

Um Conceito de Tuneladora com Jato de Água e Fio Diamantado como Princípio de Corte de Rochas Brandas

Rafael Pacheco dos Santos
Lidiani Cristina Pierri
Jair José dos Passos Junior
Marcos Aurelio Marques Noronha

Rafael Pacheco dos Santos
Lidiani Cristina Pierri
Jair José dos Passos Junior
Marcos Aurelio Marques Noronha

Um Conceito de Tuneladora com Jato de Água e Fio Diamantado como Princípio de Corte de Rochas Brandas

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Natália Sandrini e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C744 Um conceito de tuneladora com jato de água e fio diamantado como princípio de corte de rochas brandas [recurso eletrônico] / Rafael Pacheco dos Santos... [et al.]. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-220-3

DOI 10.22533/at.ed.203190204

1. Engenharia civil (Geotécnica). I. Santos, Rafael Pacheco dos.
II. Pierri, Lidiani Cristina. III. Passos Junior, Jair José dos. IV. Noronha,
Marcos Aurélio Marques.

CDD 624

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

AGRADECIMENTOS

Tão desafiador quanto escrever esta Tese, foi utilizar apenas esse espaço minúsculo para realizar a justiça necessária com aqueles que compartilho essa vitória.

Como não poderia ser diferente, início agradecendo aos meus pais. Obrigado Seu Pacheco e Dona Jane por tudo! Não somente pela educação primorosa que vocês me ofertaram durante esses 32 anos de vida, mas pelo amor que sentem por mim. Amor que tenho orgulho de compartilhar com meus dois irmãos, Nicolás e Vivian. Ao meu pequeno irmão, um abraço enorme e entusiasta que pretendo te dar até meu último dia, e a minha irmã, o olhar carinhoso de quem vê a mais bela flor do seu jardim. Um grande abraço também ao meu cunhado, Adriano Volpato, e minha linda sobrinha, Maria Clara Volpato, ambos latifundiários do meu coração. Um muito obrigado também à Vanessa Neoti por anos de companherismo. Além disso, um agradecimento especial às minhas duas avós, Benta e Arci, pelos anos de carinho.

Entretanto essa vitória não foi conquistada somente em minha casa. Há uma lista de pessoas que me acompanharam desde o primeiro dia na graduação até o último do doutorado. Me perdoem alguns, mas nomes devem ser citados. Meu obrigado especial a meus amigos Ernane Silva, James Erger, Daniel Taqueda, Bruno Borges, João Paulo da Silva, Anderson Pains, Jair Passos, José Marcos Faccin e Luiz Schalata. Duas pessoas merecem algo mais! Já que um mero “obrigado” não corresponde ao que lhes quero expressar, meu infinito agradecimento a minha amiga Lidiani Pierri e meu amigo Fernando Jeremias. Ambos são referências na minha carreira e na vida.

Não posso deixar de agradecer também a um grande incentivador e amigo, que de maneira incassável e entusiasta, me impulsiona a cada dia ser um homem e profissional melhor. Muito obrigado Prof. Noronha!

Agradeço a Deus por poder citar todas estas pessoas neste momento tão importante. Obrigado por tantas pessoas maravilhosas que o senhor colocou carinhosamente em meu caminho!

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
INTRODUÇÃO	4
ASPECTOS TEÓRICOS RELEVANTES	8
DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO PROPOSTO	45
CONCEITO PROPOSTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	69
CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS.....	85
SOBRE OS AUTORES	91

RESUMO: As tuneladoras são amplamente utilizadas em obras ao redor do mundo e mostram-se excelentes escolhas para túneis urbanos ou com grande comprimento, além de ser a melhor opção para túneis em rocha com comprimento superior a 1,5 km. Tais equipamentos têm a sua origem no conceito proposto por Brunel no século dezoito e evoluíram até o conceito proposto por Robbins na década de cinquenta do século passado. Com exceção dos desenvolvimentos das tuneladoras DOT e DPLEX, desde então não foi introduzida nenhuma inovação radical no princípio de corte desses equipamentos. Em face da óbvia oportunidade de inovação e dos desafios por maior eficiência, há a necessidade do desenvolvimento de uma nova família de tuneladoras que renegue grandes dimensões, pesos enormes e alta potência de funcionamento como características principais. Esse novo jeito de construir tuneladoras exige a quebra dos tradicionais paradigmas que conduzem o processo a mais de setenta anos. Uma alternativa é a procura de tecnologias alternativas capazes de transferir energia sem contato mecânico com o maciço rochoso. Diversas opções têm sido estudadas. Elas são classificadas em métodos químicos, por lascamento térmico, por vaporização (ou fusão) e métodos mecânicos. Enquanto os métodos químicos sofrem com problemas ambientais e de segurança, os métodos de vaporização e lascamento térmico tornam-se inviáveis devido ao alto consumo energético. Uma exceção é a tecnologia de jato de água de alta potência. Apesar de ser utilizada para escavações desde o século dezoito, foi somente nos anos setenta que o jato de água tornou-se parte integrante de equipamentos de escavação de alta complexidade. Atualmente a tecnologia de corte de rocha por jato de água é considerada de baixo impacto ambiental e promissora para aplicações em engenharia civil e de minas. Um importante inconveniente, entretanto, é a alta demanda energética. Apesar de não tão alta como a demanda dos processos que envolvem introdução de calor, ela pode ser 10 ou 100 vezes superior a energia demandada pelos tradicionais discos de corte. Uma solução para esse problema é combinar jato de água e fio diamantado como princípio de corte. A combinação de ambas as tecnologias já se mostrou a mais adequada em relação à demanda energética na lavra de rochas ornamentais quando comparada com outras opções. Além disso, a utilização de jato de água e fio diamantado já se mostrou viável em escavações de perfil fechado. Aspectos comerciais da introdução de uma nova tecnologia devem ser considerados também. O modelo de negócio adotado pelas fabricantes exige a constante substituição de peças como os discos de corte. Tais componentes, além da assistência técnica, têm o custo muito alto ao final da obra e geralmente ultrapassam o valor de aquisição do próprio equipamento. Outra característica é que o número reduzido de fabricantes (geralmente localizados nos EUA, Europa ocidental e Ásia) dificulta a livre concorrência. Dessa forma a introdução de novas tecnologias exigirá

que esse mercado já consolidado comporte-se de maneira diferente. Esse trabalho visa aproveitar justamente essa oportunidade propondo uma tuneladora que utiliza jato de água de grande potência combinado com estações de corte de fio diamantado em uma cabeça de corte em dois estágios. O processo de desenvolvimento, baseado no método de desenvolvimento de produto PRODIP, permitiu a concepção de uma máquina mais leve, menor e mais barata, além de um inovador ciclo operacional. Uma estimativa teórica do desempenho (taxa de avanço e custo operacional primário) também é abordada. Enquanto a taxa de avanço mostrou-se bastante animadora para rochas brandas, mostrou-se insuficiente para rochas duras. Já os custos foram superiores em ambas as análises, porém relativamente competitivos para rochas brandas.

PALAVRAS-CHAVE: Tuneladora. Hidrodemolição. Fio Diamantado.

ABSTRACT: Tunnel boring machines are widely used around the world and they are a good choice for urban tunnels or high cover, besides to be the best option for rock tunnel with length over 1.5 km. These equipments have their origins in the eighteen century with Brunnel's concept and evolved till Robbins's concept, with better advanced rate and reliability. With the exception of development of DOT and DPLEX machine in Asia, no more radical innovation in operation principle has been introduced in this sector. Facing the obvious opportunity for innovation and the challenge of more efficiency, there is the necessity of a new family of TBMs which denies the great power, components with large dimensions and excessive weights as its main characteristics. This new way to build TBMs requires the paradigms break that has been followed for more than seventy years. One alternative is looking for exotic technologies capable of transferring energy from the machine to the rock without mechanical contact. Several options has been studied. They were classified as chemical reaction, thermal spalling, fusion (or vaporization) and mechanical rock cutting methods. While chemical reaction methods suffers with safety and environment problems, fusion and thermal spalling methods have high energy demand which became unpromising alternatives. One exception is the high power water jet technology (WJ). Although it is used for excavation propose since the eighteenth century, only in seventy year that water jet has began to be used as assistant rock breaking technology in more complex application. Nowadays the high power water jet technology can be considered as a promising an environmental friendly technology for mining and engineering applications. However important drawback is energy demand which is higher than other mechanical methods. It is possible to say that water jet demands 10 or 100 more energy to break rock than disc cutter. The combination, however, of water jet with diamond wire is a possibility of minimizing this problem. The combination of water jet with diamond wire is the best energy demand combination for quarries if compared with others traditional alternatives. In the same way it is possible to say that the high pressure water jet cutting system combined with the other traditional environment friendly technologies like diamond wire, drilling and scratches expansion devices, allows the execution of vertical and horizontal cuts in continuous cycle. Commercial aspect should be noted too. The tunnel boring industry

is dominated by just a few companies originated in USA, Western Europe and Asia. The model business adopted by this industry requires constant replacements of cutter disc and specific labor skills, usually offered by the same manufacturer company. In some cases the cost of replacement parts and technical assistance can be higher than acquisition. The Introduction of new technologies requires a new behavior of this addicted market. These works handled with this opportunity, describing a new concept of tunnel boring machine which mix water jet and diamond wire in a two stage cutting face capable of executing non circular tunnels with high advanced rate and competitive costs. The simple design together with lighter and smaller parts reduces the acquisition cost. The introduction of new players in the market can have a positive effect too. A new and innovated operational cycle and design specification were elaborated and are described. Geometrical characteristic and a performance analysis (advanced rate and primary excavation cost) are parts of this text too. With high advanced rate and reasonable primary excavation cost, the new concept can be considered an alternative for tunnels in soft rock and high porosity. However, for hard rock with low porosity the increase of water jet performance is necessary.

KEYWORDS: Tunnel boring machine. Water jet. Diamond wire.

1.1 Contextualização do tema proposto

Por centenas de milhares de anos, o homem esteve preso às duas dimensões da superfície do nosso planeta. Contudo a inquietude inerente à natureza humana tem nos forçado a procurar novas fronteiras, tanto para cima quanto para baixo da superfície. (GODARD, 2002)

Esse desafio poucas vezes se mostrou tão importante quanto no início do presente século, no qual a humanidade enfrenta dificuldades de mobilidade, carência de espaços urbanos nas grandes cidades, problemas climáticos, além de escassez de recursos naturais. Tais fatos aumentam a necessidade de explorarmos o espaço subterrâneo de uma forma mais eficiente.

Os túneis são considerados soluções de infraestrutura subterrânea com alto nível de eficiência na transposição de obstáculos naturais e urbanos, com reduzido grau de agressividade ao meio circundante e excelente qualidade da solução final (GODARD, 2002). Nesse contexto uma importante ferramenta na execução destas obras são as tuneladoras ou TBMs (“*Tunnel Boring Machines*”). Segundo CHAPMAN; METJE; STÄRK (2010) esses equipamentos são amplamente difundidos nas operações de escavação em áreas urbanas ou com grande cobertura, além de serem a escolha mais comum para túneis em rocha com comprimento superior a 1,5 km.

A origem desses equipamentos remonta ao início do século XIX e ao dispositivo tipo *shield* (ou couraça) proposto e testado por Brunel em 1818. Já a primeira tuneladora mecanizada deve-se a Maus, em 1846. Foi somente, contudo, em 1958 que o Engenheiro James Robbins propôs o que é considerada a primeira tuneladora moderna cujos princípios técnicos básicos ainda são as bases das máquinas atuais (MAIDL et al., 2008).

Algumas dessas características chamam a atenção. As primeiras são as dimensões e o peso colossais que facilmente ultrapassam as centenas de metros de comprimento e centenas de toneladas. Outra característica é a força bruta. Segundo NORONHA et al. (2012) uma tuneladora poderia facilmente erguer, com um braço de alavanca de 30 m, um Boeing 747 de 410 toneladas.

Chama a atenção ainda o fato de que, devido à frente de corte rotativa, a seção transversal da maioria dos túneis, executados pelas TBMs tradicionais, é circular. Porém é fato que tal característica, para algumas aplicações, gera espaços e volumes não utilizados pelo propósito básico do empreendimento. Segundo KRCIK (2007) esse volume adicional escavado gera diversos custos extras e incrementam outros

já previstos. Estima-se que o custo da escavação aumente de (20 – 30)% e que o do revestimento aumente de (15 – 20)% comparando-se túneis de seção circular e retangular com a mesma área útil. Além disso, se desconsideramos problemas operacionais, há um significativo atraso na obra haja a vista a necessidade de execução de etapas adicionais.

Além das questões técnicas, aspectos sobre o modelo de negócio praticado por essa indústria também são importantes. Na maioria dos casos, as tuneladoras são fabricadas para uma única obra e, ao final desta, os equipamentos são em sua maioria descartados. Outro ponto é a demanda contínua por peças de reposição e insumos que é tão grande ao ponto de o sucesso do empreendimento depender desse custo adicional, com destaque para a reposição dos discos de corte.

Essa situação beneficia apenas as principais fabricantes que praticam o modelo tipo subsidio cruzado (quando produtos induzem a compra de outros produtos), em detrimento a ampla concorrência, aumentando, dessa forma, o valor final da obra.

Segundo NORONHA; FARIA (2008) no Brasil a indústria de TBMs ainda não existe (apesar da promessa da empresa norte-americana Robbins de montar uma fábrica no Ceará), dessa forma os poucos equipamentos que estão em obras no país são importados e seus custos são enormes. Como previsão orçamentária inicial, o custo de aquisição de uma tuneladora para uma obra pode ser estimado sendo de US\$ 1,6 milhão por metro de diâmetro. No Brasil as tarifas de importação representam um acréscimo de cerca de 60%, desta forma o custo inicial estimado é de US\$ 2,5 milhões por metro de diâmetro. A este valor deve ser adicionado ainda o custo operacional da manutenção, insumos e peças substitutas. Uma estimativa é que o valor seja aproximado a US\$ 250 mil por metro de diâmetro para cada quilômetro escavado. Em projetos de túneis longos (> 10 Km), os custos operacionais normalmente são mais altos do que o custo inicial da própria máquina.

Infere-se que o modelo de negócio e os princípios técnicos básicos das atuais tuneladoras não estão totalmente adaptados à realidade do novo século e as possibilidades por inovação são claras. Com esse objetivo uma variedade de novos conceitos têm sido propostos nas últimas décadas. Muitos dos equipamentos alternativos sugeridos empregam princípios físicos exóticos como o corte de rochas a laser, feixe de elétrons, plasma sendo consideradas impraticáveis em condições reais.

Uma das poucas exceções, segundo MAURER (1979), COOK (1994), JENG; HUANG; HILMERSSON (2004), KARAKURT, IZZET; AYDIN; AYDINER (2012) foi a tecnologia de escavação por jatos de água com alto nível energético (conhecida como Hidrodemolição - HD). Tal tecnologia tem se mostrado promissora quanto às taxas de remoção de material para rochas consideradas brandas, mas apresentam um consumo energético ainda considerável. Uma opção é a combinação da Hidrodemolição com o Fio Diamantado (FD) que tem um consumo energético pequeno, baixo custo e grande robustez (MINAS et al., 2009).

