

ap3e.pt

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ESTUDOS
E ENGENHARIA DE EXPLOSIVOS
Entidade de Utilidade Pública
Organismo de Normalização Sectorial

Av. da Universidade de Coimbra
3150-277 Condeixa-a-Nova
PORTUGAL

Visite a página **ap3e.pt**

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE ESTUDOS E ENGENHARIA
DE EXPLOSIVOS

AP3E – ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ESTUDOS E ENGENHARIA DE EXPLOSIVOS é uma associação técnico-científica sem fins lucrativos e de Utilidade Pública, constituída em 27 de março de 1992.

Tem como missão o aprofundamento e debate de problemas técnico-científicos, situados nas áreas das substâncias pirotécnicas, propergóis, explosivos e suas aplicações, colaborando com instituições e empresas no sentido de melhorar as normas de qualidade exigidas no sector dos explosivos, bem como ajudar a resolver problemas como a formação e a segurança dos profissionais do sector.

Os seus associados são entidades coletivas (públicas ou privadas) e indivíduos (profissionais e estudantes), ligados ao fabrico, transporte e emprego de produtos explosivos, à investigação & desenvolvimento, ensino, controlo de qualidade, prevenção e segurança.

Como Organismo de Normalização Sectorial (ONS.AP3E) coordena e promove as atividades da CT 125 – Explosivos Civis e Artigos Pirotécnicos e da CT 183 – Atmosferas Potencialmente Explosivas.

Enquanto membro da Federação Europeia de Engenheiros de Explosivos (EFEE) acompanha, participa nas reuniões plenárias e comissões técnicas e na divulgação das atividades por ela produzidas. A nível interno integra a Comissão Nacional de Transportes de Mercadorias Perigosas e participa em várias comissões técnicas de normalização.

Organiza, promove ou apoia a realização de eventos técnicos sobre temas relacionados com: Aplicação de Explosivos no Desmonte de Maciços Rochosos, Formação e Certificação de Competências no setor dos Explosivos, Rastreabilidade dos Explosivos, Marcação CE nos Artigos Pirotécnicos, Normalização, etc. Promove regularmente em instituições de ensino superior Seminários sobre a Aplicação de Explosivos de uso Civil. O Prémio AP3E de Engenharia de Explosivos é instituído bianualmente para premiar trabalhos de engenharia de explosivos realizados por alunos do ensino superior em Portugal.

Promove a divulgação do MANUAL DO OPERADOR DE PRODUTOS EXPLOSIVOS destinado a apoiar a formação dos Operadores de Fogo. Este manual foi elaborado pela AP3E em colaboração com a ANIET, seguindo o programa de formação aprovado pela EFEE para o Operador de Fogo Europeu na área do desmonte de maciços rochosos.



TORNAR-SE ASSOCIADO

Registe-se na nossa área de associados e disfrute das nossas vantagens.

REGISTAR



DETÓNICA

Vol. XXI Nº 54 Dezembro 2021

PROPRIEDADE

Associação Portuguesa de Estudos e Engenharia de Explosivos
Avenida da Universidade de Coimbra
5150-277 Condeixa-a-Nova
PORTUGAL
Tel: +351239941234
Email: secretariado@ap3e.pt
Portal: ap3e.pt

DIRECTOR

José Carlos Góis

COORDENADOR EDITORIAL

José Carlos Góis

COLABORARAM NESTE NÚMERO

André Bazenga
João Couto
João Loio
José Góis
Manuel Tender
Maria Pires
Paulo Costa
Pedro Bernardo

Distribuição

Gratuita aos associados AP3E e entidades públicas no sector dos explosivos

Periodicidade: Semestral

Subscrição anual: 20 €

Apoios

Edição parcialmente subsidiada pelas empresas: Orica Mining Services Portugal, Maxampor, O-Pitblast, Moura Silva & Filhos, GJR – Pirotecnia e Explosivos, Propyro

Execução gráfica

OGAMI

Tiragem: 150 exemplares

SUMÁRIO

- 5 Editorial**
- 7 Tecnologia alternativa para desmonte de rocha: cartuchos pirotécnicos ROYEX**
- 11 Segurança e saúde na utilização de explosivos em obras subterrâneas – a perceção de especialistas sobre as opções utilizadas**
- 23 Sistema de gestão de transporte de armas, munições e explosivos - SIGESTAME**
- 31 Conjugação de métodos de controlo de vibrações em desmonte de rocha com explosivos**
- 39 Restrições e condicionamentos no emprego de artigos de pirotecnia pelo risco de incêndio rural**

Imagem da capa: Coronavirus (COVID-19)

Considerando as várias aplicações, o sistema ROYEX apresenta um valor competitivo com outras soluções no mercado, explosivos, cimento expansivo e meios mecânicos, podendo se tornar a solução mais viável e indicada se for levado em conta o benefício global de minimização de impactos ambientais, celeridade e custos logísticos de transporte e armazenamento.

Referências

[1] EU Type examination certificate no. 0589.PYR.0936/15, *Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)*.

[2] Acordo Europeu para Transporte de Mercadorias Perigosas por Estrada (ADR).

[3] <https://www.royexsystem.com> (consultado em 8.10.2021)

[4] <https://www.royexsystem.com/applications> (consultado em 8.10.2021)

[5] Gupta, R.N. (2016). Emerging explosives and initiation devices for increased safety, reliability and performance for excavation in weak rocks, mining and close to surface structures. *Recent Advances in Rock Engineering*, India, 2016.

[6] Gustavsson, T. (2016). Royex System case study – access development, Essingeleden. Stockholm, 2016.



PROPYRO - Produtos Pirotécnicos, Lda.

