em caso de emergência.

#### 5.3.4.4 Equipamentos de encerramento parcial do túnel



Fig. 5.9 – Barreira, semáforo e sinal de mensagem variável [51]

Para todos os túneis de extensão superior a 3000m que possuam um centro de controlo, recomenda-se a instalação, em intervalos não superiores a 1000m, de equipamento destinado a imobilizar os veículos em caso de emergência. Este tipo de equipamento é constituído por semáforos e, eventualmente, por meios adicionais como altifalantes, painéis, sinais de mensagem variável e barreiras, com o objectivo de evitar o congestionamento na proximidade do acidente, facilitando assim o trabalho dos serviços de emergência.

#### 5.3.4.5 Sistemas de comunicação



Fig. 5.10 – Sinalização referente ao sistema de radiodifusão [51]

Em todos os túneis, com extensão superior a 1000m, deve ser instalado equipamento de radiodifusão para uso dos serviços de emergência. Estes sistemas são concebidos principalmente para permitir a comunicação entre os serviços de emergência e o centro de controlo.

No entanto, na Europa, em túneis extensos existe a retransmissão de rádios comerciais bem como de um canal próprio do túnel, permitindo aos utentes obter informações antecipadas sobre as condições de tráfego e acidentes. Este sistema pode ser usado em situações de emergência, para alertar os condutores e divulgar os procedimentos adequados. Apresenta, no entanto, as seguintes restrições[52]:

- Só os condutores com o rádio ligado no canal apropriado recebem estas informações;
- Em alguns países podem existir impedimentos legais.

Outro tipo de sistemas de comunicação são os altifalantes, embora a sua aplicação não seja consensual por apresentarem fortes restrições [52]:

- A comunicação só é possível em túneis com tratamento acústico;
- O barulho dos veículos e da ventilação pode tornar o sistema inaudível.

Na actualidade, a instalação destes sistemas, especialmente dos altifalantes, é preterida em favor dos painéis de mensagem variável devido à sua maior eficácia.

#### 5.3.4.6 Sistemas eléctricos de medição e comando

Todos os circuitos eléctricos de medição e de comando devem ser concebidos e construídos por forma a que uma avaria local, por exemplo um incêndio, não afecte os circuitos que se encontrem ainda em funcionamento.

### 5.4 SINALIZAÇÃO EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS

Os túneis rodoviários são parte integrante das vias de comunicação, por isso a sinalização utilizada é semelhante à utilizada em troços ao ar livre. No entanto, por ser uma estrutura especial, existe um conjunto de sinalização específica que deve ser instalada para a utilização segura do túnel. Neste trabalho apenas é abordada a sinalização utilizada especificamente em túneis rodoviários. A sinalização a utilizar em túneis é abrangida pela Convenção de Viena (1968) [51].

Nos portais de entrada do túnel rodoviário deve-se colocar o sinal E11A da Convenção de Viena. A sua extensão deve ser indicada na parte inferior deste sinal ou através de um painel adicional H2. Para túneis de extensão superior a 3000m deve-se indicar, através de sinalização adicional, a extensão restante do túnel de mil em mil metros.



Fig. 5.11 – Sinalização de entrada num túnel rodoviário [55]

Nos túneis rodoviários todas as instalações de segurança devem estar devidamente sinalizadas (saídas de emergência, áreas de paragem de emergência, vias de evacuação e postos de emergência).

As saídas de emergência devem ser uniformemente sinalizadas, quer se trate de uma saída directa para o exterior, uma ligação transversal entre galerias do túnel ou uma galeria de emergência. Os sinais que indicam as saídas de emergência devem corresponder aos pictogramas propostos pela norma ISO 6309 ou pela norma CEN EN 12899 de Janeiro de 2001 (sinais do tipo G segundo a Convenção de Viena).



Fig. 5.12 – Sinais de saída de emergência [55]

Nas paredes laterais do túnel, a distâncias não superiores a 25m e a uma altura entre 1m a 1,5m, devem ser assinaladas as duas saídas de emergência mais próximas com indicação das distâncias a percorrer.



Fig. 5.13 – Sinalização indicativa da distância até à saída de evacuação mais próxima [55]

As áreas de paragem de emergência são alargamentos da via de circulação para estacionamento em caso de emergência. Os sinais utilizados são do tipo E, nos termos da Convenção de Viena, e devem ser acompanhados por sinalização adicional que indique a presença de um extintor e telefone de emergência, caso esta informação não esteja já presente no próprio sinal.