O desenvolvimento conceitual de uma tuneladora de alto desempenho baseada

nas tecnologias de hidrodemolição e fio diamantado e que permita a execução de túneis de seção transversal não circular é uma significativa contribuição desta tese para a engenharia de túneis, além de incentivar a nucleação de uma nova indústria baseada em tecnologias diferentes e de ampla concorrência.

1.2 Objetivos

Tendo em vista a necessidade por novos conceitos que quebrem antigos paradigmas, o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver e analisar um novo conceito de tuneladora de alto desempenho com corte de rocha por jato de água e fio diamantado capaz de executar túneis não circulares em rocha. O desenvolvimento deve ser sistemático e promover a geração de soluções inovadoras que fomentem este e futuros desenvolvimentos. A tese tem como objetivos adicionais:

- Expor as oportunidades de inovação no setor de escavação mecanizada por tuneladoras através de uma ampla revisão bibliográfica dos aspectos teóricos relevantes;
- Identificar e ponderar os principais requisitos e especificações de projeto para uma tuneladora de alto desempenho e baixo impacto sócio-ambiental;
- Definir um ciclo operacional inovador que permita a aplicação conjunta do jato de água e do fio diamantado como sistema de corte em uma tuneladora;
- Gerar um conjunto de conceitos que operem conforme o ciclo estabelecido, criando uma base de dados para este e futuros desenvolvimentos;
- Selecionar e descrever a concepção julgada mais adequada, expondo seus pontos fortes e fracos;
- Comparar as taxas de avanço e custos primários de escavação da concepção proposta e de uma TBM tradicional nas mesmas condições geológicas.

1.3 Aspectos de ineditismo e relevância da pesquisa

Apesar de já serem utilizadas como modernas técnicas na construção civil e na indústria mineradora, as tecnologias de hidrodemolição e fio diamantado nunca foram combinadas e utilizadas para compor a frente de corte de uma máquina tuneladora de seção não-circular.

Tal fato, associado à óbvia necessidade por inovações na indústria de túneis e a demanda reprimida em países em desenvolvimento, faz com que o conceito proposto tenha uma relevância significativa para o meio acadêmico e industrial do Brasil e do Mundo.

1.4 Estrutura do documento

O presente documento foi estruturado de forma que o leitor entenda os aspectos relevantes das tecnologias envolvidas tão bem quanto os aspectos do processo de

desenvolvimento e análise do conceito considerado mais adequado.

No primeiro capítulo é possível encontrar uma breve introdução sobre os assuntos abordados, a definição dos objetivos principais e secundários, uma breve arguição sobre os aspectos de ineditismo e relevância da pesquisa desenvolvida, além de como está estruturado o documento.

O capítulo seguinte objetiva abordar os temas relevantes das tecnologias de escavação à fogo, por escarificadora e, em mais detalhes, por tuneladora em rocha. Assuntos relacionados a técnicas inovadoras de escavação em rocha e características relacionadas à tuneladoras não-circulares também são abordadas. Aspectos relevantes do método de predição de desempenho desenvolvido pelo Instituto Norueguês de Tecnologia – NTNU – para tuneladoras com discos de corte e adaptações necessárias para a sua utilização no conceito proposto também são abordados.

Já o capítulo 3 descreve os detalhes do processo de desenvolvimento do conceito. Os resultados de cada etapa tão bem como os métodos utilizados podem ser encontrados nessas páginas.

A descrição da concepção proposta e a análise do desempenho (comparativamente com a tecnologia das tuneladoras tradicionais) são encontradas no capítulo 4 juntamente com sugestões para reduzir custos e incrementar taxa de avanço. Por fim o capítulo 5 encerra o texto trazendo as últimas considerações do autor, suas conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

ASPECTOS TEÓRICOS RELEVANTES

1.1 Evolução histórica e desafios atuais

Segundo MAIDL et al. (2008), a ciência da construção de túneis evoluiu rapidamente no século XIX para atender a demanda gerada pela rápida expansão da malha férrea dos países que participaram da primeira revolução industrial.

Para escavação em rocha a evolução iniciou-se com o advento do método de escavação a fogo (também conhecido pelo termo em inglês “drill and blast”). Já o desenvolvimento dos métodos de escavação mecânica foi fomentado pela necessidade da execução dos furos para o posicionamento dos explosivos na frente de escavação.

Já a evolução histórica das atuais tuneladoras (também conhecidas pelo termo em inglês “*Tunnel Boring Machine*” ou pela sigla *TBM*) teve sucessivos avanços e retrocessos. Os principais motivos para os retrocessos foram:

- Os materiais utilizados não apresentavam propriedades mecânicas adequadas;
- Os métodos de escavação mecânica na época não eram os mais adequados para as características geológicas.

STACK (1995) MAIDL et al. (2008), MARTINHO (2012) e MAIDL et al. (2013) trazem alguns dos marcos históricos que culminaram no desenvolvimento da *TBM* moderna.

- Conceito proposto pelo Engenheiro Henri-Joseph Maus para o túnel “*Mount Cenis*”: A máquina desenvolvida trabalhava quebrando o núcleo rochoso proveniente de um corte periférico em quatro partes iguais. Apesar de não viabilizada comercialmente, os testes apresentaram avanços de (5 – 7) metros por dia.
- Conceito proposto pelo Engenheiro Charles Wilson para o túnel “*Hossac*”: O conceito proposto utilizava discos de corte posicionados em uma cabeça de corte rotativa para a escavação de toda a frente de corte. Apesar de funcional, a mesma ainda não era técnica e financeiramente competitiva.
- Conceito proposto pelo Engenheiro Charles Wilson e patenteado em 1875: Alternativa de equipamento que não escavava toda a frente de corte, mas apenas um anel periférico e um furo central. Já o desmonte do núcleo rochoso remanescente era executado por explosivos. A vantagem do equipamento foi o acabamento final das paredes do túnel.
- Conceito proposto por Ebenezer Talbot em 1853: Máquina com braços em balanço montados em uma cabeça rotativa com discos de corte na extremidade. A rotação da cabeça de corte associada com o movimento dos discos permitia o desmonte de toda a frente de escavação.

- Conceito proposto por Cook e Hunter em 1866: Eles sugeriram três tambores com discos de corte posicionados transversalmente ao eixo da TBM. A máquina nunca foi construída, mas inspirou outros desenvolvimentos no século posterior, em especial das escarificadoras.
- Conceito proposto por Frederick Beaumont em 1863: Sugeriu a escavação com ferramentas semelhantes a “formões”. Ela foi testada em 1863 com insucesso na execução de um túnel alagado na França.
- Conceito proposto por Frederick Beaumont em 1875: A nova versão de Beaumont sugeriu que a escavação utilizasse as mesmas ferramentas semelhantes a “formões”, mas agora dispostas em forma de cone na frente da máquina.

As primeiras décadas do século XX foram marcadas por uma falta de novas concepções e empreendimentos, provavelmente devido aos esforços de guerra na Europa e Estados Unidos. O primeiro desenvolvimento foi proposto somente em 1931.

- Conceito proposto por Schimidt, Kranz & Co em 1931: Máquina com discos de corte acionada e operada manualmente por cinco homens. Foi testada com sucesso em minas na Hungria com avanço de até 5 metros por dia. As principais desvantagens eram a baixa mobilidade e tempo de desmonte do equipamento.

O grande marco da tecnologia, contudo, só aconteceu nos anos 50 com a proposta do Engenheiro norte-americano James S. Robbins, como expõe as informações abaixo.

- Conceito proposto por James Robbins em 1953: Máquina bastante similar com as atuais TBM abertas, conforme mostra a figura 1. O conceito utilizava discos de corte e apresentou avanços de até 30 metros por dia em testes realizados.

O sucesso de Robbins impeliu outros fabricantes americanos a desenvolver TBMs para condições geológicas mais adversas. (MAIDL et al., 2008)

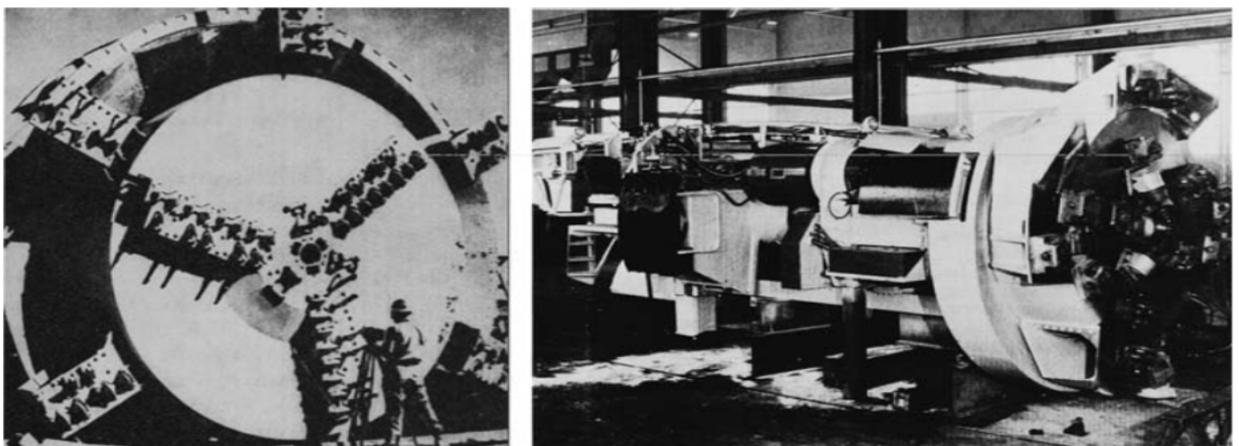


Figura 1 - Máquina proposta por James S. Robbins em 1953.

Fonte: (MAIDL et al., 2008)

Já pesquisadores europeus seguiram caminhos independentes e sugeriram conceitos diferentes do proposto de Robbins.

- Conceito proposto por Wohlmeyer em 1958: Máquina com três anéis equipados com discos de corte dentados. A remoção ocorria com o uso de esteiras na região inferior do equipamento. Algumas características desse equipamento assemelham-se às das escarificadoras modernas.

Nos anos 60 fabricantes europeus começaram a oferecer TBMs similares às americanas para empreendimentos em rocha dura. Essa década foi dedicada ao incremento da velocidade de corte e ao desenvolvimento de TBMs com maior diâmetro. Além disso, cabeças de corte em forma de domo foram propostas. (MARTINHO, 2012)

Nas décadas de 70 e 80 o foco do desenvolvimento foi voltado para máquinas ainda maiores, mais potentes e capazes de escavar rochas altamente fraturadas. (MAIDL et al., 2008)

Na década de 80 Carlos Grandori propôs e testou o conceito de TBM de dupla couraça (“*Double shield*”). Permitindo, dessa forma, que as tuneladoras pudessem ser utilizadas em perfis geológicos variados. (MARTINHO, 2012)

Na década de 90 e início do século XXI as atenções voltaram-se para o aumento da vida útil dos discos de corte e melhora nas técnicas e materiais utilizados no revestimento dos túneis (MAIDL et al., 2008). Além disso, segundo KRCIK (2007), cresceu a preocupação com a otimização da seção transversal do túnel.

A tendência atual de desenvolvimento apresenta destaque para o aprimoramento das tecnologias de revestimento, atenuação dos problemas de travamento da cabeça de corte (“*jamming*”) além da busca por maior taxa de avanço, eficiência global dos equipamentos e desenvolvimento de máquinas capazes de operar em situações geológicas bastantes distintas. (GRANDORI, 1987)

1.2 Princípios básicos e definições

Túneis são elementos da infraestrutura subterrânea que podem ser executados por diversos métodos construtivos. Cada um desses métodos apresenta um conjunto de condições geológicas para o qual é mais indicado. A figura 2 sumariza os domínios de atuação dos principais métodos construtivos (MARTINHO, 2012). Vale ressaltar que não faz parte do escopo do presente trabalho abordar tópicos relativos a escavação mecânica em solo.

Segundo MARTINHO (2012), enquanto a escavação manual utiliza pá, picareta e força humana; a escavação convencional utiliza explosivos para a realização do desmonte da frente de escavação. Diferentemente os métodos de escavação mecanizada utilizam equipamentos especializados (como escarificadoras e tuneladoras) ou equipamentos comumente empregados na indústria da construção civil (como pá carregadeira e caminhão basculante) para a escavação da abertura.

Como mostrado na Figura 2 a determinação do método mais adequado nem sempre é fácil. Isso ocorre porque mais de uma solução apresenta-se adequada para

uma determinada geologia.

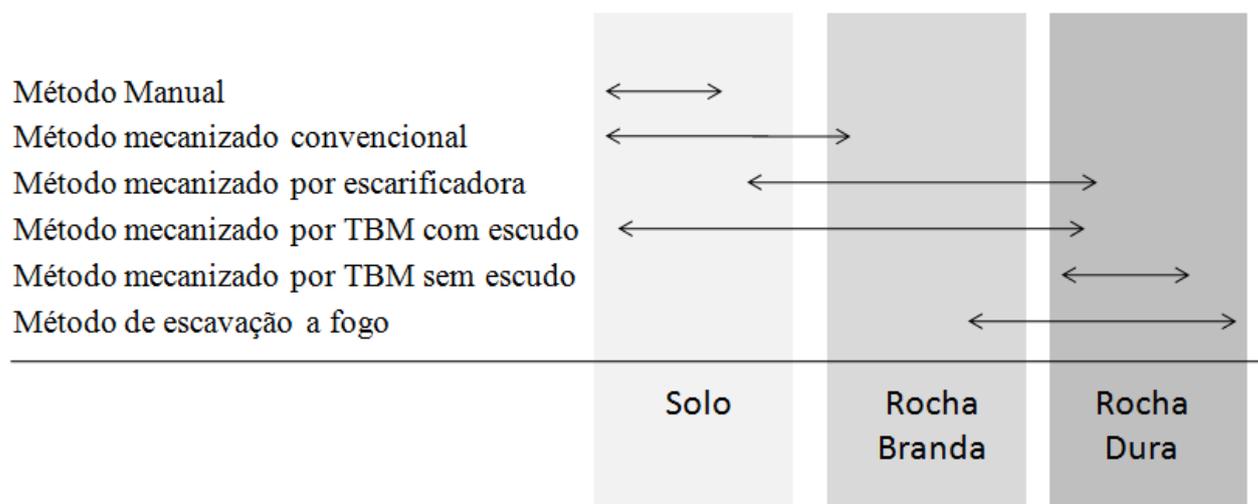


Figura 2 - Domínio dos métodos de escavação em função do terreno escavado

Fonte: Adaptado (MARTINHO, 2012)

Nos últimos anos isso tem se tornado ainda mais complicado com a evolução dos métodos mecanizados que avançam cada vez mais na direção do domínio antes restrito à escavação por explosivos. Nesse caso, segundo JONES (2011), a determinação do método mais adequado deve levar em consideração diversos fatores como a seção transversal, comprimento do túnel, precisão de forma, alinhamento, tempo de execução, taxa de avanço, presença de água, segurança operacional e principalmente custos e critérios associados a escavabilidade¹.

Segundo SALIMI; ROSTAMI; MOORMANN (2016), o método mais comum de escavação de túneis de variados diâmetros e com comprimento entre 1 – 2.5 km em rocha dura é o que utiliza máquinas tuneladoras. Entretanto em países como o Brasil, em que o mercado de tuneladoras ainda não é bem desenvolvido, as taxas de importação (que podem chegar a 60% do valor do equipamento) induzem o uso de técnicas com explosivo para túneis em rocha (NORONHA; FARIA, 2008).