📍 Morada: Rua das Sete-Fontes 44, 3060-472 Ourentã (Cantanhede) | Alvará nº8/2012
Paio: Lugar de Cabeços – Mogo de Ansiães, Carrazeda de Ansiães | Carta Estanqueiro nº 323
☎ Telefone: (+351) 231 419 010 | ✉ E-mail: info@propyro.pt | www.propyro.pt

Segurança e saúde na utilização de explosivos em obras subterrâneas – a percepção de especialistas sobre as opções utilizadas

Safety and health when explosives are used in underground construction – the experts' perception of the options

M. Tender

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto / ISLA – Instituto Politécnico de Gestão e Tecnologia, Escola Superior de Tecnologia

José Góis

Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica

Pedro Bernardo

IST – Instituto Superior Técnico / ORICA Mining Services Portugal, SA

João Pedro Couto

Escola de Engenharia da Universidade do Minho

A utilização de explosivos para escavação de obras subterrâneas é uma característica exclusiva do Método de Escavação Convencional (MEC). Neste artigo, pretende-se realizar uma análise de alguns riscos associados à utilização de explosivos e respetivos acessórios, bem como discutir as escolhas mais adequadas em termos de segurança e saúde. Primeiramente, é realizado um enquadramento da utilização de explosivos em obras subterrâneas. De seguida, são apresentados e descritos os riscos principais que, no contexto de Saúde e Segurança no Trabalho (SST), são associados a esta atividade: a detonação prematura de explosivos e a inalação de gases provenientes da detonação de explosivos. De modo a aferir qual a escolha mais adequada, são apresentados os resultados de um inquérito realizado a um painel de 30 especialistas. É feita uma análise crítica dos resultados, em termos de segurança e saúde, inerentes aos diversos tipos de explosivos e acessórios, com relevante interesse para a comunidade técnica e científica.

The use of explosives to underground construction is an exclusive characteristic of the Conventional Excavation Method (MEC). The aim of this article is to analyse the risks associated with the use of explosives and initiation systems, and to discuss the most suitable choices in terms of safety and health. The framework for the use of explosives in underground construction is carried out first. Secondly, the main risks in terms of Occupational Health and Safety associated with this activity: misfire and the inhalation of gases resulting from the detonation of explosives. In order to assess the most appropriate option, a survey was conducted among a panel of 30 experts. A critical analysis of the results, in terms of health and safety of the different types of explosives and accessories was conducted to assist in the decision-making process of the technical and scientific community.

1. Introdução

Há vários milénios que se executam escavações subterrâneas por todo o mundo, com o objetivo de superar obstáculos, sejam eles naturais, como obras em maciços montanhosos ou cursos de água, ou humanos, como é o caso das obras em zonas urbanas, para além das destinadas à extracção de recursos minerais. Descobertas arqueológicas indicam que o homem tem trabalhado em túneis desde a idade da pedra: nessa altura, usavam chifres de veado como ferramenta para a escavação [1]. As primeiras obras subterrâneas surgiram, portanto, ainda na época pré-histórica, quando o homem

sentiu necessidade de alargar cavernas naturais para melhor servirem de habitação. Mais tarde, também foram construídos túneis para irrigação agrícola e abastecimento de água às cidades: os antigos Gregos e Romanos construíram túneis para fazer aquedutos [2], sendo os vestígios dos mesmos ainda visíveis atualmente. Entre 2180 a.C. e 2160 a.C. [2], os Babilónios abriram um túnel sob o Rio Eufrates para trânsito pedonal [3]. Os Egípcios, por sua vez, construíram muitos túneis para aceder às sepulturas [2]. Mais um bom exemplo dos túneis construídos nessa altura é o túnel de Siloam, para transporte de água, por baixo da cidade de David (Jerusalém), no

século VII a.C.. Como outros marcos importantes da exploração do espaço subterrâneo temos, no século XVII, a inauguração do túnel do Canal du Midi (1666-1681 [2]), em França [4]. Situado entre o Mar Mediterrâneo e o Oceano Atlântico, para transportar mercadorias evitando a navegação em águas abertas no Estreito de Gibraltar e no contorno da Península Ibérica, foi construído, com recurso a pólvora negra introduzida em orifícios feitos por brocas. O ano de 1777 viu nascer um dos primeiros túneis de longo comprimento, na Grã-Bretanha [2]. Tinha 3,2 km e fazia parte do Canal Grand Trunk. O túnel Tronquoy do Canal de S. Quintino, mandado construir por Napoleão em 1803 e terminado em 1810 [2], é frequentemente distinguido como marco do nascimento da Engenharia de Túneis [5]. A construção do primeiro túnel subaquático iniciou-se em 1825 (até 1843), sob o rio Tamisa [4] (Túnel de Rotherhithe). A abertura de túneis para uso metropolitano iniciou-se em Londres, em 1863, mas outras grandes cidades se seguiram. Já no Continente Europeu, o primeiro grande obstáculo ultrapassado por uma extensa rede ferroviária foram os Alpes (até lá incontestáveis), atravessados pela primeira vez em 1871, pelo túnel ferroviário de Moncenisio (ou Frejus), cuja construção começou em 1857 [4]. Importante também para a evolução da técnica em escavação subterrânea foi a introdução, em 1866, por Nobel, da dinamite, baseada na nitroglicerina [6]. Até esta data, o suporte dos maciços rochosos era realizado por madeira, tendo o aço começado a ser utilizado em 1872 [7], dada a sua facilidade de instalação e elevada resistência mecânica (superior à da madeira). No ano de 1908 foi construído o Túnel de Lotschberg, com 14,6 km, também este um marco na história da escavação de túneis.

Ladislaus Von Rabcewicz introduz o conceito de New Austrian Tunnelling Method (NATM), tendo-o apresentado posteriormente [8], numa publicação no XIII Colóquio Austríaco de Geomecânica, que ganhou reconhecimento internacional em 1964. Nos inícios da década de 1950, a furação era realizada manualmente [1] com o apoio de um suporte telescópico (o chamado “Método Sueco” [6] (Figura 1)).



Figura 1 - Método Sueco de furação [1].