Fig. 5.14 - Sinalização de área de paragem de emergência [55]

Os postos de emergência deverão ostentar sinais informativos do tipo F, nos termos da Convenção de Viena, indicando o equipamento à disposição dos utentes.



Fig. 5.15 – Sinalização dos equipamentos disponíveis nos postos de emergência [55]

Nos postos de emergência que se encontrem separados do túnel por uma porta, um texto claramente legível, redigido nas línguas apropriadas, deve indicar que o posto de emergência não assegura protecção em caso de incêndio.

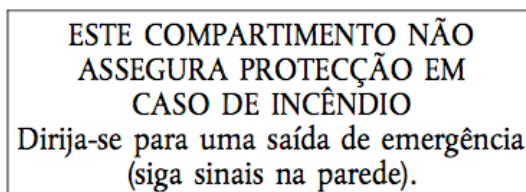


Fig. 5.16 – Sinalização de aviso colocada nos postos de emergência [55]

Caso exista no túnel um sistema de radiodifusão, deve ser sinalizada a frequência que os utentes devem sintonizar.

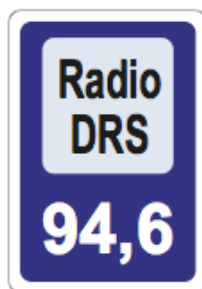


Fig. 5.17 – Sinalização da Rádio Frequência [55]

Na entrada do túnel e em túneis com extensão superior a 3000m, a uma distância de 1000m em 1000m, devem-se colocar dispositivos que permitam o encerramento total ou parcial deste, através de semáforos e meios adicionais como painéis, sinais de mensagem variável ou barreiras.



Fig. 5.18 – Semáforos e sinais de mensagem variável [55]

# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

#### 6.1.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Os métodos construtivos do NATM e TBM são tecnologias competitivas. A escavação com explosivos, particularmente adequada na escavação de maciços rochosos mais resistentes, compete directamente com as tuneladoras, na escavação destes maciços (desde que pouco abrasivos), até um limite de 300MPa (resistência à compressão uniaxial). Quando estes limites são ultrapassados, a escavação por explosivos é o método construtivo empregue. A utilização de explosivos, na escavação, provoca efeitos nefastos no maciço envolvente (fenómenos de sobreescavação e fracturação).

A utilização de roçadoras em maciços rochosos mais brandos, até 100MPa, é uma solução bastante económica. Esta solução é particularmente adequada, neste tipo de maciços, porque possibilita a máxima preservação da sua resistência, comparativamente com a escavação por explosivos, permitindo assim uma diminuição do suporte a instalar. Estes equipamentos competem directamente com as tuneladoras de escudo simples e duplo.

#### 6.1.2 ANÁLISE FINANCEIRA

A previsão do desempenho de qualquer método construtivo é bastante difícil devido às incertezas existentes na fase inicial do projecto. A previsão correcta do desempenho das tuneladoras é fundamental para a avaliação da sua capacidade em relação aos métodos convencionais. Como estes equipamentos implicam um investimento inicial muito elevado, é fulcral a correcta previsão do seu desempenho para, através de um análise financeira, avaliar se este investimento é compensado pela maior velocidade de avanço e menor custo marginal da escavação.

O modelo para a previsão do desempenho das tuneladoras proposto pelo Norwegian Institute of Technology (NTH) é o mais completo, resultando da interpretação de dados recolhidos ao longo de décadas em túneis escavados com tuneladoras. Ao longo dos anos sofreu actualizações constantes, sendo por isso um modelo bastante fidedigno.

O modelo proposto pelo Colorado School of Mines (CSM) é particularmente adequado na optimização do desempenho da tuneladora ao maciço rochoso a escavar, quando se opta pela concepção de uma nova tuneladora. As suas capacidades de previsão estavam, no entanto, limitadas a maciços rochosos intactos, para os quais os resultados obtidos são bastante similares aos do modelo NTH. Recentemente, com as alterações introduzidas para contabilizar o estado de fracturação do maciço,

este modelo tornou-se aplicável a todo o tipo de maciços rochosos. No entanto, é preciso avaliar se as alterações introduzidas conduzem a estimativas aproximadas do desempenho das tuneladoras.