Nas próximas sessões mais informações sobre os diversos métodos de escavação em rocha são abordadas. Uma visão abrangente sobre as limitações e vocações de cada método ajuda no entendimento do contexto, objetivos e soluções propostas.

1.2.1 Escavação com explosivos (“Drill and Blast”)

O método de escavação com explosivos utiliza furos preenchidos e selados com explosivos para o desmonte de rochas na frente de escavação. A posição, diâmetro e comprimento de cada furo compõem o plano de fogo que é o documento guia da fase de detonação.

Segundo CHAPMAN et al. (2010), tal processo pode ser utilizado em diversas

1. Entende-se escavabilidade como a capacidade de resistir à ação de desagregação da rocha tanto por métodos mecânicos como por explosivos.

condições geológicas, especialmente em maciços formados por rochas de grande abrasividade. Túneis curtos e de seção transversal não convencional (não circular ou demasiadamente grande) também são vocações desse método.

Segundo CICHNELI (2014) e como ilustra a figura 3, as principais fases do processo são: (1) Furação do maciço rochoso; (2) Carregamento e selagem do furo com explosivo; (3) Detonação; (4) Ventilação; (5) Remoção dos detritos; (6) Abatimento de choco; (7) Reforço do maciço; (7) Monitoramento e revestimento.

A furação é a primeira fase do método. Segundo CHAPMAN et al. (2010) utilizam-se equipamentos especializados para a realização de furos de (30-100) mm de diâmetros com comprimentos (10-20)% maiores do que o estipulado no plano de fogo. A posição também é um fator crucial para o sucesso do processo.

Em seguida ocorre a fase de carregamento e selagem. Nela é colocado dentro do furo o explosivo que foi previamente definido. É justamente o tipo e explosivo que determinará como o carregamento deve se proceder. Os principais tipos de explosivo são os encartuchados e os granulados, já os principais métodos de carregamento são o manual e por ar comprimido.

A detonação geralmente acontece com a utilização de iniciadores eletrônicos, não é rara, contudo, a utilização de estopim com queima direta. Os explosivos são então detonados em ordem definida e com um pequeno intervalo de espera entre cada estágio. Na ausência de um fluxo natural de ar é necessária a ventilação forçada da área detonada. Para isso a utilização de exaustores de alta potência e dutos é necessária. Ainda segundo CHAPMAN et al. (2010), como regra geral, sugere-se um tempo mínimo de 15 minutos para o reinício dos trabalhos.

Com o auxílio de martelotes hidráulicos é realizada a remoção de rochas fraturadas que ainda permanecem presas ao teto do túnel. Essa fase, conhecida como abatimento de choco, é importante para a segurança dos trabalhadores e equipamentos envolvidos. (CICHNELI, 2014)

Somente então a remoção dos detritos do processo de detonação ocorre. Ela deve ser realizada da maneira mais rápida possível e faz uso de pá carregadeira e caminhão basculante. Possíveis explosivos não detonados misturados aos detritos trazem risco adicional. (CHAPMAN et al., 2010)

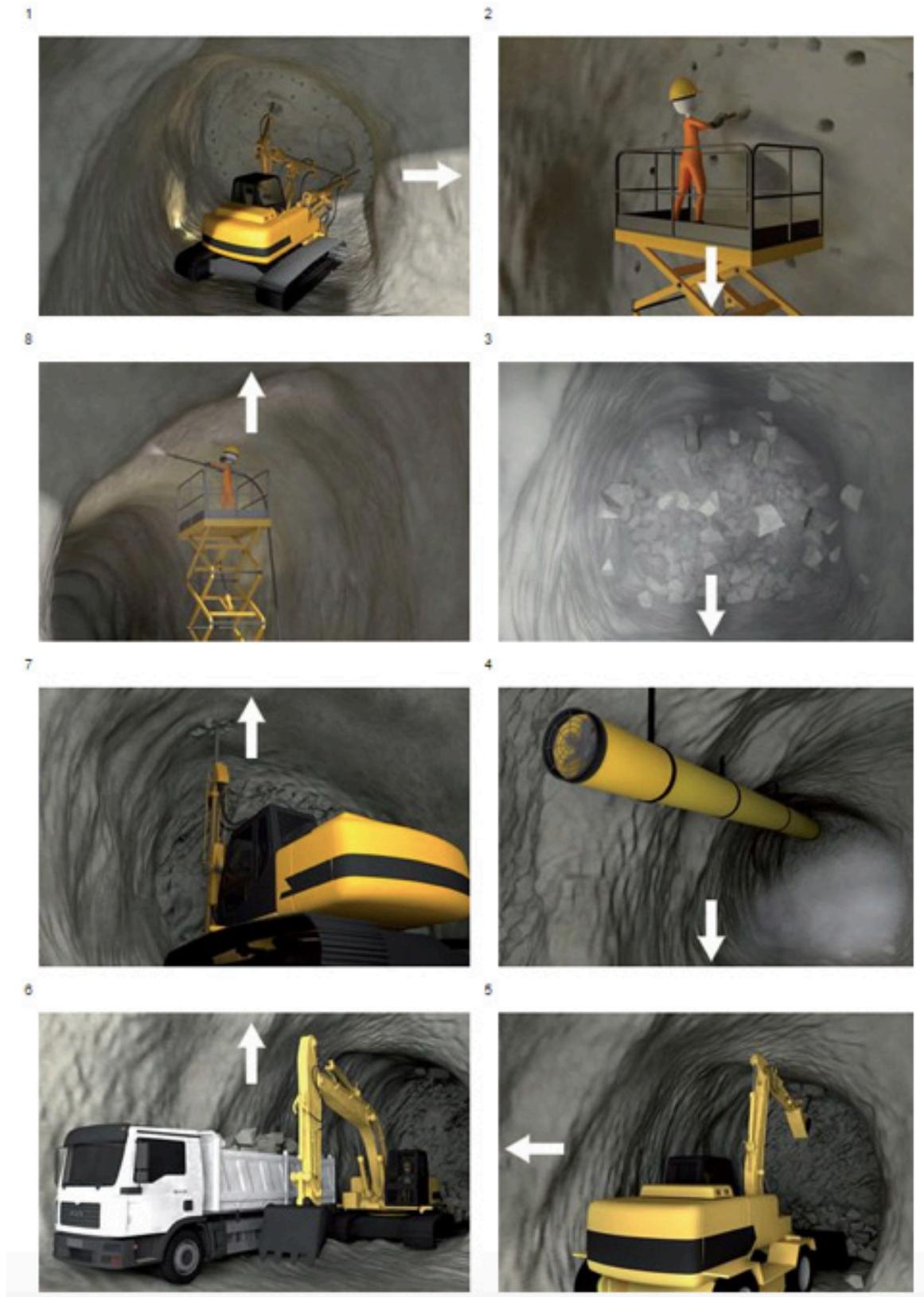


Figura 3 - Processo de escavação com explosivos.

Fonte: (CICHINELI, 2014)

Segundo CHAPMAN et al. (2010), dependendo da condição do maciço, faz necessária a aplicação de fixadores para melhora a estabilidade da abertura. A técnica mais comum faz uso de chumbadores mecânicos, cambotas e telas nas regiões menos estáveis.

Por fim o revestimento, que tem como função a estabilização definitiva da abertura, geralmente é executado por concreto projetado. Tal processo é influenciado pela rugosidade da superfície e da mistura cimentícia. (ZARE, S, 2007)

O método de escavação com explosivos apresenta custos menores que os métodos de escavação por tuneladoras em túneis de grande seção transversal (ZARE, S.; BRULAND; ROSTAMI, 2016). Além disso, a necessidade de mão de obra especializada é significativamente menor, tornando o método bastante atrativo.

1.2.2 Escavação mecânica com escarificadoras

O método de escavação mecânica por escarificação encontra o seu diferencial no uso de um equipamento dedicado ao processo denominados escarificadoras (Figura 4). De acordo com CLARKE-HACKSTON; BELZ; HENNEKER (2007), tais equipamentos foram desenvolvidos para a mineração de carvão na década de 50. Entretanto o seu contínuo desenvolvimento expandiu a sua aplicabilidade para diversos outros setores.

Atualmente as escarificadoras são utilizadas para escavação parcializada em terrenos que apresentam solo com relativa consistência, rocha branda e até alguns tipos de rocha dura. Em engenharia de túneis elas são utilizadas na escavação, no alargamento e reabilitação de estruturas subterrâneas.

Segundo CHAPMAN et al. (2010), as escarificadoras permitem a execução de túneis de seção não circular além de adaptar-se a variações das condições geológicas e hidrológicas com facilidade. A fácil execução de medidas de estabilização, mobilização dos equipamentos além do baixo nível de vibrações gerados são também ponto positivos.

O processo de operação acontece de maneira contínua. A seção transversal geralmente não ultrapassa a altura e largura máxima de (3,5 x 3,5) metros, limitando a área da seção do túnel em 12 m². A reutilização do equipamento também é bastante comum.

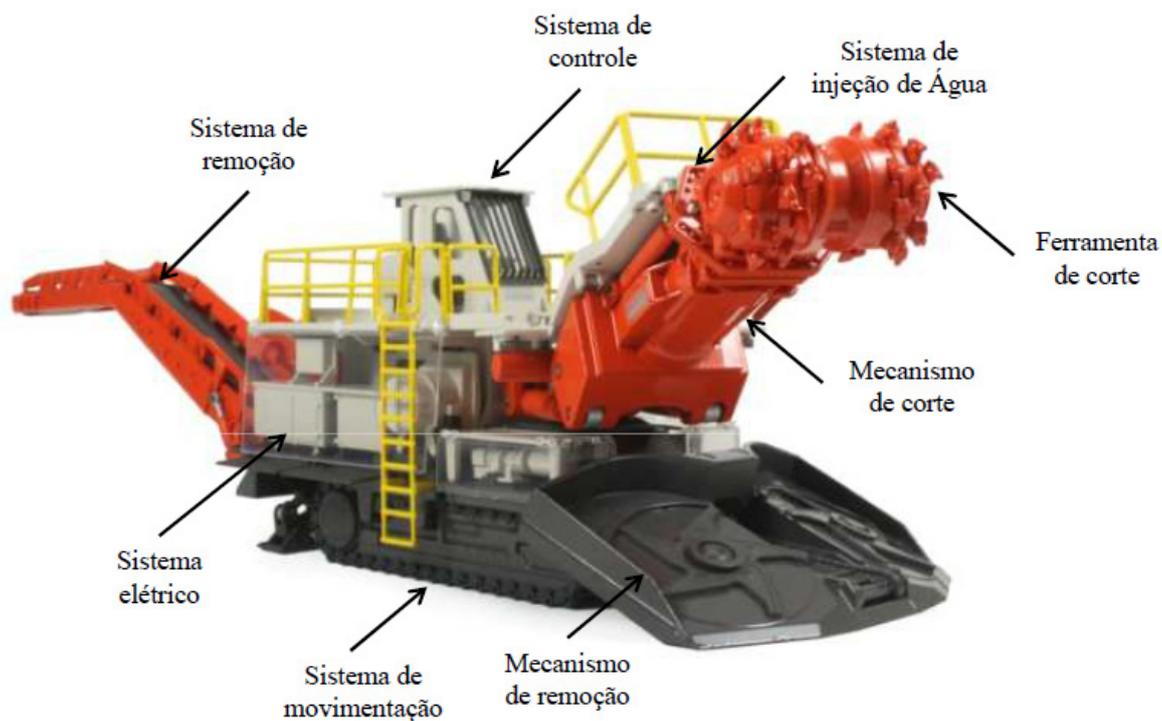


Figura 4 - Escarificadora transversal típica e seus principais sistemas

Fonte: (SANDVIK AB, 2016)

Outra informação é que basicamente há dois tipos de escarificadoras. A diferença está na direção de rotação da ferramenta de corte em relação ao eixo principal do equipamento. Conforme mostra na Figura 5 as escarificadoras axiais têm a direção de rotação alinhada com a direção do eixo principal da máquina, já as escarificadoras transversais possuem a sua ferramenta de corte girando transversalmente ao eixo principal, conforme mostra a Figura 6.

Dependendo da rotação da ferramenta de corte (transversal ou axial) os parâmetros do processo de desbaste (ângulo de ataque, força de corte, direção do movimento) são diferentes. Isso reflete em uma variação no tempo de vida da ferramenta para um mesmo tipo de rocha. (CHAPMAN et al., 2010)

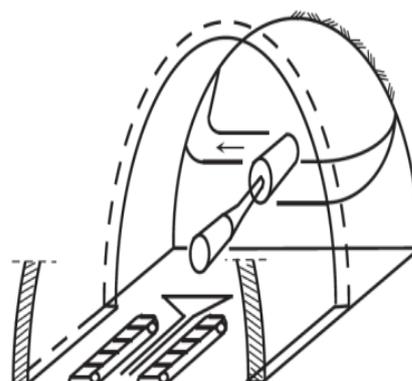


Figura 5 - Escarificadora axial e processo de escavação

Fonte: Adaptado (CHAPMAN et al., 2010)

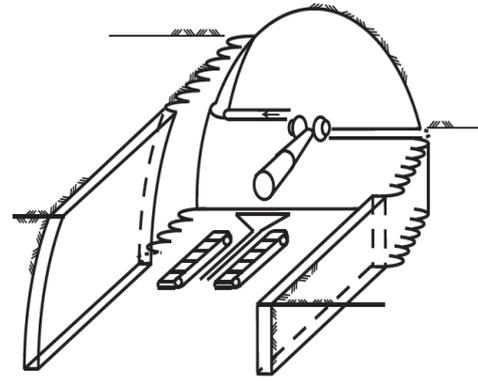


Figura 6 - Escarificadora transversal e processo de escavação

Fonte: Adaptado (CHAPMAN et al., 2010)

1.2.3 *Tuneladoras para rochas*

Tuneladoras são equipamentos projetados para executar obras subterrâneas. Geralmente com seção transversal circular e alto nível de complexidade, elas são adequadas para obras de infraestrutura urbana ou com grande cobrimento. (HEMPHILL, 2012) (ROSTAMI, 2016)

Apesar de serem aptas a operar em diversas condições geológicas, elas apresentam dificuldades com grandes variações geológicas durante o percurso. Segundo MAIDL et al. (2008) as principais vantagens das TBMs em relação aos demais métodos são:

- Maior taxa de avanço;
- Perfil escavado com melhor acabamento;
- Processo contínuo;
- Menor influência humana no processo;
- Melhores condições de segurança de trabalho;
- Alto nível de mecanização e automação.

Já as principais desvantagens:

- Maior necessidade de informações geológicas;
- Maior investimento inicial;
- Maior tempo de projeto e fabricação dos equipamentos;
- Seção transversal circular;
- Limitação no raio de curva;
- Planejamento altamente detalhado das atividades;
- Pouca adaptabilidade ao tipo de rocha e nível do lençol freático;
- Mão-de-obra e insumos altamente qualificados;
- Logística de transporte complicada.

De acordo com MAIDL et al. (2008), apesar do maior número de desvantagens, os ganhos técnicos, econômicos e de segurança para túneis longos e com pequeno diâmetro (diâmetro inferior a 1,5 m e comprimento superior a 1,5 km) são mais significativos. Entretanto um bom nível de eficiência, geralmente dependente da taxa de avanço, é necessário para garantir o sucesso de um empreendimento.