Vários autores referem o aumento contínuo da utilização do espaço subterrâneo e o papel cada vez mais central no desenvolvimento das cidades e zonas urbanas. O aumento da utilização do subterrâneo prende-se com vários fatores, incluindo a elevada densidade populacional das zonas urbanas. Uma das maiores dificuldades, talvez a mais visível e amplamente reconhecida, é a congestão de tráfego nas cidades e dificuldades de distribuição de recursos, bens e serviços, mas também a necessidade de proteção contra desastres naturais e a falta de espaço físico para trabalho e lazer. São várias as infraestruturas passíveis de inclusão no subterrâneo, desde redes de água, saneamento ou de abastecimento de energia, passando pelas infraestruturas telefónicas e as vias de comunicação (como os canais de navegação e rodovias e/ou ferrovias), sem esquecer as instalações industriais, comerciais e de defesa, transporte de bens, evacuação de lixo, ou as estruturas de produção de energia (como centrais nucleares, hídricas e térmicas) ou de exploração de minério, até instalações para armazenamento de produtos e depósitos de resíduos. Assim, face à enorme variedade de possíveis utilizações do subterrâneo, as previsões apontam para amplificações do espaço subterrâneo, em termos de dimensões, profundidade e requisitos arquitetónicos [9], que irão lançar paulatinamente novos desafios à capacidade de projetar e construir. Antecipa-se então que as novas infraestruturas sejam localizadas em subterrâneo, devido à grande falta de espaço das nossas cidades [9].

Nos primórdios das escavações, o método de escavação convencional era o único. Com a mecanização nos últimos séculos, surgiram as tuneladoras, mas mantiveram-se sempre os

métodos de escavação convencionais em funcionamento, e sempre em aperfeiçoamento. Os Métodos de Escavação Convencional (que englobam o NATM, o método belga e outros similares)

envolvem, na sua generalidade, as fases seguidamente descritas e que a Figura 2 procura ilustrar:

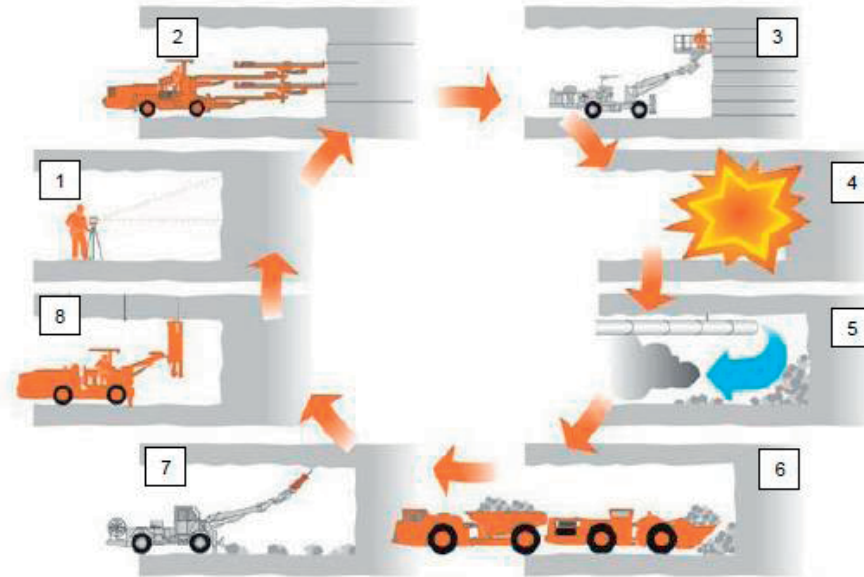


Figura 2 - Faseamento de Método de Escavação Convencional com explosivos [10].

1 – Marcação topográfica de frente de escavação; 2, 3 e 4 – Escavação do maciço com explosivos (neste caso, com furação através de “Jumbo”, aplicação das substâncias explosivas com veículos multifunções e detonação), o que pode ser substituído por meios mecânicos (balde, martelo pneumático ou roçadora), no caso da resistência do maciço não justificar a aplicação de explosivos; 5 – Ventilação de galeria, de modo a poder retirar o ar contaminado da atmosfera após a escavação (nomeadamente no caso de a escavação ser realizada com recurso a explosivos) e garantir a substituição desse ar por ar puro, com os parâmetros mínimos de respirabilidade; 6 – Remoção de produtos de escavação para vazadouro, de modo a libertar espaço para que o saneamento e a projeção de betão possam ser iniciados; 7 – Saneamento, mecânico e manual, da escavação, de modo a retirar blocos ou fragmentos de maciço que estejam em posição instável e garantir que o maciço reúna condições de integridade para ser aplicada a primeira camada de betão projetado; 8 – Aplicação de dispositivos de estabilização (cambotas metálicas, pregagens e enfilagens, que permitam melhorar a resistência do maciço rochoso) e finalmente a aplicação de betão projetado. Este método é particularmente adequado para terrenos competentes ou na escavação de secções de formas irregulares ou galerias entre túneis paralelos. A utilização de substâncias explosivas de uso civil no MEC origina o aparecimento de riscos – exclusivos a esta técnica de escavação subterrânea [11], quer para os trabalhadores que se encontram na frente de escavação, quer para aqueles que se encontram em zonas mais afastadas, dentro da obra.

Este artigo tem por objetivo discutir as questões relacionadas com a segurança e saúde ocupacional em trabalhos subterrâneos recorrendo à utilização dos explosivos e sistemas de iniciação mais correntemente utilizados.

2. Gestão de riscos

A gestão de riscos é um processo que tem como objetivo identificar perigos e riscos associados a cada trabalho, estimar a magnitude dos riscos que não se conseguem evitar [12], compará-la com padrões de referência para estabelecer o grau de aceitabilidade, determinar as medidas preventivas mais adequadas para a minimização desse risco e definir procedimentos de monitorização e revisão dos

riscos. A necessidade da existência da gestão de riscos surge por quatro vias: a) por imposição legal, b) para cumprimento dos princípios gerais de prevenção expostos das Diretivas Europeias [13], c) pela influência que tem, em termos de prazos e custos, na ocorrência de acidentes de trabalho e doenças profissionais e d) pela relevância que a inexistência da gestão de riscos tem na ocorrência de incidentes. Atualmente já é assumido que a gestão de riscos faz parte do processo de decisão, sendo a fundação de um bem-sucedido e proativo sistema de Segurança e Saúde [14], a base para uma efetiva gestão de segurança, e a chave para baixar os acidentes de trabalhos e as doenças profissionais

[15]. A gestão de riscos deve percorrer todo o caminho do empreendimento [15]: desde a fase de projeto (estabelecimento de política de riscos, critérios de aceitação de risco), influenciando deste modo decisões tão importantes como a escolha de alinhamento ou do processo construtivo do túnel [16]; passando pela fase de concurso e negociação (requisitos em programa de concurso, avaliação de riscos em fase de concurso, integração de cláusulas de risco em contrato); e incluindo a fase de construção (gestão de riscos pela entidade executante, gestão de riscos pelo diretor de obra, junção da gestão de riscos das duas entidades). Muitas vezes, porém, não é isto que acontece, pois vemos a gestão de riscos relacionados com segurança estrutural aparecer em fases precoces do projeto e os riscos relacionados com segurança ocupacional aparecerem apenas na fase de obra, desvirtuando a legalmente obrigatória abordagem de riscos desde a fase de projeto.