O modelo proposto por Barton, em casos específicos, demonstrou uma correlação pior entre o desempenho verificado e a estimativa inicial do que a obtida através do índice Q convencional, da resistência à compressão uniaxial e da resistência à tracção. A aplicação deste modelo deve ser assim muito cuidadosa e acompanhada da estimativa obtida por outro modelo de previsão [56].

### 6.1.3 ANÁLISE DE RISCO

A análise de risco é um processo indispensável na construção de túneis. A gestão do risco ao longo do projecto e construção torna o processo de decisão mais transparente, aumenta o nível de segurança na obra e permite um controlo mais eficaz do seu custo.

A análise de risco é fundamental na avaliação das propostas e selecção da proposta vencedora. Esta análise permite quantificar o custo do risco associado a cada proposta, fornecendo assim às entidades decisoras uma estimativa do custo global, em vez do habitual custo da oferta. A disponibilização da informação do risco às entidades competentes permite-lhes, assim, tomar uma decisão bem fundamentada.

### 6.1.4 SISTEMAS DE SEGURANÇA EM TÚNEIS EXTENSOS

Os requisitos de segurança para túneis rodoviários com extensão superior a 500m, definidos no decreto-lei 75/2006, são menos exigentes comparativamente com os regulamentos de outros países europeus. Nestes regulamentos a distância mínima entre saídas de emergência é mais reduzida, estão previstas áreas de paragem de emergência e galerias de inversão em túneis unidireccionais (para a evacuação dos veículos em caso de emergência) e estão definidos os caudais e as pressões mínimas exigidas para a alimentação de água às bocas de incêndio.

## 6.2 CONCLUSÕES FINAIS

As velocidades de avanço, alcançadas pelas tuneladoras, são duas a três vezes superiores às atingidas pelos métodos convencionais, para maciços rochosos com índices Q entre 0,1 a 10. Nestas condições, a escavação com recurso a tuneladoras é mais competitiva para túneis de extensão superior a 2,4Km. No entanto, frequentemente a utilização deste tipo de equipamento é preterida em favor dos métodos convencionais, devido à sua fraca adaptabilidade a novas condições geológicas-geotécnicas, a questões de geometria da secção transversal do túnel, à reduzida caracterização e pré-investigação do maciço (que tornam a aplicação destes equipamentos muito arriscada) e à disponibilidade financeira inicial.

O custo por metro linear da escavação é menor para as tuneladoras do que para os métodos convencionais e, por isso, quanto maior for a extensão do túnel, maior é a distribuição do investimento inicial e mais económica é esta solução.

Um estudo pormenorizado das vantagens, desvantagens e custos da obra para cada um dos métodos construtivos, NATM e TBM, deve-se realizar quando forem identificadas no projecto as características aqui indicadas, que sugerem à partida que a escavação com tuneladora pode ser viável e, porventura, a melhor solução.

### **6.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

A tecnologia das tuneladoras está em constante evolução. A aplicabilidade destes equipamentos na escavação de maciços rochosos mais resistentes está, actualmente, fortemente limitada pela capacidade dos discos de corte em suportarem cargas superiores a 320kN/disco [41]. No entanto, espera-se uma evolução na qualidade destas ferramentas, o que pode tornar a utilização das tuneladoras ainda mais competitiva. Sendo assim é importante referir que a informação disponibilizada nesta tese deve ser actualizada, para incorporar os melhoramentos expectáveis destes equipamentos mecânicos no futuro, e por isso os resultados desta investigação podem a qualquer altura ficar desactualizados.