Uma vez que diversos tipos de TBMs são capazes de trabalhar nas mesmas condições, a determinação do tipo mais adequado depende de outros fatores tal qual a estabilidade do maciço.

Ainda segundo MAIDL et al. (2008) todas as TBMs apresentam quatro sistemas básicos, como mostra a Figura 7. Eles são: (1) o sistema de escavação (“*Boring System*”), que consiste basicamente da cabeça de corte; (2) o sistema de movimentação e acionamento (“*Thrust and Clamping System*”), que é responsável pela movimentação e acionamento das partes móveis da TBM; (3) o sistema de remoção dos detritos (“*Muck Removal System*”), que transporta os detritos da frente de corte até fora do túnel e (4) o sistema de suporte (“*Support System*”), que torna o túnel estável.

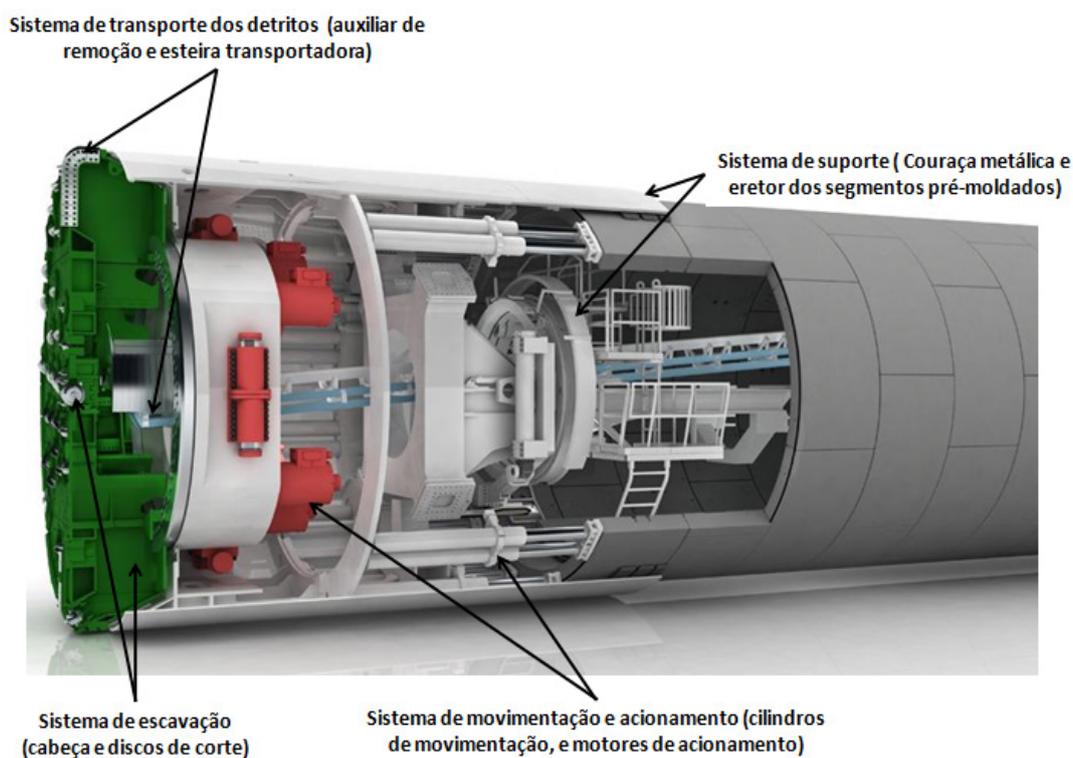


Figura 7 - Sistemas mecânicos de uma TBM com couraça metálica para rocha

Fonte: Adaptado (HERRENKNECHT AG, 2015b)

O primeiro e o mais importante para o desempenho da TBM é o **sistema de escavação**. Ele consiste em discos de cortes montados em posições estratégicas dentro da cabeça de corte.

A cabeça de corte, através do sistema de movimentação e acionamento, pressiona os discos de corte contra a face da rocha de tal maneira que gera um significativo campo de tensão ao redor da borda do disco. Tal campo extrapola o limite de ruptura

à compressão e diversas fissuras surgem ao redor da borda do disco. (HEMPHILL, 2012) (NAGHADEHI; MIKAEIL, 2017)

Então a cabeça de corte gira e as fissuras se propagam até outras fissuras (proveniente do disco de corte vizinho) como mostra a Figura 8. Nesse ponto o maciço lasca e o equipamento segue para o próximo ciclo.

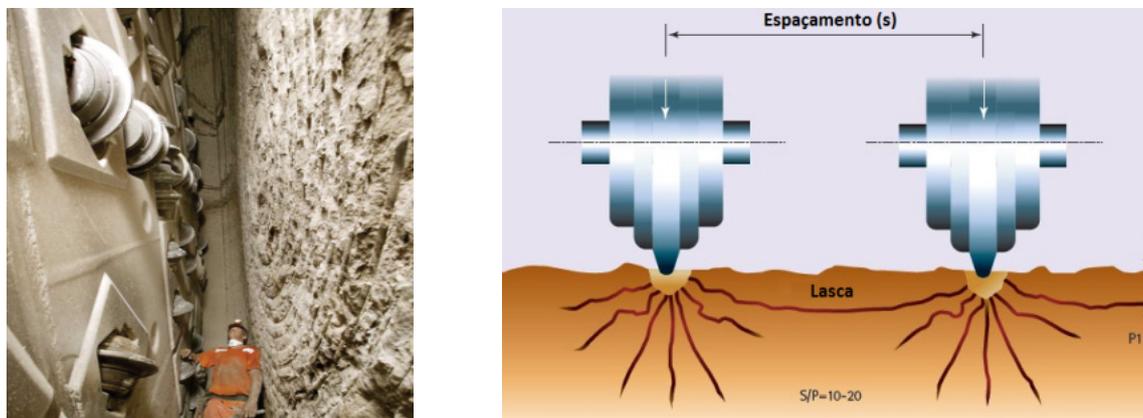


Figura 8 - Lascamento do maciço rochoso

Fonte: Adaptado (THE ROBBINS COMPANY INC., 2008) and (MOSER, 2013)

Mesmo fabricado em materiais de excelente qualidade, a vida útil dos discos de corte é relativamente pequena e exige trocas frequentes.

Esta característica depende de diversos parâmetros. Os mais importantes são a dureza, integridade, abrasividade e dutibilidade do maciço rochoso. Como exemplo a tabela 1 traz valores médios da distância percorrida por discos de mesmo diâmetro para diversas situações geológicas

<i>Tipo de rocha (local)</i>	<i>Distância percorrida (km)</i>
Quartzito (Noruega)	100
Granito (Suíça)	280
Rocha calcária (Suíça)	900
Rocha calcária (USA)	11.000
Basalto (Lesoto)	16.000

Tabela 1 - Distâncias médias percorridas por condições geológicas.

Fonte: Adaptado (MAIDL et al., 2008)

Outro fator importante (que não influencia na distância percorrida pelo disco, mas na frequência de troca) é a posição que o disco ocupa na cabeça de corte. Segundo estudo descrito em (MAIDL et al., 2008) discos na região periférica exigem mais trocas uma vez que percorrem uma maior distância. A Figura 9 ilustra o estudo citado juntamente com os seus resultados. Fica claro que as posições mais periféricas (28 – 36) necessitam de um número bem maior de discos de corte.

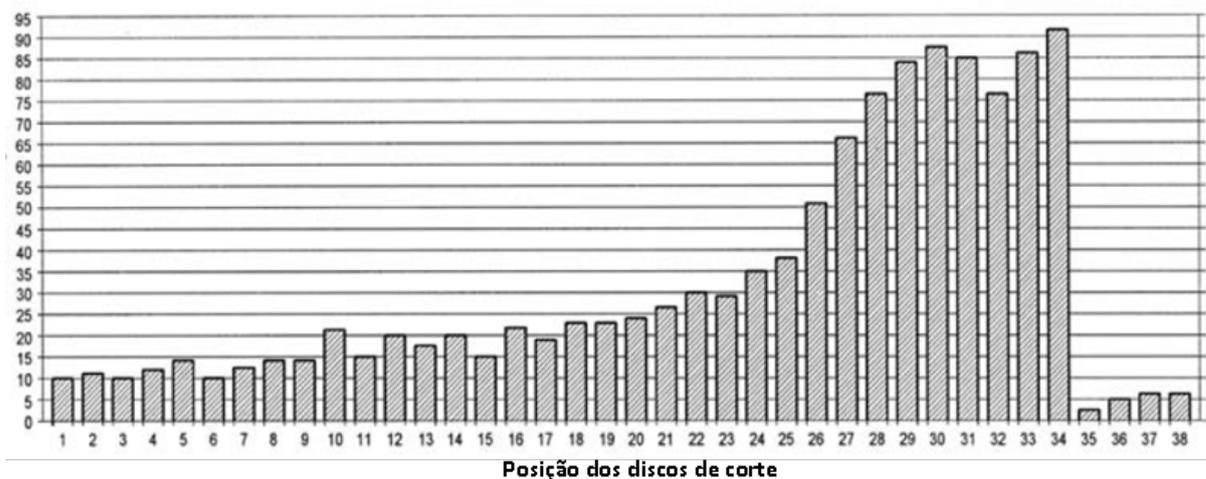
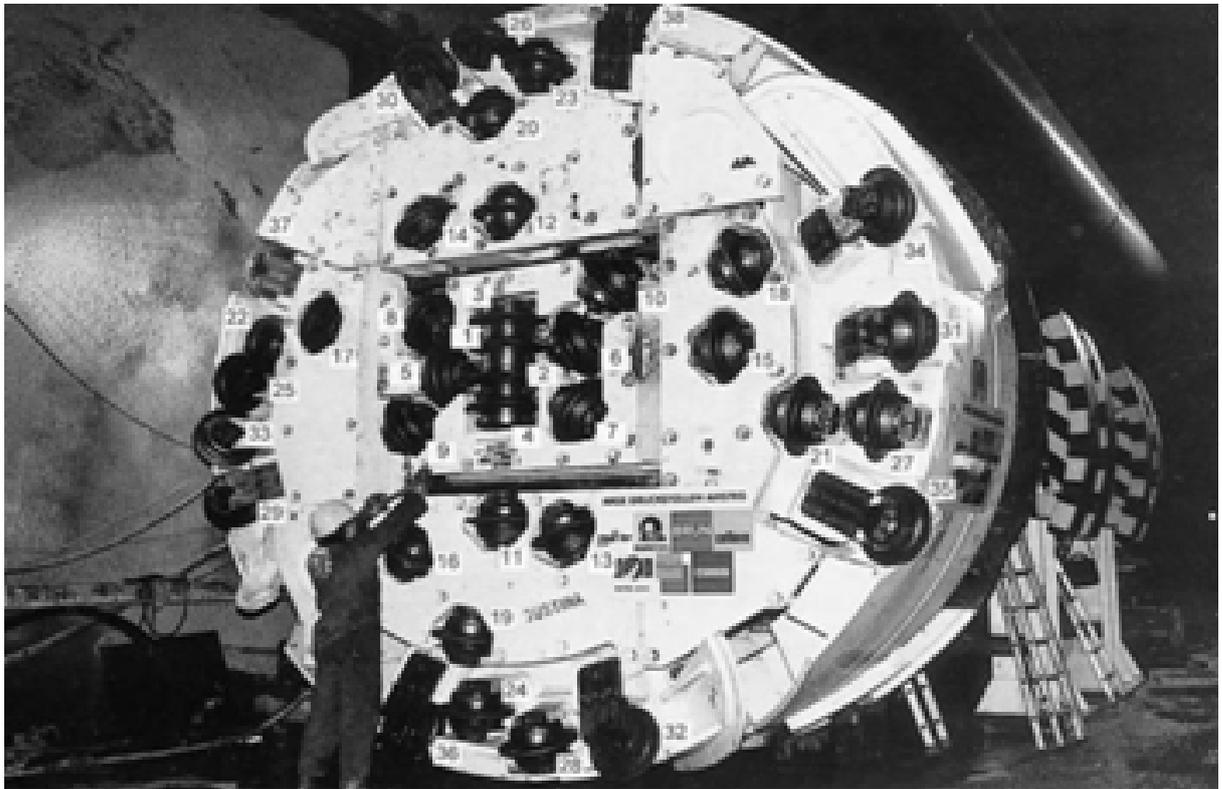


Figura 9 - Influência da posição radial do disco sobre a frequência de corte

Fonte: adaptado (MAIDL et al., 2008)

Devido ao significativo custo e o tempo da operação de troca, a durabilidade dos discos é um dos parâmetros mais importantes para os custos operacionais de escavação e, por consequência, a rentabilidade do empreendimento. (BRULAND, 2000) (ZHANG; MENG; SUN, 2014) (LIU et al., 2017)

Outro sistema mecânico de grande importância é o **sistema de acionamento e movimentação**. Ele é o responsável pela movimentação da TBM e em parte pelo processo de escavação. Enquanto a principal exigência de acionamento é ter potência suficiente para vencer o momento de inércia e torque de reação associado à força de atrito entre sistema de escavação e maciço, os requisitos de movimentação são mais complexos.

Para o sistema de movimentação é exigido potência suficiente para gerar força

para suprir a demanda relacionada ao atrito do equipamento com as paredes do túnel e o empuxo necessário para a compressão dos discos contra a rocha.

Toda essa potência é gerada por cilindros hidráulicos posicionados na região intermediária do equipamento (conforme mostra a Figura 10). Já o número necessário de cilindros depende das características específicas de cada projeto.

Esses cilindros, por sua vez, apoiam-se sobre o revestimento do túnel ou em sapatas para transmitir a reação à rocha. Dessa forma, os equipamentos que utilizam sapatas são conhecidos como *Gripper TBMs* e os que utilizam cilindros apoiados sobre o revestimento, *Shield TBMs*.

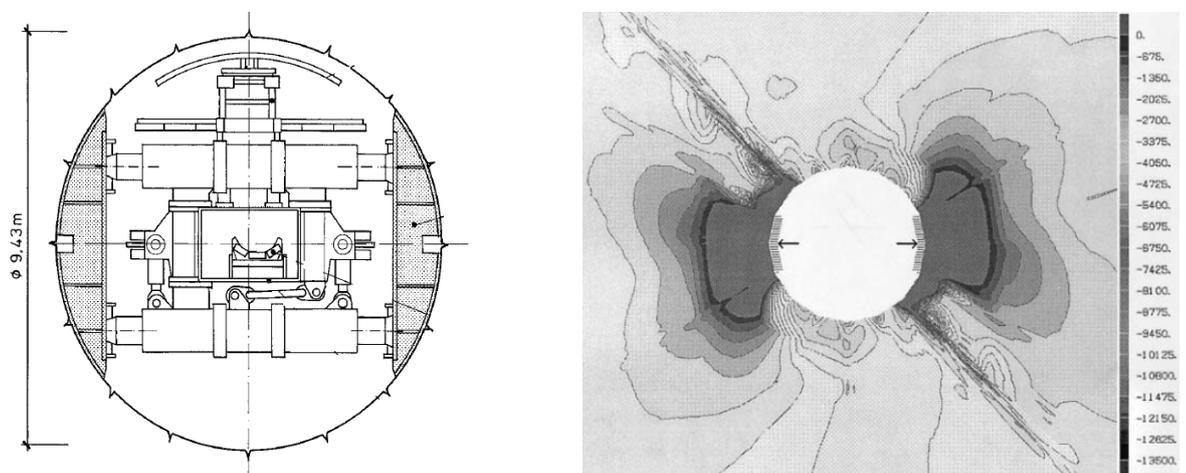


Figura 10 - TBM Gripper que utiliza sapatas para a transmissão dos esforços ao maciço (à esquerda) e TBM Shield que transmite os esforços através do atrito entre o revestimento primário e o maciço (à direita)

Fonte: (HERRENKNECHT AG, 2016) e (HERRENKNECHT AG, 2015b)

Cada uma das soluções é adequada para uma condição geológica específica. As *Grippers* têm maior vocação para maciços formados por rochas médias e duras com boa integridade e as *Shield* são mais indicadas para rochas brandas ou pouco íntegras.