3. Explosivos e sistemas de iniciação

Seguidamente, faz-se uma pequena apresentação dos diversos tipos de explosivos e sistemas de iniciação mais frequentemente utilizados em obras subterrâneas.

Os principais tipos de explosivos utilizados são: os gelatinosos (os quais existem em dois grupos: as designadas dinamites e os hidrogelatinosos), os pulverulentos (vulgarmente designados por ANFO) e as emulsões. Os gelatinosos têm velocidades de detonação relativamente elevadas e uma boa resistência à água, sendo geralmente usados como cargas de fundo (objetivando a primeira fase do desmonte – fragmentação dos maciços rochosos). Os pulverulentos, com pouca resistência à humidade (por serem facilmente dissolúveis), apresentam menores velocidades de detonação, mas geram normalmente grande volumes de gases (cumprindo a segunda fase do desmonte – deslocamento dos blocos fraturados na fase anterior do desmonte, para local que permita em segurança proceder às operações de carga e transporte subsequentes). As emulsões, são os produtos explosivos de uso civil mais recente. Têm origem, a nível de I&D, na década de 70 do século passado, tendo sido aplicadas em primeiro lugar nos Estados Unidos da América, Canadá, Austrália e África do Sul impondo-se,

posteriormente, na década de 90, na Europa, tendo a implementação plena no Mercado ocorrido neste século. Contudo, na Alemanha e alguns países de Leste [17], por motivos económicos e de melhor salvaguarda ambiental (designadamente a nível da contaminação de águas, de escorrência superficial e subterrâneas), tem sido discutida a necessidade de revisão da sua adaptação. Estes produtos são um sistema bifásico, constituído por pequenas gotículas (fase descontínua, interna, que constituem o comburente do explosivo) de nitrato de amónio em solução aquosa, disperso em hidrocarbonetos, por intermédio de agentes emulsionantes (mistura combustível, que se apresenta contínua e externa). Diversos fatores devem ser ponderados na escolha do explosivo a utilizar [5]: factores económicos (custos do explosivo, perfuração, fragmentação secundária, transporte e britagem); características da rocha e maciço rochoso (propriedades geomecânicas da rocha e grau de fraturação do maciço); características do explosivo (magnitude e modo de libertação de energia, impedância, sensibilidade ao choque e condições de armazenamento); condições existentes (diâmetro do furo, presença de água e temperatura da rocha) e resultados pretendidos (grau de fragmentação a obter e volume de rocha a desmontar).

Os sistemas de iniciação têm como objetivo iniciar a detonação dos explosivos, com os atrasos sequenciais programados e garantindo que tal acontece de forma controlada quando estão reunidas todas as condições de segurança (leia-se, de interdição das imediações do desmonte). Referem-se em seguida os três principais sistemas de iniciação atuais:

Cordão detonante - O cordão detonante tem a forma de um tubo maleável, com revestimento de plástico (PVC) ou têxtil, apresentado em bobinas, e constituído no seu interior por um explosivo detonante (Pentrite). Iniciado o cordão detonante, com um qualquer detonador, a reacção das cargas contidas nos furos é transmitida por este meio a todos os cartuchos. Como vantagens, apresenta a detonação de toda a carga explosiva aplicada nos furos, mesmo quando os cartuchos estão inadvertidamente separados por inertes, e possui grande insensibilidade à humidade, no caso dos que

se apresentam revestidos por PVC. Como desvantagens, temos a destruição da zona de atacamento dos furos, permitindo a libertação precoce dos gases da detonação, o facto de ser relativamente caro e sensível ao choque (durante a fase de manuseamento) e, mais importante, o facto de promover a iniciação radial (leia-se: lateral) das cargas explosivas aplicadas nos furos.

Detonadores - Os detonadores servem essencialmente para temporizar o disparo dos diferentes furos, garantindo que todos funcionam no instante em que tal é desejado. Estes podem ser de quatro tipos: pirotécnicos, eléctricos, não-eléctricos ou electrónicos. Os primeiros já (praticamente) não são usados, no contexto geotécnico e mineiro (excetuando algumas pedreiras de rocha ornamental competente) e os últimos são os mais recentes, permitindo um maior controlo das vibrações (destacando-se aqui o controlo da frequência, para além da amplitude, que já há muito era possível de controlar) e condicionar, a favor dos melhores interesses dos projetistas e executantes, a fragmentação obtida (com apreciáveis reduções de consumos específicos, de furação e carga explosiva). Os intermédios, parecidos na forma de iniciação (dotados de pastas retardadoras pirotécnicas, contidas nas cápsulas) continuam a ser interessantes, essencialmente por motivos de redução do custo unitário (que nem sempre, corresponde a uma redução efetiva do custo total integrado das operações de escavação). Dentro dos últimos, os detonadores electrónicos, estes promovem, protegidos e assegurados por um sistema electrónico, a ignição do filamento, que percorrido pela corrente eléctrica, vai iniciar a carga de base do detonador, num tempo especificado e com erro desprezável, ao contrário do que acontecia com todos os anteriores.

Dentro dos sistemas de iniciação existem os “booster’s” (reforçadores) que substituem (hoje) boa parte das cargas de fundo, quer em ambiente subterrâneo, quer a céu-aberto, em qualquer dos casos com melhorias assinaláveis, quando existe um produto explosivo aplicado a granel (sem embalagem primária, dentro do furo) como carga de coluna.