Como complemento a esta tese, recomenda-se futuramente a elaboração da macro proposta no modelo de previsão do desempenho do Colorado School of Mines e a aplicação de todos os modelos propostos a casos de obra em Portugal.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Nyquist, L. *Tunneling Options in Long Drives*. Dissertação de Mestrado, Luleå University of Technology, 2004.
- [2] Hoek, E. *et al.*, *Integration of geotechnical and structural design in tunnelling*. University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, 29 February 2008, Minneapolis, 1-53.
- [3] Bastos, M., *A Geotecnia na Concepção, Projecto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 1998.
- [4] <http://www.tidc.nsw.gov.au/Gallery.aspx?PageID=32&ImageID=9&CurPage=2>. 20/05/08.
- [5] Girmscheid, G., *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. Ernst & Son Verlag GmbH, 2000, Berlin.
- [6] Karakus, M., Fowell, R.J.. *An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM)*. ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas, Turquia.
- [7] <http://www.ce.metu.edu.tr/~ce439/Slideshows/8%20-%20NATM%205-Jan%202004.doc>. 13/02/08.
- [8] Comité europeu de normalização, *Eurocódigo 7 prEN 1997-1:2004: E*, Janeiro de 2004, 37, Bruxelas.
- [9] Hoek, E. *Big Tunnels In Bad Rock 2000 Terzaghi Lecture*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 9. September 2001, pages 726-740
- [10] Isaksson, T. *Model for Estimation of Time and Cost Based on Risk Evaluation Applied on Tunnel Projects*. Dissertação de Doutorado, Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology Stockholm, 2002.
- [11] DAUB German Committee for Underground Construction, Deutscher Ausschluß für Unterirdisches Bauen, *Recommendations for Selecting and evaluating tunnel boring machines Tunnel No 5/97*, 1997.
- [12] Kovari K., Ramoni M. *Urban tunnelling in soft ground using TBM's. International Congress on Mechanized Tunnelling: Challenging Case Histories*. Novembro de 2004, Politécnico de Turim, 16-19.
- [13] Herrenknecht, M. *Hard Rock TBMs*. Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar, 28/03/03, Colorado School of Mines.
- [14] <http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/gripper-tbm.html>. 22/05/08.
- [15] <http://www.youtube.com/watch?v=yFHRl3HFMDg&feature=related>. 23/05/08.
- [16] <http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/single-shield-tbm.html>. 23/05/08.
- [17] Toan, N. *TBM and Lining – Essential Interfaces*. Dissertação de Mestrado, Politécnico de Turim, Outubro de 2006.
- [18] EFNARC. *Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*. Abril de 2005, 17-21, Surrey.
- [19] <http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology/double-shield-tbm.html>. 23/05/08
- [20] Copur, H., Ozdemir, L., Rostami, J. *Roadheader applications in mining and tunneling industries*. Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- [21] Bilgin, N., Balci, C. *Performance prediction of mechanical excavators in tunnels*. ITA/AITES – Training Course Tunnel Engineering, 2005, Instambul.
- [22] Bilgin, N. *et al*, *Some geological and geotechnical factors affecting the performance of a roadheader in an inclined tunnel*. Tunnelling and Underground Space Technology, Novembro 2004, 629-636, Elsevier.