Uma possível variação, a fim de reduzir as cargas sobre o maciço, é a utilização da *Gripper* com quatro sapatas dispostas em “X”. Dessa forma, os níveis de tensão na região de contato são bem menores conforme mostra a Figura 11.



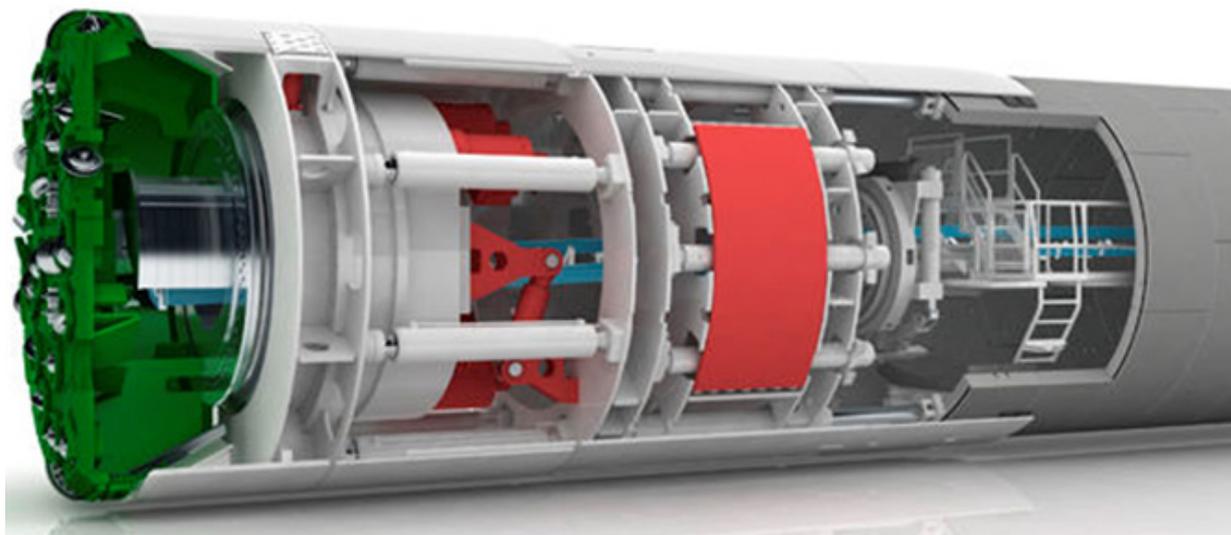


Figura 12 - Tuneladora com couraça única (acima) e com couraça metálica dupla articulada (abaixo).

Fonte: (HERRENKNECHT AG, 2015b) e (HERRENKNECHT AG, 2015a)

Ele é composto pelos insertos auxiliares, posicionados na da cabeça de corte, e esteiras transportadoras que se estendem por todo o equipamento.

Enquanto os insertos funcionam em conjunto com a geometria da própria cabeça de corte (como mostrado na Figura 13), as esteiras são acionadas por motores elétricos e possuem velocidade de até 40 km/h. Uma alternativa para a utilização de esteiras transportadoras é a substituição por vagões de transporte.

Entretanto problemas podem ocorrer tanto para os insertos quanto para as esteiras. Os principais motivos são grandes blocos de rocha ou material altamente coesivo que entopem as aberturas de remoção na cabeça de corte e grande fluxo de água para dentro da máquina. No segundo caso pode-se contornar o problema com a utilização de bombas de drenagem. (MAIDL et al., 2008)

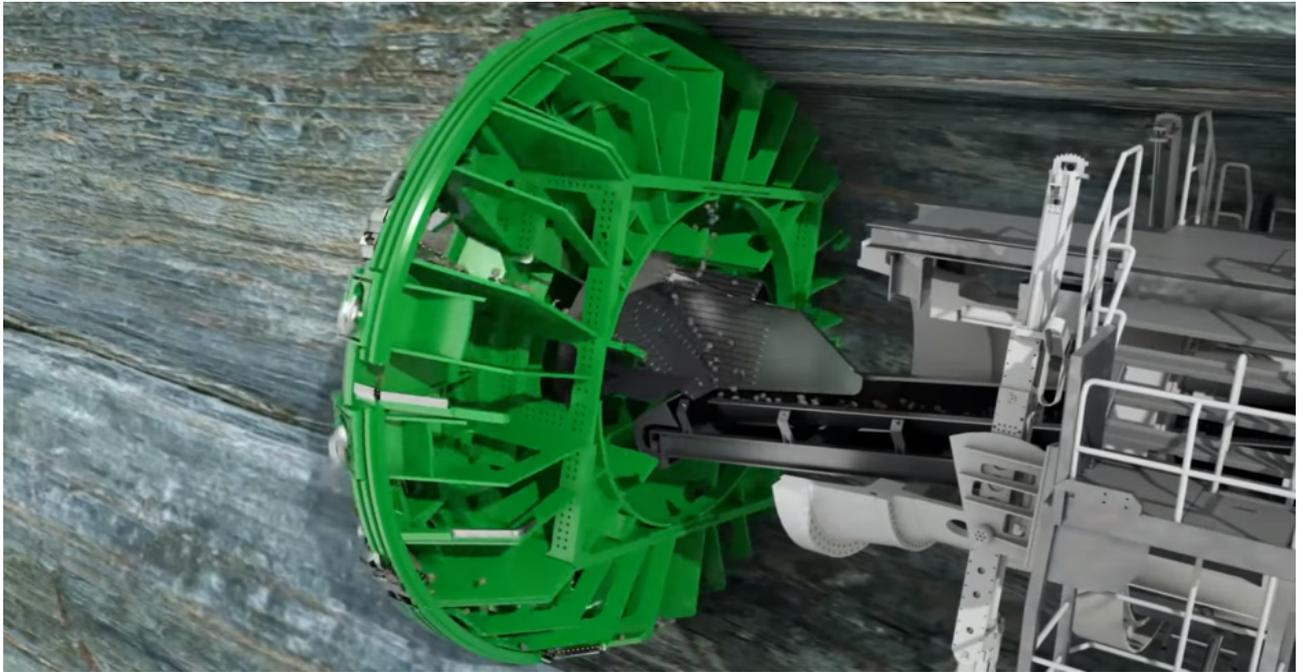


Figura 13 - Remoção dos detritos da frente de escavação através dos insertos auxiliares de remoção e cabeça de corte.

Fonte: (HERRENKNECHT AG, 2015)

Por fim o **sistema de suporte** completa a lista dos principais sistemas mecânicos. Como o próprio nome sugere, ele tem como função principal manter a estabilidade do túnel.

Segundo MAIDL et al. (2008) esta estabilidade é mantida de forma temporária por uma couraça metálica que envolve a parte frontal do equipamento e de forma permanente pelo revestimento final do túnel.

O revestimento permanente pode ser executado por diversas técnicas. As mais significativas são o concreto projetado e o revestimento por segmentos pré-moldados. Ambos amplamente utilizados, como mostram as imagens. Todos esses sistemas mecânicos (escavação, remoção, suporte, além do sistema de acionamento e movimentação) são interligados por sensores e operados remotamente em uma cabine de operação alocada no *back up*. (MAIDL et al., 2008)

Figura 14 e Figura 15.

Os segmentos pré-moldados são a abordagem mais comum quando a geologia não apresenta condições de receber diretamente os esforços de movimentação ou quando a rocha é pouco íntegra.

Por outro lado, quando a rocha apresenta boa resistência e integridade, o revestimento temporário quase inexistente e o permanente geralmente fica a cargo da tecnologia de concreto projetado com auxílio de cambotas metálicas, telas e chumbadores.

Todos esses sistemas mecânicos (escavação, remoção, suporte, além do sistema de acionamento e movimentação) são interligados por sensores e operados remotamente em uma cabine de operação alocada no *back up*. (MAIDL et al., 2008)



Figura 14 – Destaque para posicionamento e túnel finalizado com segmentos pré-moldados de concreto

Fonte: (THE ROBBINS COMPANY INC., 2008)



Figura 15 - Concreto projetado reforçado com cambotas metálicas e tirantes.

Fonte: (THE ROBBINS COMPANY INC., 2008)

1.2.3.1 Tuneladoras de couraça não circular

Como já citado o projeto mecânico das tuneladoras tradicionais exige que a seção transversal da maioria dos túneis seja circular. Como destacado na Figura 16, para algumas aplicações (em especial metroviária, ferroviária e rodoviária) esse tipo de geometria gera volumes escavados não aproveitados pelo propósito básico do empreendimento e, além disso, gera tarefas adicionais como a execução de lajes e

adição de material de preenchimento, exemplificado pela Figura 17.



Figura 16 – Volumes escavados do túnel sob o rio Yangtze na cidade chinesa de Nanjing que não são utilizados para o propósito inicial do empreendimento

Fonte: Adaptado (LONG, 2011)

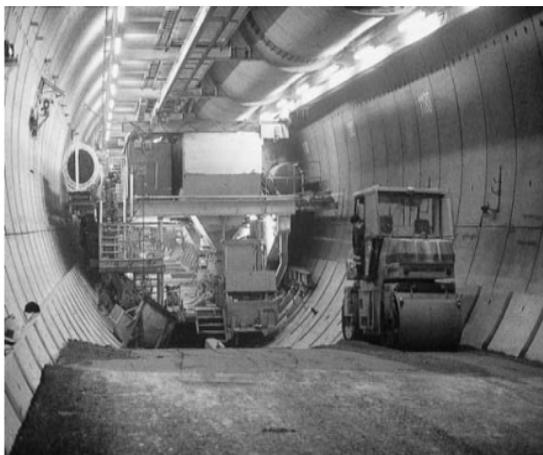


Figura 17 - Aterramento para pavimentação da pista de rodagem do túnel Murgenthal na cidade de Argovia, Suíça.

Fonte: (CHAPMAN et al., 2010)

Segundo KRCIK (2007) o volume escavado não utilizado pela função original² do empreendimento gera diversos custos adicionais e incrementa outros já previstos sem a agregação significativa de valor. Estima-se que o custo da escavação aumente de (20 - 30)% e que para o revestimento/preenchimento aumente de (15 - 20)% comparando-se seção circular e retangular de mesma área útil. Além disso, há um incremento no tempo total da obra haja vista a necessidade de uma etapa adicional de

2. É bastante comum utilizar o volume escavado adicional para funções como drenagem, saída de emergência e cabos de eletricidade.

preenchimento do espaço com solo ou até mesmo concreto de alta qualidade.

Dessa forma a criação de métodos mecanizados para execução de túneis de seção não circular despertou o interesse de diversas companhias ao redor do mundo. Os esforços concentravam-se principalmente no Japão com o desenvolvimento de algumas máquinas, mostradas na Figura 18, durante as décadas de 80 e 90. (KRCIK, 2007)

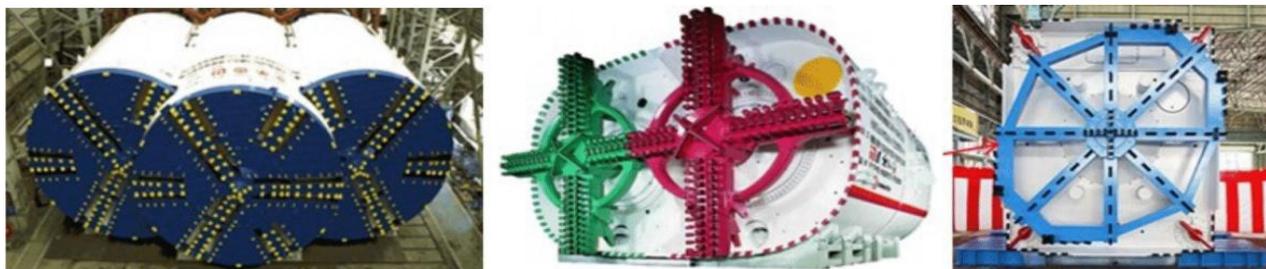


Figura 18 - Tuneladoras de seção não circular desenvolvidas nas décadas de 80 e 90 por fabricantes japoneses.

Fonte: (KRCIK, 2007)

Entretanto o ocidente também considerou o assunto, mas com uma abordagem baseada em máquinas utilizadas em mineração para a execução de obras de túneis. Exemplos desses equipamentos são mostrados na Figura 19.

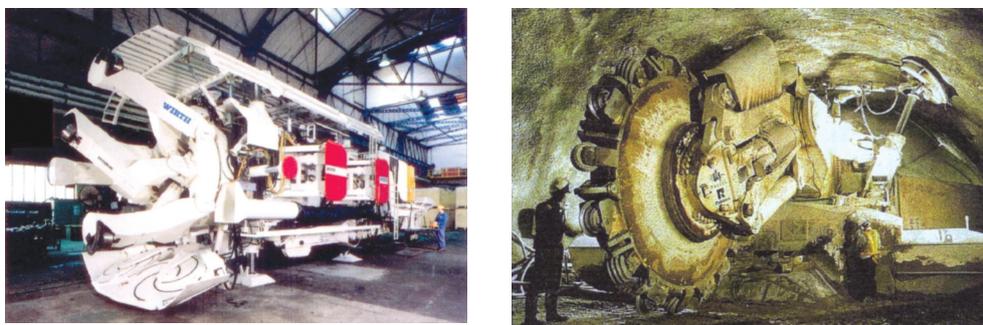


Figura 19 - Máquinas originalmente desenvolvidas para mineração que foram adaptadas para escavação de túneis urbanos.

Fonte: (KRCIK, 2007)

Atualmente esses equipamentos são uma realidade e diversas obras são executadas com essas tecnologias. A maioria delas no Japão e China nos quais as tuneladoras DPLEX e DOT são bastante difundidas, ricas fontes de informação são os trabalhos de CHEN; LEE; YANG (2013), YE et al. (2015) e YANG et al. (2013). A tuneladora *MinerMobile*, que é uma máquina mineira adaptada para execução de túneis, também é um conceito operacional.

1.3 Princípios básicos de corte de rocha

Segundo MAURER (1979) e LU et al. (2013), há uma variedade de mecanismos

físicos capazes de gerar desagregação de material rochoso. Entretanto todos podem ser classificados de acordo com os princípios básicos que estão associados: (1) à indução de tensões mecânicas; (2) à vaporização ou fusão de rocha; (3) à desintegração química e (4) à geração de tensões térmicas por introdução de calor. Todos esses princípios são mostrados esquematicamente na Figura 20.