4. Riscos associados

4.1 Explosão não controlada

A detonação acidental pode ocorrer por reacção prematura de explosivos ou por ativação prematura de detonador na fase de manuseamento, armazenamento ou transporte de explosivos.

Um dos efeitos negativos da utilização de explosivos é a projeção de blocos, que se pode definir como o deslocamento de volume de maciço rochoso, a distâncias superiores às previstas e desejáveis [18]. A energia libertada pelo explosivo durante uma pega de fogo provoca o esmagamento de rocha na vizinhança do furo, fratura a rocha para além da vizinhança, cria uma onda de choque e de gases e gera ondas sísmicas, fazendo a rocha deslocar-se para longe do furo. Qualquer incompatibilidade entre a distribuição da energia gerada, as propriedades do maciço e a zona confinada cria condições potenciais para projeção de blocos que podem atingir locais para além da área de segurança [19], originando acidentes graves envolvendo pessoas, equipamentos ou ainda infraestruturas diversas [18]. As causas prováveis para a ocorrência deste fenómeno podem ser [19]: 1) descontinuidades no maciço [20]: existência de planos de fraqueza, com fracturas que individualizam blocos. Deve-se ter em atenção que, no mesmo plano de fogo, as características do maciço podem variar; 2) questões relacionadas com dimensionamento da pega de fogo [20]: plano de fogo desadequado, má aplicação (carga muito concentrada de explosivos quanto ao plano de fogo, realça-se que a previsão em 2D não considera as características espaciais das propriedades do maciço, utilizando um valor médio desse parâmetro, facto que pode ser ultrapassado utilizando tecnologia a três dimensões (3D); furos demasiado inclinados; atacamento inadequado [20]: o atacamento previne a fuga de gases a alta pressão dos furos. Outro dos efeitos negativos que pode ocorrer é a invasão da área de segurança, que pode ser definida como a área em que a onda de sobrepressão, o material projetado ou os gases de explosão podem causar ferimentos [20]. Esta área é definida consoante a geologia do material, o plano de fogo, a experiência em trabalhos análogos e os sistemas de iniciação [19]. Os acidentes relacionados com invasão da área

de segurança, ou seja, quando alguém entra nessa zona [20], podem ocorrer por diversos motivos, entre os quais [19]: uso inadequado de abrigos; falha na evacuação de trabalhadores da área de segurança [20], devido à cada vez maior mobilidade (e rapidez de entrada em área de segurança) proporcionada pelas viaturas todo o terreno; falha na compreensão de instruções dadas por operador de fogo ou supervisor [20]; inadequada vigilância de acessos a perímetros de segurança [20].

4.2 Inalação de gases provenientes de detonação de explosivos

A utilização de explosivos provoca o aparecimento de gases tóxicos, após a detonação. O tipo e volume de gases libertados após a detonação é influenciado

pelo tipo de explosivo utilizado, pelo que importa escolher um explosivo que minimize as quantidades de gases tóxicos [21]. De salientar que existem algumas situações particulares em que os trabalhadores ficam bastante expostos a estes gases, por exemplo, mesmo após o desmonte, em situações onde existe menos cuidado nos tempos de espera antes da re-entrada na frente de escavação ou o sistema de exaustão seja insuficiente para remover os gases tóxicos e renovar o ar. Em termos de exposição à amónia, ilustra-se na Figura 3 um registo (sem qualquer tipo de adaptação para se perceber a realidade dos dados obtidos), da medição durante um ciclo de escavação que faz sobressair a elevada exposição à amónia imediatamente após a pega de fogo realizada com ANFO.

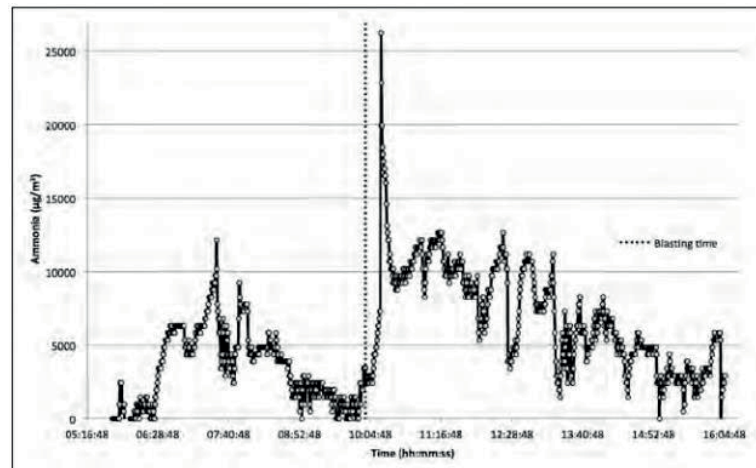


Figura 3 - Concentrações de amónia durante um ciclo de escavação, incluindo à pega de fogo utilizando ANFO [22].

5. Metodologia

De modo a aferir qual a pertinência de determinadas medidas preventivas, possíveis para os riscos identificados, em termos de explosivos e acessórios no tocante a minimização de riscos, concebeu-se uma metodologia assente num inquérito, de perguntas fechadas e testado previamente, a um painel selecionado de especialistas da área. Optou-se pela realização do inquérito, dado ser um modo que permite alcançar um número razoável de técnicos com formação e experiência diversa que, assim, exporá opiniões provenientes de diversos quadrantes. Pretendeu-se que a amostra de inquiridos fosse representativa e transversal em relação a experiência, natureza e amplitude da obra, de modo a obter a maior credibilidade de resultados

possível. O inquérito foi realizado por correio eletrónico, no mês de setembro de 2017. Os critérios para escolha de inquiridos foram: possuírem uma ligação à área das obras subterrâneas (quer na função de promoção, projeto, construção, fiscalização de obra, investigação ou docência, quer na vertente mais ligada à produção, quer na vertente mais ligada a áreas como a prevenção) e terem um mínimo de 5 anos de experiência em desmonte com explosivos. Obtiveram-se 30 respostas válidas de técnicos (correspondente à totalidade dos inquiridos) com uma experiência muito diversa. As funções dos técnicos que responderam ao inquérito eram ligadas à prevenção (26,7%), à produção (53,3%), à docência/investigação (16,7%) e projeto (3,3%). Em termos de experiência em obras subterrâneas, esta variava entre 2 a 5 anos (6,7%), de

6 a 15 anos (43,3%) e mais de 15 anos (50,0%), sendo a média de 17,9 anos. O inquérito consistia em questões diretas (Tabela 1) no tocante à redução, ou

não, dos riscos associados a utilização de determinados explosivos e acessórios, como é exemplo as questões apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Questões constantes no inquérito.