- [23] Holen, H., *TBM vs Drill & Blast tunneling*. NORWEGIAN TBM TUNNELLING Publication No. 11, November 1998, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Oslo.
- [24] Chauhan, R.L. *Impact of Management on Tunnel Advance Rates*. International Conference on Hydropower Development in Himalayas, 1998, Shimla, India.
- [25] Gehring, K., Kogler, P., *Mechanized tunneling: Where it stands and where it has to proceed from a manufacturers view point*. Tunnels for People , 651-663 Balkema, Roterdão.
- [26] ITA Work Group 14 *Mechanized Tunnelling. Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)*. 2000. [http://www.ita-aite.org/applications/30th/PDF/ITA\\_00\\_1-118.pdf](http://www.ita-aite.org/applications/30th/PDF/ITA_00_1-118.pdf). 23/05/08.
- [27] Ozdemir, L., Nilsen, B., *Recommended laboratory rock testing for TBM projects*. 1999. [http://www.mines.edu/academic/mining/research/emi/10\\_publications.html](http://www.mines.edu/academic/mining/research/emi/10_publications.html). 23/05/08.
- [28] Burland, A., *Project Report 13A-98Drillability test methods*, Setembro de 1998, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [29] United States Army Corps of Engineers. *Engineering and Design - Tunnels and Shafts in Rock*. 30/05/97, <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2901/a-c.pdf> , 23/05/08.
- [30] Bruland, A., *HARD ROCK TUNNEL BORING VOL. 10*. Dissertação de Doutorado, The Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- [31] Rostami, J., Ozdemir, L., *CSM Computer Model For TBM Performance Prediction*. [http://www.mines.edu/academic/mining/research/emi/papers/computer\\_modeling\\_for\\_mechanical\\_excavators/tbm\\_performance\\_prediction.pdf](http://www.mines.edu/academic/mining/research/emi/papers/computer_modeling_for_mechanical_excavators/tbm_performance_prediction.pdf), 24/05/08.
- [32] Cigla, M. *et al*, *Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development International Mining Congress*, 2001, Ankara, Turkey.
- [33] Rostami, J. *et al*, *Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance models*, 1996, <http://www.mines.edu/academic/mining/research/emi/papers/tbm/tbm1.pdf> , 24/05/08
- [34] Yagiz, Y., *A model for the prediction of tunnel boring machine performance*, 2006, [http://www.iaeg.info/iaeg2006/PAPERS/IAEG\\_383.PDF](http://www.iaeg.info/iaeg2006/PAPERS/IAEG_383.PDF), 24/05/08
- [35] [http://lmrwww.epfl.ch/en/serv/SERV\\_051128\\_EN\\_JFM\\_Abrasivity.pdf](http://lmrwww.epfl.ch/en/serv/SERV_051128_EN_JFM_Abrasivity.pdf). 30/05/08.
- [36] <http://www.gdtest.it/servizi/schede/abra.html>. 30/05/08.
- [37] Gertsch, R. *Performance Prediction of Mechanical Excavators from Linera Cutter Tests on Yucca Mountain Welded Tuffs*. Dissertação de Mestrado, Earth Mechanics Institute Colorado School of Mines, 1992.
- [38] Plinninger, R. *et al*. *Wear Prediction in Hardrock Excavation Using the CERCHAR Abrasiveness Index (CAI)*. ISRM Regional Symposium Eurock 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy, Outubro de 2004, Salzburg, Áustria.
- [39] Menezes, J., Apontamentos de Geologia de Engenharia, *Classificação dos Maciços Rochosos*. [http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_5\\_GE.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_5_GE.pdf), 25/05/08
- [40] Miranda, T., Correia, A., Sousa, Luís., *Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Formações Rochosas e Maciço Heterogéneos*. Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Janeiro/2006, 17-40, Gomes Correia, Guimarães.
- [41] Bruland, A., *Future Demands and Development Trends*. NORWEGIAN TBM TUNNELLING Publication No. 11, November 1998, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Oslo.
- [42] Blindheim, O. *et al*, *Bored Road Tunnels in Hard Rock*. NORWEGIAN TBM TUNNELLING Publication No. 11, November 1998, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Oslo.
- [43] Hoek, E., Palmeiri, A., *Geotechnical risks on large civil engineering projects*. September 21-25 1998, International Association of Engineering Geologists, Vancouver, Canada
- [44] Parker, H. *International Tunnelling Association (ITA) and Risk*. George Fox Seminar, January 25, 2005.

- [45] Eskesen, S. *et al*, *Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association*, Working Group No. 2, Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 19 Nr. 3, 2004, 217-237, Elsevier.
- [46] Daller, J., *Risk Control at the Design of a 13 km long Railway Tunnel in Austria*. Geotechnical Risk in Rock Tunnels. Abril de 2004, Aveiro.
- [47] Wagner, H. *Risk Evaluation and Control in Underground Construction*. International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, 2-4 Fevereiro 2006, Bangkok
- [48] Wagner, H. *The Governance of Cost in Tunnel Design and Construction*. 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, 29 de Fevereiro a 3 de Março de 2004, São Paulo.
- [49] Schubert, P., *Geotechnical Risk Management in Tunnelling*. Geotechnical Risk in Rock Tunnels. Abril de 2004, Aveiro.
- [50] Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. *Decreto de Lei nº 75/2006*, 27 de Março.
- [51] European Commission. Directorate-General for Energy and Transport. *Tunnels actions that save lives les gestes qui sauvent* (cd-rom). 2003, Bruxelas.
- [52] Working Group No. 6 PIARC Committee on Road Tunnels. *Fire and Smoke control in road tunnels*. 1999. [http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/990,05-05-B.pdf](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/990,05-05-B.pdf). 25/05/08
- [53] Amundsen, F., Sovik O. *Classification of Tunnels, Existing Guidelines and Experiences, Recommendations*. 1995. [http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/966,05-03-B.PDF](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/966,05-03-B.PDF). 25/05/08
- [54] Wood, A. *The first Road Tunnel – A Planner for Countries Without Previous Experience of New Road Tunnels*. 1995. [http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/970,05-01-B.PDF](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/970,05-01-B.PDF). 25/05/08
- [55] Jornal Oficial da União Europeia. *Sinalização dos Túneis*. 09/10/03 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2004:081E:0079:0083:PT:PDF>. 25/05/08
- [56] Sapignia, M. *et al*, *TBM performance estimation using rock mass classifications*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39, 2002, 771–788, Elsevier Science Ltd.