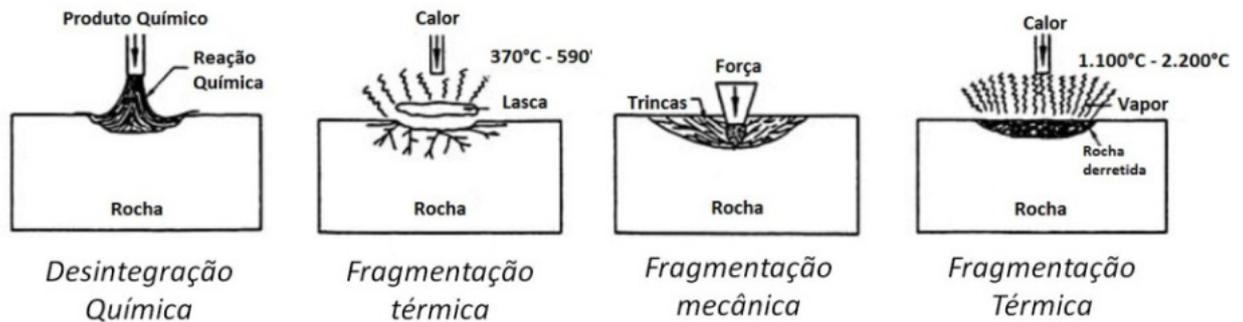


Figura 20 - Mecanismos físicos de corte de rocha

Fonte: Adaptado (MAURER, 1979)

Os métodos baseados na **fragmentação por indução de tensões mecânicas** são os mais utilizados atualmente. Entre eles destacam-se os métodos que utilizam contato mecânico para desagregação da rocha, como os discos de corte.

Já os métodos mais exóticos fazem uso de impacto, abrasão e erosão para a desagregação da rocha. É comum o uso de ferramentas de percussão, implosões e explosões para geração de tensões mecânicas por impacto enquanto o deslocamento de partículas duras contra a superfície da rocha para a desagregação por abrasão.

A **fragmentação por indução de tensões térmicas** faz uso da introdução de calor ao maciço rochoso. Como a rocha não é um sistema homogêneo, os diferentes coeficientes de expansão térmica provocam a nucleação e propagação de trincas por todo o material.

Segundo MAURER (1979) esse processo é especialmente poderoso na faixa de temperatura próxima a 573°C que é a temperatura de mudança de fase do quartzo.

Vale citar, entretanto, que a adição de energia térmica apenas gera um sistema altamente fraturado exigindo a utilização de um método adicional para a completa abertura da cavidade. (COOK, 1994)

A desagregação do material rochoso por **fusão ou vaporização** também faz uso da adição de energia térmica para a desagregação da rocha. Como o próprio nome dos métodos sugere, há a mudança de fase do material: de sólido para líquido ou gasoso.

Exemplificados pelos valores presentes na Tabela 2, esses métodos são energeticamente custosos, já que as rochas são isolantes térmicas. Outra característica interessante é que a energia necessária para fundir rochas ígneas, geralmente mais resistentes, é menor do que a necessária para rochas sedimentares, menos resistentes.

Material	Densidade, [g/cm ³]	Calor específico, [cal/g°C]	Ponto de fusão, [°C]	Calor latente de fusão, [cal/g]	Calor para fusão, [J/cm ³]
Gelo	0,92	0,47	0	80	310
Alumínio	2,7	0,25	660	77	2720
Vidro	2,6	0,19	1100	50	2850
Granito	2,7	0,24	1250	80	4320
Basalto	2,8	0,24	1150	100	4400
Arenito	2,2	0,24	1650	80	4400
Aço	7,8	0,11	1500	80	8000

Tabela 2 - Energia térmica requerida para fusão de diversos materiais.

Fonte: Adaptado (MAURER, 1979)

Por fim uma variedade de compostos químicos pode ser utilizada para a geração de **reações químicas** capazes de mudar a estrutura cristalina e reduzir a dureza do material rochoso. Da mesma forma que os métodos por indução de tensões térmicas, os métodos por reações químicas necessitam de um método auxiliar para a completa abertura da cavidade. Entretanto a maioria desses sistemas está em fase de pesquisa e a sua aplicação real ainda não é uma realidade. Eles enfrentam diversos problemas tecnológicos.

Enquanto os sistemas baseados em fragmentação por indução de energia térmica esbarram no fato de que as rochas são isolantes térmicos, os sistemas baseados nos processos de vaporização ou fusão das rochas esbarram no alto custo energético, mostrado comparativamente na Tabela 3. Já os sistemas baseados em processos químicos enfrentam problemas de segurança e operação de produtos químicos em larga quantidade. (COOK, 1994)

Família de métodos	Temperatura de operação, [°C]	Energia específica, [J/cm ³]
Mecânica	Ambiente	100
Fragmentação térmica	600	1.500
Vaporização	1.100-3.000	5.000
Fusão	8000-20.000	12.000

Tabela 3 - Ordem de grandeza da temperatura de operação e energia específica para cada família de métodos

Fonte: Adaptado (COOK, 1994)

Por essas razões os sistemas mecânicos, especialmente os sistemas baseados em disco de corte, são amplamente utilizados. Uma alternativa para incrementar em duas ou três vezes a taxa de remoção é a combinação entre métodos mecânicos e métodos alternativos. (LU et al., 2013)

Destaques são dados às tecnologias de hidrodemolição (HD) e fio diamantado (FD). Enquanto a HD apresenta taxa de remoção bastante relevante para rochas brandas e porosas, o fio diamantado é de baixo custo e energeticamente eficiente. (MINAS et al., 2009)

1.3.1 Hidrodemolição

Segundo CICCUC (1998) um jato de água é capaz de carregar algumas centenas de quilowatts de potência. Tal potência quando concentrada em uma pequena área pode causar sérias consequências no material impactado e é justamente esse o princípio físico utilizado pela hidrodemolição.

Tal tecnologia foi considerada de baixo impacto ambiental e promissora para aplicações em Engenharia Civil por BORTOLUSSI et al. (2005), HAGAN (1974), KOLLÉ (2000), OH; CHO (2016) e HLAVAEEK et al. (2015). Já JENG et al. (2004) conduziu experimentos para avaliar a aplicabilidade de hidrodemolição na execução de túneis. Conforme mostra a tabela 4, os autores constataram taxas de remoção entre 7 e 10 m³/h e de penetração em rochas brandas de até 5 cm/s de profundidade. Além disso, a rugosidade na região do corte foi considerada adequada e as faces da cavidade consideradas paralelas conforme mostram a Figura 21.

Tipo de rocha	Taxa de penetração, [cm/s]	Taxa de remoção, [m ³ /h]	σ_c , [Mpa]	Observação
Arenito	5,00	10,92	35 ~75	Rocha Branda
Ardósia	4,50	7,80	45 ~55	Rocha Média
Meta-arenito	0,01	0,08	148	Rocha dura
Granito	0,01	0,04	165	Rocha dura

Tabela 4 - Taxa de remoção para diversos tipos de rocha.

Fonte: Adaptado (JENG et al., 2004)



Figura 21 - Cavidades abertas por hidrodemolição em arenito (esquerda) e ardósia (direita)

Fonte: (JENG et al., 2004)

Segundo MOMBBER, A.; (2005), a pressão e a vazão volumétrica obtidas no bico de corte são os parâmetros mais importantes para o processo de hidrodemolição. Contudo esses não são os únicos parâmetros de influência para a taxa de remoção de material (principal índice de desempenho do processo de hidrodemolição). Uma lista mais completa pode ser obtida na tabela 5.

Em OH; CHO (2014) e OH et al. (2014) são investigados a influência de diversos parâmetros sobre a profundidade máxima e a taxa de remoção. Eles concluem que o

incremento da pressão e a redução no tempo de exposição, resistência a compressão e a distância entre bico e rocha maximizam a profundidade máxima. Já a taxa de remoção mostrou-se fortemente dependente da distância entre bico e rocha, existindo um valor ótimo.

Já JENG et al. (2004) destaca a influência da taxa de inserção de abrasivos ao fluxo de água. Segundo os autores o ponto ótimo é limitado pela tendência de entupimento do bico e mangueira pelo abrasivo.

Já segundo LU et al. (2013) o fluxo de abrasivo é bastante importante, mas a porosidade tem uma influência maior. Os autores vão além, eles argumentam que a importância do fluxo de abrasivo é maior com rochas de menor permeabilidade. Isso vai ao encontro dos princípios físicos propostos para a tecnologia.

Segundo SURJAATMADJA; BAILEY; SIERRA (2010) e os princípios físicos da hidrodemolição são dois: erosão (removendo o material com o uso de abrasivos); ou arrancamento/desplacamento (removendo o material pelo princípio de carga de tração).

Parâmetro	Grupo
Diâmetro	Propriedade do jato
Pressão	Propriedade do jato
Velocidade	Propriedade do jato
Ângulo	Propriedade do jato
Distância entre bico e Rocha	Propriedade do jato
Tempo de exposição	Propriedade do jato
Permeabilidade	Propriedade da Rocha
Porosidade	Propriedade da Rocha
Diâmetro dos grãos	Propriedade da Rocha
Coefficiente de atrito interno	Propriedade da Rocha
Resistência ao cisalhamento	Propriedade da Rocha
Resistência à compressão	Propriedade da Rocha
Resistência à tração	Propriedade da Rocha
Resistência à fratura	Propriedade da Rocha
Pressão limiar	Propriedade da Rocha
Densidade	Propriedade da Rocha
Dureza	Propriedade da Rocha
Módulo de elasticidade	Propriedade da Rocha
Coefficiente de <i>Poison</i>	Propriedade da Rocha
Densidade	Propriedade do fluido de corte
Viscosidade	Propriedade do fluido de corte
Velocidade	Propriedade do fluido de corte
Densidade	Propriedade do abrasivo
Fluxo de massa	Propriedade do abrasivo
Diâmetro dos grãos	Propriedade do abrasivo
Esfericidade	Propriedade do abrasivo
Velocidade	Propriedade do abrasivo

Tabela 5 - Parâmetros de influência sobre a taxa de remoção.

Fonte: Adaptado (MOMBER, A., 2005)

Apesar de ambos os princípios estarem sempre presentes, quando a rocha é pouco permeável a colisão entre as partículas de abrasivo e do material causam maior dano que o processo de arrancamento/deslocamento (OH et al., 2014). Conforme a Figura 22 ilustra, a partícula mais dura do abrasivo (partícula 1) causa uma maior deformação na partícula do material (partícula 2) acarretando, dessa forma, a erosão do corpo.

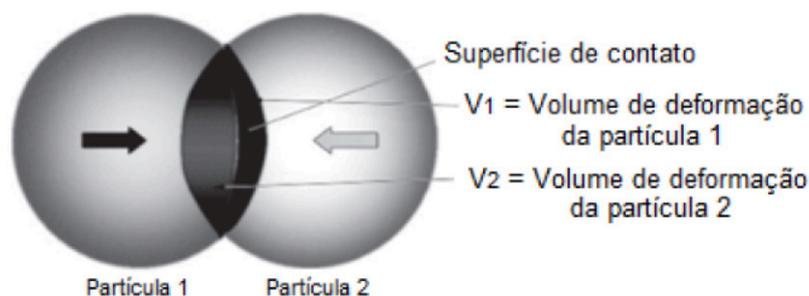


Figura 22 - Processo de erosão causado por jatos de água com abrasivos.

Fonte: Adaptado (SURJAATMADJA et al., 2010)

Por outro lado, o arrancamento (ou deslocamento) ocorre quando a permeabilidade da superfície a ser removida é grande o suficiente para proporcionar o fluxo através do substrato permeável criando uma pressão substancial no interior do corpo. Conforme ilustra a Figura 23, quando o jato colide com a superfície, uma área de alta pressão é criada ao redor da região do jato. Como esta pressão é geralmente muito mais elevada do que a pressão do poro, há a criação de um gradiente de pressão que promove o arrancamento/deslocamento do material.

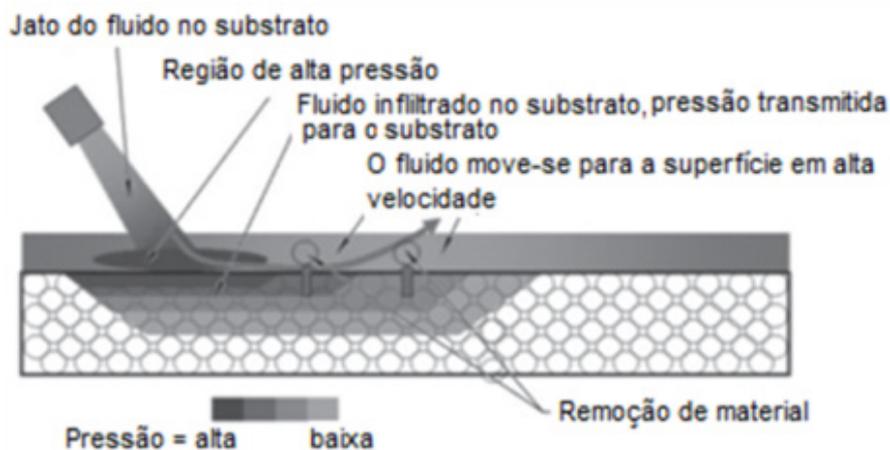


Figura 23 – Processo de arrancamento/deslocamento causado por jato de água

Fonte: Adaptado (SURJAATMADJA et al., 2010)

Aspectos sobre a estrutura do jato também são importantes. Segundo MOMBERR, A.; (2005) e como mostra na Figura 24 o jato de água apresenta uma estrutura cônica com a sua seção útil sendo reduzida com o distanciamento do orifício. O jato se divide em três zonas, na direção axial: a zona central, zona de transição e a zona

final. Na zona central, a pressão e a velocidade do jato são mantidas constantes e o comprimento desta zona está ligado ao diâmetro do bico de saída do jato, ou seja, quanto maior o diâmetro do bico, menor o comprimento do jato. Na zona de transição, ocorre a formação de gotas de água devido ao arrastamento com o ar e turbulência interna. Esse processo denomina-se atomização. Por fim, na zona final, o processo de atomização elimina a seção útil do jato e ele torna-se incapaz de causar dano ao alvo.

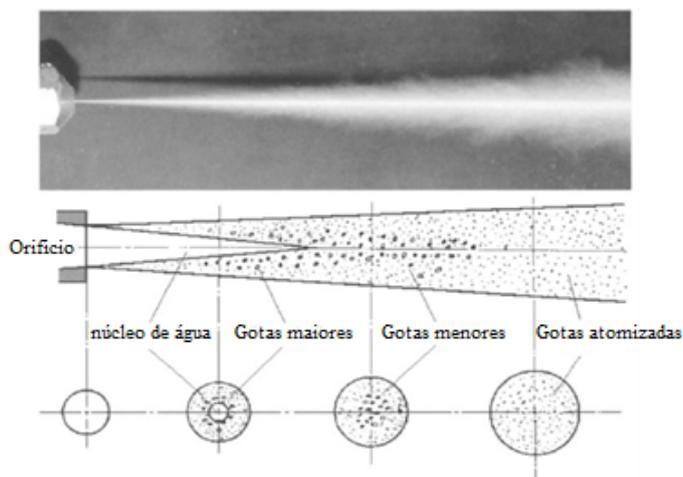


Figura 24 - Estrutura do jato de água

Fonte: Adaptado (MOMBER, A., 2005)

Atualmente as aplicações em nível industrial podem ser classificadas em função da pressão e vazão requeridas, como mostra a Figura 25. Percebe-se que a faixa de pressões e vazões para a remoção de material rochoso ou concreto é de (1000 – 1400) bares e (100 – 240) litros por minuto, respectivamente.