Questões	Sim	Não
A utilização de emulsões diminui o risco de explosão extemporânea		
A utilização de detonadores eletrónicos diminui o risco de explosão extemporânea		
A utilização de emulsões minimiza o risco de inalação de gases perigosos provenientes de detonação		

6. Resultados e discussão

6.1 Detonação extemporânea/projeção de blocos

A recolha da opinião dos inquiridos quanto a pertinência de utilização de emulsões para redução de risco de explosão extemporânea forneceu os seguintes números: 92% dos inquiridos consideraram que a utilização de emulsões diminui o risco de explosão extemporânea e 8% consideraram que não.

Estes resultados confirmam os conteúdos já publicados, que identificam a tendência para se usarem as emulsões como produto explosivo de desmonte, em detrimento do ANFO [8]. Refira-se que diversos países utilizam-nas há décadas, p.e. Noruega, desde 1994, data da sua primeira utilização no túnel de Masfjord [23]. As emulsões são explosivos estáveis em transporte e manuseamento, com alta insensibilidade a ações mecânicas, o que permite serem bombeadas a granel diretamente para os furos, a partir de uma unidade móvel de fabrico no local (MEMU), minimizando assim ainda mais os riscos associados ao transporte e manuseamento do explosivo.

As duas componentes do explosivo (combustível e comburente) podem ser misturadas no furo de acordo com uma especificação homologada [24] ou a partir de uma unidade de carregamento pneumática, destinada a emulsões previamente sensibilizadas, ou sensibilizadas apenas no furo. Esta evolução permite dotar o sistema de uma das vantagens do ANFO face à emulsão encartuchada: a maior facilidade de carregamento e menor risco de explosão extemporânea [25], dado o menor risco de encravamento nos furos (com o correspondente perigo de não detonação de explosivo devido à falta

de contacto com cartuchos adjacentes) [26]. De realçar que a aplicação a granel permite também diminuir o risco de exposição a quedas de blocos da frente de escavação e maximiza a prevenção do desvio para fins ilícitos. O carregamento a granel seja de emulsão, seja de ANFO pode apresentar riscos de projeções no desmonte caso existam cavidades em alguns dos furos, fazendo com que haja acumulação de explosivos nessas zonas. Se as cavidades estiverem identificadas deve usar manga plástica nessa zona.

6.2 Utilização de detonadores eletrónicos

Os detonadores, pela sua baixa sensibilidade, assumem especial importância. A recolha da opinião dos inquiridos quanto a pertinência de utilização de detonadores eletrónicos para redução de risco de explosão extemporânea forneceu os seguintes números: 83% dos inquiridos consideraram que a utilização de detonadores eletrónicos diminui o risco de explosão extemporânea e 17% consideraram que não.

Os resultados obtidos, embora sejam menos consensuais, reforçam o já afirmado por alguns especialistas da área. As vantagens dos detonadores eletrónicos são efetivamente várias, a começar por questões ocupacionais, pela proteção que oferece o sistema eletrónico, pois só pode ser usado por quem possua um "logger" para programação do detonador e uma "blast box". Adicionalmente, como já referido, os detonadores eletrónicos são insensíveis a correntes parasitas ou erráticas, tendo uma elevada fiabilidade o que minimiza o risco de detonação extemporânea. Em termos produtivos, a verificação da ligação é realizada de forma inequívoca, minimizando a probabilidade de erro humano. No

entanto, a maior vantagem revela-se na melhor precisão. O facto de permitir ajustar os tempos de atraso de forma manual através do *logger* é uma enorme vantagem, para evitar picos de vibração, associados a disparo simultâneos. O seu uso é já recomendado na Norma Portuguesa NP 2074:2015 [28], quando na presença de estruturas sensíveis nas mediações dos desmontes, por permitirem diferentes temporizações (ultrapassando a limitação de número de atrasos quando se usa detonadores elétricos ou mesmo não elétricos [29]). Proporcionam ainda um desmonte mais regular e preciso, garantindo que não ocorrem sobreposições ou trocas de tempos de disparo entre furos consecutivos. Adicionalmente, a sobrecavacaçãõ tem tendência para ser menor [29], minimizando os riscos para os trabalhadores [30], diminuindo a necessidade de saneamento mecânico e manual. Acresce o potencial de otimizar a dimensão do escombros a carregar, dado minimizarem-se os blocos demasiado grandes ou um elevado conteúdo de finos, poupando na britagem do escombros [27]. Todos estes fatores conduzem a uma melhoria de eficiência no ciclo de escavação [31]. Adicionalmente, os detonadores eletrónicos apresentam vantagens em termos de segurança pública, dado que o desvio de um acessório deste tipo não permite facilmente a sua iniciação, pois são necessários equipamentos específicos, totalmente encriptados, para os fazer disparar. Para além desta especificidade, este é na realidade o único sistema rastreável do mercado, pois a identificação destes acessórios é intrínseca (“chip”), enquanto que os demais são rastreados através da embalagem ou por autocolantes apenas no exterior destes. Muito embora a evolução no mercado deste tipo de detonadores esteja a ser lenta devido ao elevado custo, muitos utilizadores têm vindo a demonstrar que os benefícios de segurança e produtividade justificam plenamente o investimento realizado [32], sendo também defendidos em várias publicações como a melhor opção a utilizar, designadamente em túneis complexos [29]. O estado da arte, em termos de produtividade e segurança, encontra-se na utilização de detonadores ativados remotamente [32], quer a céu-aberto, quer em subterrâneo. O processo consiste geralmente na utilização da infraestrutura de comunicações via rádio, o que