Para alcançar altos níveis energéticos são utilizados equipamentos capazes de bombear água em alta pressão e grandes vazões. O sistema basicamente é composto por uma bomba de baixa pressão que bombeia fluido hidráulico e água para um equipamento denominado intensificador. Tal equipamento funciona como um cilindro de dupla ação, impulsionando o fluxo, agora em alta pressão, para um equipamento chamado atenuador, como mostra a Figura 26.

No atenuador o caráter descontínuo do jato é reduzido e o fluxo é então conduzido para o bico de corte que possui uma constrição logo na entrada. Essa constrição permite um incremento ainda maior nos valores de pressão e a emissão o jato d'água.

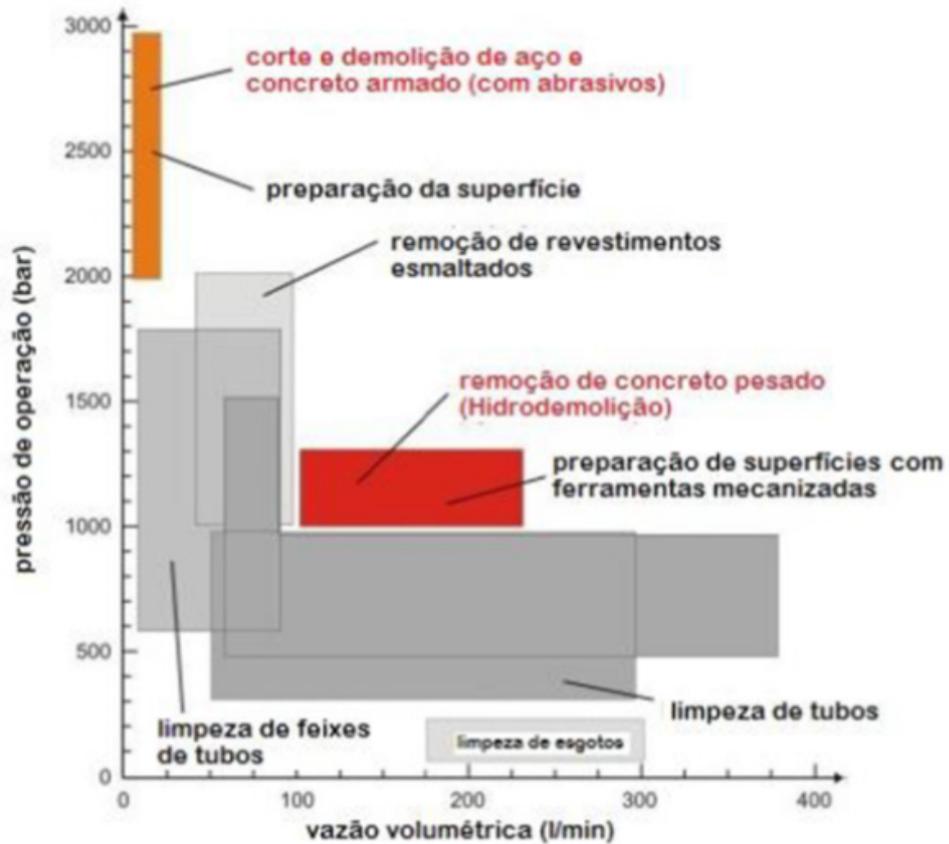


Figura 25 - Valores de pressão e vazão característicos para cada aplicação da hidrodemolição.

Fonte: Adaptado (MOMBER, A., 2005)

Antes da emissão do jato são inseridos no fluxo as partículas do abrasivo que geralmente são microesferas de ferro com diâmetro entre (0,08 – 0,17) mm. (KULEKCI, 2002)

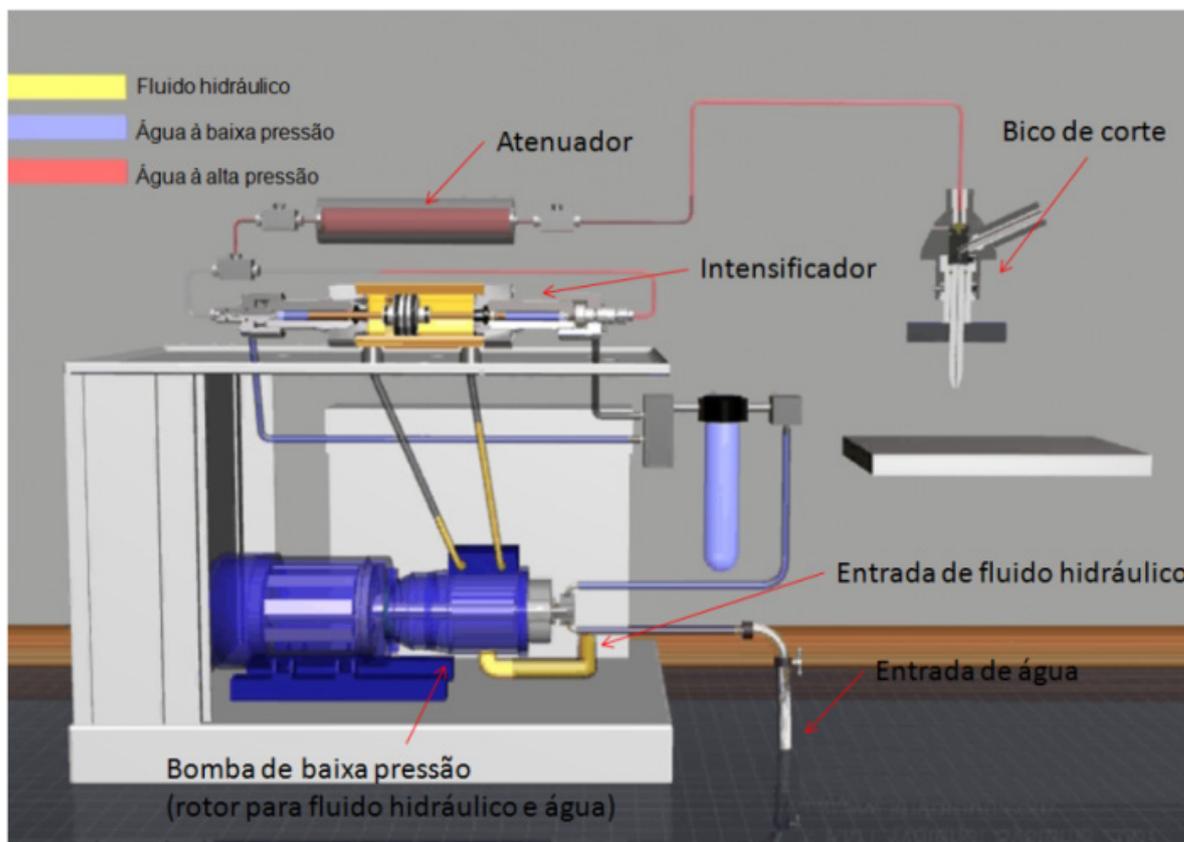


Figura 26 - Principais componentes de uma bancada de hidrodemolição

Fonte: Adaptado(KMT COMPANY, 2010)

1.3.2 Fio Diamantado

Em relação às tecnologias baseadas em elementos diamantados, uma das mais utilizadas é a tecnologia de fio diamantado (FD) (CIALKOWSKA, 1994). Ela tem ampla utilização na lavra de rochas ornamentais por todo o mundo, mas também é utilizada na construção civil e em outras indústrias objetivando o recorte de peças e demolição de instalações obsoletas. (ATAEI et al., 2012; VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013)

O princípio básico da tecnologia é a translação do fio sobre a superfície da rocha sob tensão (Figura 27). Por isso, em caso de lavras de rochas, são realizados pares de furos coplanares e perpendiculares que, ao se interceptarem, formam um circuito fechado no qual o fio circula. É necessário ainda adicionar água ao sulco de corte a fim de resfriar e remover as partículas provenientes do corte. Já a tensão sobre o fio é mantida devido ao afastamento do equipamento motriz, como pode ser visualizado na Figura 27. (ATAEI et al., 2012; ÖZKAN; SARILISIK; CEYLAN, 2015; VIDAL et al., 2013)



Figura 27 - O corte ocorre devido a translação do fio sobre a superfície da rocha (à esquerda) e o afastamento da unidade motriz da superfície de corte mantém a tensão no fio (à direita).

Fonte: (SPEEDCUT COMPANY, 2015)

Segundo VIDAL et al. (2013), o sistema utilizado geralmente é composto de uma unidade motriz, um sistema de tensionamento do fio e o próprio fio diamantado. Além disso, na maioria das aplicações é necessário uma perfuratriz do tipo *down-the-hole* para a realização dos furos iniciais

Quanto à unidade motriz, verifica-se que a sua evolução foi considerável nas últimas décadas tendo em vista a substituição dos equipamentos inicialmente hidráulicos por equipamentos elétricos automatizados. Atualmente, dependendo do modelo, a potência instalada pode chegar a 150 kW (aproximadamente 201 HP).

De forma semelhante, o sistema de tensionamento sofreu significativa melhora motivada principalmente pela importância da estabilidade da tensão no fio para o seu rendimento. As principais soluções utilizadas são o sistema com contrapeso e o sistema de acionamento hidráulico.

Por fim, o componente de maior importância é o fio diamantado. Ele é constituído por um cabo de aço galvanizado, que funciona como suporte para as pérolas diamantadas. Essas pérolas, por sua vez, são separadas por molas metálicas (rochas carbonáticas) ou por material polimérico (rochas de silicato), como mostra a Figura 28. Também é comum o posicionamento de anéis de fixação em intervalos constantes no fio, evitando que, em caso de rompimento, sejam lançadas mais pérolas que a quantidade compreendida naquele intervalo. (MCCARTHY, 2011)



Figura 28 - Estrutura de fio diamantado para rochas de silicato (à direita) e para rochas carbonáticas (à esquerda).

Fonte: (MCCARTHY, 2011)

Já o desempenho do fio diamantado é avaliado por dois indicadores principais:

- **Rendimento:** expressa a vida útil do fio. Correlaciona a área total cortada pelo fio com o seu comprimento. A unidade é $[m^2/m]$;
- **Velocidade de corte:** expressa o quão rápido ocorre o corte. Pode ser encontrada pela divisão da área cortada pelo tempo utilizado, sua unidade é $[m^2/h]$.

Segundo VIDAL et al. (2013) e ATAEL et al. (2012) e como mostra a tabela 6, os indicadores dependem fortemente de parâmetros controláveis e não-controláveis. Os parâmetros controláveis estão relacionados à máquina e às pessoas envolvidas, já os não-controláveis estão relacionados à geologia.

Parâmetro	Grupo
Velocidade periférica	Propriedade do equipamento
Posição do eixo de corte	Propriedade do equipamento
Número de pérolas por metro	Propriedade do equipamento
Potência motriz	Propriedade do equipamento
Ângulo de corte	Propriedade do equipamento
Dimensões do bloco	Propriedade do equipamento
Total de água adicionada	Propriedade do equipamento
Número de pérolas em contato com a rocha	Propriedade do equipamento
Raio de curvatura	Propriedade do equipamento
Frequência e grau de alteração	Propriedade geológica
Textura	Propriedade geológica
Propriedades mineralógicas	Propriedade geológica
Dureza	Propriedade geológica
Tensões	Propriedade geológica
Abrasividade	Propriedade geológica
Treinamento dos envolvidos	Condições de operação

Tabela 6 - Parâmetros de influência sobre o rendimento e velocidade de corte dos fios diamantados

Fonte: Adaptado (ATAEI et al., 2012)

Valores típicos para o rendimento e velocidade de corte para granito em lavras no estado do Espírito Santo entre os anos de 2011 e 2013 podem ser encontrados na Tabela 7.

Material	Velocidade de corte, [m ² /h]	Rendimento, [m ² /m]
Preto São Domingos	8 - 10	24 - 30
Preto São Gabriel	30	24 - 30
Verde Pavão	5 - 6	16 - 18
Cinza Corumbá	10 - 15	16 - 18
Amarelo Ornamental	15 - 20	26 - 32
Bege Pavão	12	24 - 28
Verde Pavão	12	24 - 28

Tabela 7 - Valores típicos de velocidade de corte e rendimento em lavras no Espírito Santo.

Fonte: (VIDAL et al., 2013)

1.4 Comparação de desempenho entre tuneladoras

Segundo HASSANPOUR; ROSTAMI; ZHAO (2011), GHASEMI; YAGIZ; ATAEI (2014) e SALIMI et al. (2016) as tuneladoras tornaram-se o método mais comum de escavação de túneis em rocha com extensão acima de 1,5 km. Devido aos altos valores envolvidos, riscos para as estruturas vizinhas, segurança dos trabalhadores e os diversos tipos de TBM existentes, a previsão do desempenho das diferentes tecnologias é de grande importância.

No presente trabalho os métodos de previsão de desempenho permitiram a comparação do desempenho estimado entre o novo conceito proposto (HD e FD) e as TBMs tradicionais. Nos últimos 50 anos diversos métodos foram propostos e estão compilados na Tabela 8.

Classe	Métodos	Vantagens	Desvantagens
Modelos simples	Proposto por Graham em 1976	Fácil aplicação	Resultados pouco precisos
Modelos com múltiplos parâmetros	CSM, NTNU, $Q_{t\text{b}\text{m}}$	Utiliza parâmetros geológicos e da TBM, baseado em grande base de informação.	Muitos parâmetros, demasiadamente complexo, utiliza teste incomuns.
Modelos probabilísticos	Proposto por Laughton em 1998	Utiliza uma abordagem probabilística	Pouco testado experimentalmente

Modelos auxiliados por computador	Redes neurais	Baseado em boas informações experimentais	Estrutura complexa, geralmente não disponibilizado
-----------------------------------	---------------	---	--

Tabela 8 - Principais modelos de previsão de desempenho atualmente utilizados.

Fonte: Adaptado (FARROKH; ROSTAMI; LAUGHTON, 2012)

Segundo ROSTAMI; OZDEMIR; NILSON (1996), os métodos da Escola de Minas do Colorado (CSM) e do Instituto Norueguês de Tecnologia (NTNU) são os mais utilizados no mundo. O trabalho cita ainda que apesar de seguirem bases de desenvolvimento diferentes os resultados mostram grande correlação.

Já HASSANPOUR et al. (2016) examinou o desvio entre os valores previstos e os verificados para diversos métodos. Ele observou que os valores previstos diferencem pouco dos observados em campo.

1.4.1 Modelo NTNU e adaptações para tuneladora de jato de água

O método de previsão de desempenho do Instituto Norueguês de Tecnologia foi desenvolvido na década de 1960 para a avaliação de escavações por percussão. Ele se destacou nos últimos anos devido à sua utilização nas principais obras subterrâneas do planeta. (BRULAND, 2014; PAULO, 2014)

Esse método é baseado em uma vasta quantidade de informações proveniente de mais de 250 km de túneis executados e 3000 amostras ensaiadas em laboratório (BRULAND, 2014). A última versão foi apresentada pelo Professor Amund Bruland no trabalho BRULAND (2000).

O modelo consiste na estimativa de quatro indicadores de desempenho: taxa de penetração [mm/rev], taxa de avanço [m/semana], durabilidade dos discos de corte [m/discos ou h/disco] e custo operacional de escavação [\$/m]; cada um dependente de diversos fatores como mostra a Tabela 9.