permite a iniciação das cargas a partir da superfície. As vantagens deste sistema são: ausência de risco de exposição do operador de fogo (dado disparar a partir da superfície) e restantes trabalhadores que estejam no subterrâneo (os quais podem ser minimizados ou mesmo evitados) e menores tempos de paragem de operação. No entanto, deve-se salvaguardar que estes sistemas apenas têm o resultado previsto, devendo ser acompanhados de um correto planeamento do processo de carga [32]. A utilização de repetidores pode aumentar as potencialidades deste tipo de iniciação, porque corresponde às necessidades derivadas do aumento de comprimento de túneis, permitindo ainda fazer vários disparos a partir do mesmo tempo, existindo assim um elevado impacto positivo em termos de rendimento de ciclo de escavação. Outra das evoluções possíveis está associada à integração do “Global Positioning System” (vulgo GPS) no processo de pega de fogo, opção que já é prática habitual em alguns países [32]. Assim, a utilização de detonadores eletrónicos revela-se, em termos de segurança e saúde, como a escolha mais adequada para a minimização de riscos. No tocante ao risco de projeção de blocos, cumpre apenas fazer uma pequena, mas importante observação, quanto à mão-de-obra usada para as tarefas. Relativamente ao manuseamento de explosivos e sistemas de iniciação, verifica-se alguma disparidade de interpretação do nº 3 do artº 85º do Decreto-Lei nº 162/90 de 22 de maio, onde se afirma que a manipulação e emprego de produtos explosivos só pode fazer-se por pessoal habilitado com cédula de operador de substâncias explosivas. Isto implica que todos os que os manuseiam, desde o transporte até à preparação, possuam a referida cédula. Este entendimento não é unânime na comunidade técnica. Em alguns casos, leva a que a licença de operador de fogo seja apenas garantida para o supervisor da atividade. Dá-se, para exemplificar a situação, o exemplo de uma das mais recentes obras subterrâneas realizadas em Portugal, o Túnel do Marão. Tendo em consideração a legislação em vigor para o manuseamento e emprego de substâncias explosivas, bem como a falta de mão-de-obra especializada nesta temática, optou-se nesta obra pela realização de ações de formação específicas a 150 trabalhadores, com recurso a um formador

interno, com a consequente realização de exame para a obtenção da cédula de operador de substâncias explosivas junto da Polícia de Segurança Pública (entidade certificadora), registando-se uma taxa de aprovação de 93%. Mais importante do que esta taxa, foi a verificação do cumprimento de boas práticas durante toda a obra.

6.3 Inalação de gases provenientes de detonação

A recolha da opinião dos inquiridos quanto a pertinência de utilização de emulsões para redução de risco de inalação de gases perigosos provenientes de detonação forneceu os seguintes números: 90% dos inquiridos consideraram que a utilização de emulsões minimiza o risco de inalação de gases perigosos provenientes de detonação e 10% consideraram que não.

Os resultados obtidos reforçam o já afirmado por alguns especialistas da área. Comparações anteriores realizadas entre as emulsões e o ANFO evidenciam que as emulsões conferem uma melhoria significativa da qualidade do ar ambiente no local de operação, pois geram menos gases tóxicos do que o ANFO [33], nomeadamente pelas concentrações reduzidas de monóxido de carbono e azoto (NOx) [23]. Os trabalhadores de túnel que usam ANFO como explosivo de desmonte apresentam uma redução temporária da função pulmonar, enquanto aqueles que utilizam emulsão não. A explicação mais provável para as mudanças observadas é a exposição de pico ao dióxido de azoto [34].

O ANFO apresenta ainda a desvantagem de produzir maior volume de gases perigosos de amónia na presença de calor, humidade e betão projetado [35]. Este fenómeno ocorre aquando da presença de explosivos não detonados que entram em contacto

com água de betão projetado que possua características alcalinas, estando deste modo os operadores de robô de betão frequentemente expostos a amónia [22]. Assim, do ponto de vista de saúde ocupacional conclui-se ser preferencial o uso de emulsões.

7. Conclusões

Foram apresentados os resultados de uma avaliação de percepção dos técnicos de desmonte por explosivos sobre os riscos em termos de segurança e saúde no trabalho associados a explosivos e sistemas de iniciação. As seguintes conclusões podem ser traçadas a partir das respostas recolhidas do painel de inquiridos: - A utilização de emulsões, sendo mais estáveis no transporte, manuseamento e armazenamento do que outros explosivos, é essencial para minimizar os riscos de detonação extemporânea. Por sua vez, a opção pelos detonadores eletrónicos, pela sua insensibilidade e segurança intrínseca, revela-se também fulcral para minimizar o referido risco. Adicionalmente, salienta-se que a projeção de blocos/invasão de zona de segurança pode, por sua vez, ver o seu risco minimizado, desde que todo o manuseamento de explosivos e sistemas de iniciação seja realizado por trabalhadores habilitados com cédula de operador de fogo. No que se refere ao risco de inalação de gases tóxicos provenientes de detonação de explosivos, a escolha de emulsões minimiza o risco, devido aos materiais usados na conceção do produto. Em termos de perspetivas futuras, dever-se-á criar condições para a criação de um guia técnico de boas práticas de segurança e saúde em obras subterrâneas que permita ver esclarecidos e especificados critérios adequados para a realização deste tipo de trabalhos.

Referências bibliográficas

- [1] Atlas Copco, (2015). *Underground Construction Guide*. Nacka, Suécia: Atlas Copco.
- [2] R.Sousa, (2010). *Risk analysis for tunnelling projects*. Tese de Doutoramento em Engenharia Geotécnica e Geoambiental), Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, EUA.
- [3] Longo, S., (2006). *Análise e gestão do risco geotécnico em túneis*. Tese de Doutoramento em Engenharia de Minas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [4] Chapman, D., Metje, N., & Stark, A., (2010). *Introduction to Tunnel Construction* (CRC Press Ed.). Londres, Inglaterra: Spons Architecture Price Book.
- [5] Kovári, K. History of the sprayed concrete lining method: milestones up to the 1960s. *Tunnelling and Underground Space Technology*(18), 57-69. (2003). [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(03)).

- [6] King, J., (2000). The 2000 Harding Lecture - A century of tunnelling and where we go now. Londres, Inglaterra: British Tunnelling Society.
- [7] Dr Sauer Group, (2012). Advancing the underground: Dr Sauer Group.
- [8] Stipek, W., Galler, R., & Bauer, M., (2012). 50 years of NATM-experience reports (International Tunnelling Association Ed.). Áustria: International Tunnelling Association.
- [9] Nelson, P., (2016). A framework for the future of urban underground engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 32-39. (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.023>.
- [10] Tender, M., Couto, J., & Ferreira, T. (2015). Prevention in underground construction with Sequential Excavation Method. In Arezes et al (Ed.), *Occupation Safety and Hygiene III* pp. 421-424. Taylor & Francis. London, United Kingdom.
- [11] Tender, M., & Couto, J., (2016). Analysis of health and safety risks in underground excavations—identification and evaluation by experts. *International Journal of Control Theory and Applications*, 9(6), 2957-2964. (2016).
- [12] International Tunnelling Insurance Group. (2012). A code of practice for risk management of tunnel works In International Tunnelling Insurance Group (Ed.). Inglaterra: International Tunnelling Association.
- [13] European Comission. (1989). *Directive 89/391/EEC - European Framework Directive*.
- [14] Ceyhan, C. (2012). *Occupational health and safety hazard identification, risk assessment, determining controls*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Middle East Technical University, Turkey.
- [15] Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T., (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 217-237.
- [16] Barbosa, P. (2008). *Avaliação de risco em túneis rodoviários extensos em maciços rochosos*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal).
- [17] Calado, J., & Pereira, P, (2005). Evolução tecnológica das emulsões em Portugal. In O. d. Engenheiros (eds). XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros, Ponta Delgada. Ordem dos Engenheiros.
- [18] Bernardo, P. (2014). *Impactes ambientais do uso de explosivos na escavação de rochas, com ênfase nas vibrações*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [19] Kecojevic, V., & Radomsky, M.,(2005). Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents. *Safety Science*(43), 739-750. (2005). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2005.07.006>.
- [20] Bajpayee, T., Bhatt, S., Rehak, T., Mowrey, G., & Ingram, D. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/fadtf.pdf>. Last accessed 30 de Março de 2017.
- [21] Tender, M., Couto, J., & Gomes, A., (2015). Portuguese strengths and fragilities on Safety and Health practices. In D. Kolic (Ed.), *SEE Tunnel - Promoting tunneling in SSE Region* pp. 194-195. Hubitg. Dubrovnik, Croácia.
- [22] Bakke, B., & Ulvestad, B., (2015). Exposure to aerosols and gases in modern tunneling operations and lung function decline. In Norwegian Tunneling Society (Ed.), *Publication 24-Health, Safety and Environment in Norwegian Tunneling* pp. 15-20. Norwegian Tunneling Society. Oslo, Noruega. (2015).
- [23] Lima, J., (2013). Development in ventilation methods In Norwegian Tunneling Society (Ed.), *Publication 13-Health and safety* pp. 39-43. Norwegian Tunnelling Society. Oslo, Noruega.
- [24] Girmscheid, G., & Schexnayder, C. Drill and Blast Tunneling Practices. *Practice periodical on structural design and construction*, 7(3), 125-133. (2001).
- [25] Eriksen, H., (2013). Fires and explosions - causes, effects and prevention. In Norwegian Tunneling Society (Ed.), *Publication 13* pp. 19-22. Norwegian Tunneling Society. Oslo, Noruega.
- [26] Tender, M., & Couto, J. (2016). "Safety and Health" as a criterion in the choice of tunneling method. In Arezes et al (Ed.), *Occupational Safety and Hygiene IV* pp. 153-157. CRC Press/Balkema. London, United Kingdom.
- [27] Cardu, M., Giraudi, A., & Oreste, P., (2013). A review of the benefits of electronic detonators. *Revista Escola de Minas*, 66(3), 375-382. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672013000300016>.

- [28] Instituto Português da Qualidade, (2015). NP 2074:2015-Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas. Lisboa, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- [29] Fu, H., Wong, L., Zhao, Y., Shen, Z., Zhang, C., & Li, Y., (2014). Comparison of excavation damage zones resulting from blasting with Nonel detonators and blasting with electronic detonators. *Rock Mechanics and Rock Engineering*(47), 809-816. (2014). <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-013-0419-2>.
- [30] Verma, H., Dwivedi, R., Roy, P., & Singh, P., (2016). Causes, impact and control of overbreak in underground excavations. In H. Venkatesh & V. Venkateswarlu (eds). *Recent Advances in Rock Engineering*, Bengaluru, India. Atlantis Press.
- [31] Tender, M., & Couto, J. (2017). Study on prevention implementation in tunnels construction: Marão Tunnel's (Portugal) singularities. *Revista de la Construcción*, 16(2), 262-273. (2017). <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672016700151>.
- [32] Kara, S., Adamson, W., Reisz, W., & Trousselle, R., (2014). The latest generation of the electronic system enhanced safety and productivity. *Procedia Engineering*, 83, 432-440. (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.052>.
- [33] Bakke, B., Stewart, P., Ulvestad, B., & Eduard, W., (2001). Dust and gas exposure in tunnel construction work. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 62(4), 457-465.
- [34] Furuseth, K., Meraker, E., Hansen, T., Myran, T., & Brustad, G., (2013). Recent studies of health effects in tunnel construction work in Norway In *Norwegian Tunneling Society (Ed.)*, Publication 13-Health and safety pp. 65-68. *Norwegian Tunneling Society*. Oslo, Noruega.
- [35] Vogel, M., & Kunz-Vondracek, I., (2013). Safety and health in long deep tunneling-lessons learned in Swiss transalpine tunnel projects. In (eds). *World Tunnel Congress*, Genebra. *International Tunneling Association*, Maio 2013.

Participe na normalização



Consulte ap3e.pt