Parâmetro	Influência sobre
Frequência e orientação das alterações	Taxa de penetração
Coefficiente de escavabilidade (DRI) ³	Taxa de penetração
Porosidade	Taxa de penetração
Empuxo nos discos de corte	Taxa de penetração
Diâmetro dos discos de corte	Taxa de penetração
Espaçamento entre s discos de corte	Taxa de penetração
Horas trabalhadas	Taxa de avanço
Produtividade da TBM	Taxa de avanço
Taxa de penetração	Taxa de avanço
Coefficiente de durabilidade (CLI) ⁴	Durabilidade dos discos
Número, diâmetro e forma dos discos de corte	Durabilidade dos discos
Teor de quartzo	Durabilidade dos discos
Material dos discos de corte	Durabilidade dos discos
Empuxo nos discos de corte	Durabilidade dos discos
Velocidade angular da cabeça de corte	Durabilidade dos discos
Número de discos de corte	Custo operacional
Custo dos discos de corte	Custo operacional
Durabilidade dos discos de corte	Custo operacional

Tabela 9 - Parâmetros de influência sobre o desempenho das TBMs tradicionais

Fonte: (BRULAND, 2000)

Uma vez que a taxa de avanço depende da taxa de penetração e o custo operacional depende da durabilidade dos discos de corte, a taxa de penetração e durabilidade são os indicadores mais significativos do modelo NTNU.

Segundo BRULAND (2014) a taxa de penetração depende fortemente da frequência e orientação das descontinuidades além do empuxo associado aos discos de corte.

A abordagem básica do método é calcular a taxa de penetração básica (I_o), a partir dos parâmetros geológicos e da tuneladora. O método sugere que as influências dos principais parâmetros geológicos, em especial da frequência das descontinuidades, sejam combinados em um fator denominado “Fator de Fraturamento Equivalente”, k_{ev} . De maneira análoga as influências dos parâmetros relacionados à máquina são combinados em outro fator denominado “Empuxo Equivalente”, M_{ekv} .

Segundo BRULAND (2014) o fator de fraturamento equivalente, k_{ev} , pode ser determinado pela multiplicação dos fatores de fraturamento total, k_{s-tot} , fator de correção do índice de escavabilidade, k_{DRI} , e pelo fator de correção da porosidade da rocha, k_{por} . Sendo que o fator de fraturamento total, k_{s-tot} , é encontrado a partir do somatório do fator de fraturamento para cada família de descontinuidade, k_{si} , como mostrado nas

3. O coeficiente de escavabilidade pode ser entendido como a resistência da rocha ao desmonte por desgaste mecânico.

4. O coeficiente de durabilidade pode ser entendido como a resistência da ferramenta de corte ao desgaste durante o processo de escavação

equações 02 e 03.

$$k_{ev} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} \cdot K_{por} \quad \text{Equação 01}$$

$$k_{s-to} = \left(\sum_{i=1}^n k_{si} \right) - (n - 1) \cdot 0,36 \quad \text{Equação 02}$$

Vale citar que k_{si} , k_{por} , k_{DRI} podem ser encontrados em ábacos presentes na última versão do método apresentado por Amund Bruland em 2000.

De forma semelhante o empuxo equivalente, M_{ev} , pode ser encontrado pela multiplicação do empuxo médio por disco de corte, M_B , o fator de correção do diâmetro do disco de corte, k_d , e o fator de correção para o espaçamento entre os discos de corte, k_a , como mostra a equação 03.

$$M_{ev} = M_B \cdot k_d \cdot k_a \quad \text{Equação 03}$$

O fator de correção para os discos de corte (k_d) é necessário quando o diâmetro do disco for diferente de 483 mm e o fator de correção para o espaçamento entre os discos de corte (k_a) é necessário quando o valor for diferente de 70 cm.

Por fim com os valores de k_{ev} e M_{ekv} determinados é possível encontrar a taxa de penetração básica, I_0 , utilizando o ábaco mostrado na Figura 29.

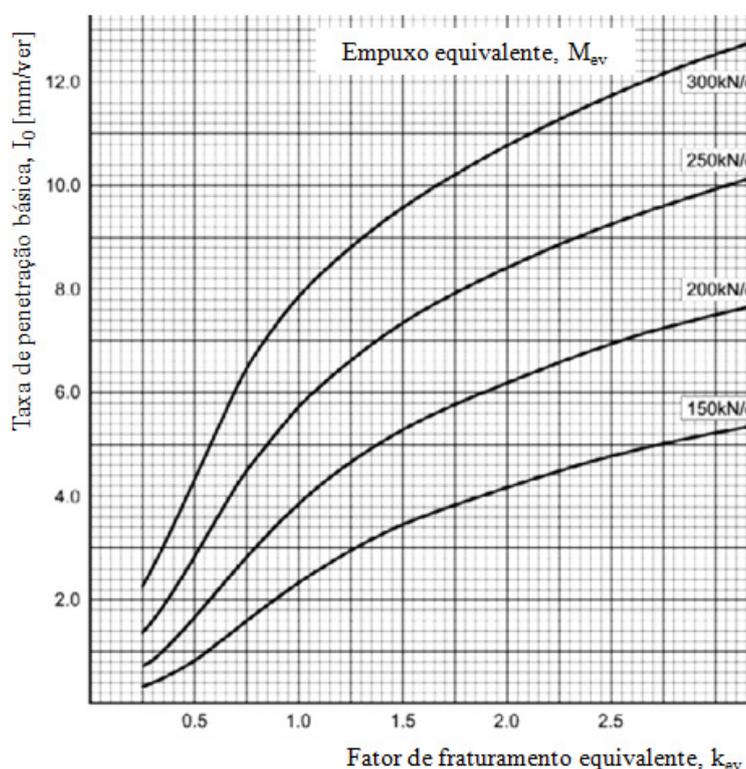


Figura 29 - Taxa de penetração a partir do fator de fraturamento equivalente e empuxo equivalente

Fonte: Adaptado (BRULAND, 2014)

Por fim a taxa de penetração em metros por hora, como mostra a equação 04, é o produto entre a taxa de penetração básica e a velocidade angular da cabeça de corte em rotações por minuto.

$$I_n = I_0 \cdot w_{rpm} \cdot \left(\frac{60}{1000} \right) \quad \text{Equação 04}$$

Com a taxa de penetração definida, I_n , a produtividade da tuneladora, Pr , e as horas trabalhadas, Hr , é possível calcular a taxa de avanço através da equação 05.

$$A = I_n \cdot Pr \cdot Hr_{trab} \quad \text{Equação 05}$$

A durabilidade dos discos de corte (H_n), ou mais precisamente a vida útil do disco de corte, é baseado em informações colhidas em campo e de testes realizados em laboratório.

Ela pode ser obtida pelo produto entre durabilidade básica dos discos de corte, H_0 , o fator de correção para o diâmetro da TBM, k_D , o fator de correção para o teor de quartzo, k_Q , o fator de correção da velocidade angular da cabeça de corte, k_{rpm} , e o fator de correção do número de discos, k_n , dividido pelo número total de discos de corte, N_{tbn} .

$$H_n = \left(H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{rpm} \cdot k_n \right) / N_{tbn} \quad \text{Equação 06}$$

Enquanto k_D e k_Q podem ser encontrados através da utilização de ábacos, os valores k_{rpm} e k_n são calculados a partir das equações 07 e 08, onde d_{tbn} , N_{tbn} , N_o e W_{rpm} denominas respectivamente o diâmetro da tuneladora, o número de discos de corte, o número normal de discos de corte para o diâmetro da tuneladora e a velocidade angular da cabeça de corte em RPM.

$$K_{rpm} = (50/d_{tbn})/w_{rpm} \quad \text{Equação 07}$$

$$K_n = N_{tbn}/N_o \quad \text{Equação 08}$$

Mais complexo, entretanto, é a determinação da durabilidade básica dos discos de corte (H_0). Ela passa pela determinação do indicador de durabilidade dos discos, CLI. Por sua vez o indicador CLI depende do índice de escavabilidade da rocha, DRI,

do teor de quartzo, $\%_Q$, e ábacos para a determinação do seu valor.

Por fim o valor do indicador de durabilidade dos discos, CLI, juntamente com o diâmetro dos discos e o ábaco mostrado na Figura 30 permitem a determinação da durabilidade básica em horas.

Já a distância percorrida por cada disco, durabilidade média, pode ser calculada a partir da multiplicação entre a durabilidade básica e a taxa de penetração, como mostrado na equação 09.

$$H_m = H_h \cdot I_n \quad \text{Equação 09}$$

Com a durabilidade média definida e o preço e o número de discos necessários é possível calcular o custo primário de escavação do equipamento que em sua maioria provêm do custo de compra dos discos de corte.

$$C_{\text{primario}} = H_m \cdot N_{\text{tbn}} \cdot \$_{\text{disco}} \quad \text{Equação 10}$$

No qual:

C_{primario} = Custo primário de escavação;

H_m = durabilidade média dos discos de corte, [m/disco];

$\$_{\text{disco}}$ = Preço médio dos discos de corte.

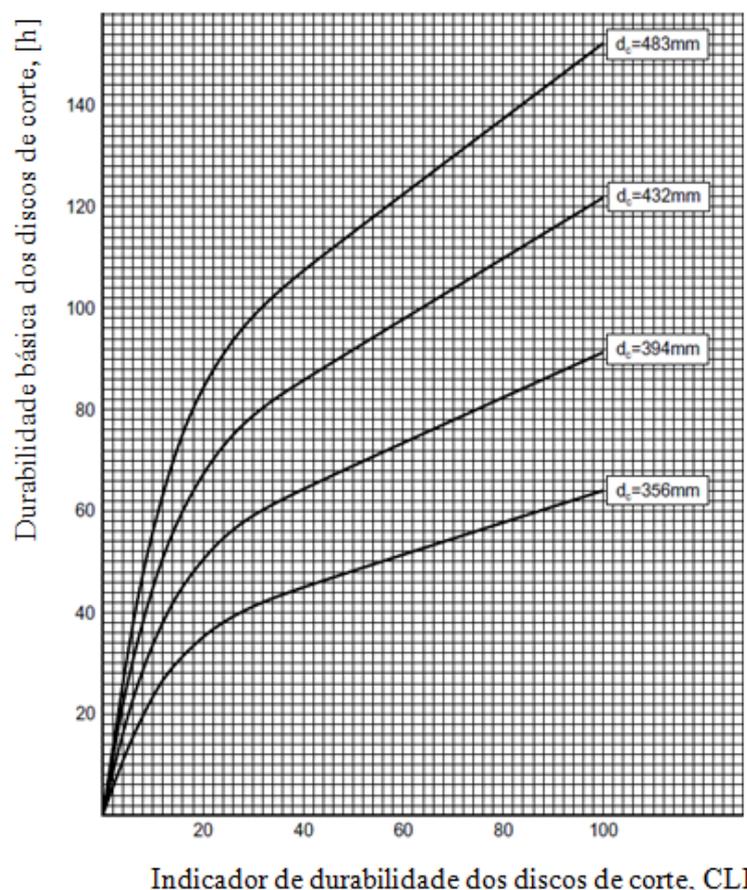


Figura 30 - Durabilidade básica dos discos de corte a partir do indicador de de durabilidade e diâmetro dos discos de corte

Fonte: Adaptado (BRULAND, 2000)

Vale citar, entretanto, que o método NTNU foi elaborado para máquinas equipadas com discos de corte, sendo inadequados para o conceito proposto neste trabalho que incorpora as tecnologias de hidrodemolição e fio diamantados como princípio de corte. Adaptações baseadas nas características de ambas as tecnologias devem ser feitas.

Uma das abordagens é a substituição da taxa de penetração, I_n , pela taxa de remoção volumétrica do processo de hidrodemolição, $V_{remoção}$, para o tipo de rocha escavada no cálculo da taxa de avanço. Seria necessária também a incorporação de um coeficiente de Forma, $F_{seção}$, que seria definido a partir das características geométricas do conceito proposto e o número de bicos utilizados, N , como mostra a equação 11.

$$A = N \cdot V_{remoção} \cdot F_{seção} \cdot Pr \cdot Hr_{trab} \quad \text{Equação 11}$$

Já o custo primário de escavação, C_{op} , necessita de uma mudança mais radical de abordagem. Ao invés de adaptar o método NTNU, ele utiliza o método de custo unitário para a definição do custo primário de escavação para o conceito proposto.

Nesse método, como mostra a equação 12, o custo total é a soma do produto entre o custo de cada insumo ou componente, $C_{ins/comp}$, pela quantidade necessária, $Q_{necessária}$, para a execução de um metro cúbico de túnel. Da mesma forma que o método NTNU, não são considerados os custos de reforço do maciço e revestimento permanente

$$C_{primario} = \sum C_{\frac{ins}{comp}} \cdot Q_{necessária} \quad \text{Equação 12}$$

1.5 Síntese do capítulo

A determinação do método de escavação mais adequado nem sempre é fácil. Os principais métodos são o manual; mecanizado convencional; mecanizado por escarificadora; mecanizado por TBM com escudo; mecanizado por TBM sem escudo e de escavação a fogo. Enquanto a escavação a fogo é mais adequada para túneis curtos e de seção não convencional, os métodos com TBM são mais apropriados para túneis longos de pequeno diâmetro.

As tuneladoras são equipamentos enormes e pesados além disso os seus parâmetros de utilização tem grande importância sobre o sucesso financeiro do empreendimento. Devido ao seu princípio de funcionamento, os túneis executados

geralmente tem seção circular. Tais equipamentos são divididos didaticamente em quatro grandes subsistemas (de escavação, remoção e transporte dos detritos, movimentação e acionamento, suporte).

Apesar de bem consolidada no setor, o setor de máquinas tuneladoras é carente de inovações radicais. Uma das alternativas é a utilização de métodos de escavação que substituam os discos de corte. Nesse contexto a combinação entre hidrodemolição e fio diamantado é promissora.

Enquanto hidrodemolição (HD) pode ser entendida com um jato de água e abrasivo com grande pressão e vazão, o fio diamantado (FD) utiliza o movimento relativo entre o fio e a superfície da rocha para executar o corte. Enquanto a HD proporciona maior taxa de remoção com maior custo energético, o FD apresenta taxas de remoção menores com menor custo energético.

A viabilidade técnica e econômica da utilização da HD e FD como princípio de corte de uma tuneladora tem que ser analisada comparativamente com o desempenho dos atuais equipamentos. Tal tarefa pode se executada com a utilização de métodos de previsão de desempenho proposto pelo Instituto Norueguês de Ciência e Tecnologia (NTNU).

Esse método permite a determinação da taxa de avanço e custo básico de escavação para tuneladoras com discos de corte. A substituição da taxa de penetração básica, por sua vez, pela taxa de remoção da hidrodemolição permite a determinação da taxa de avanço para as tuneladoras com HD e FD.

DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO PROPOSTO

Atualmente reconhece-se que as decisões tomadas no início do processo de desenvolvimento do produto tem papel fundamental na manufatura, qualidade e custos finais do produto.

Segundo BACK et al. (2008) as influências negativas da definição incorreta dos requisitos sobre o processo de decisão e a definição inadequada da função de projeto sobre a funcionalidade exemplificam a importância de um processo de desenvolvimento que minimize decisões empíricas ou por tentativa e erro.

Com esse objetivo vários métodos foram propostos para diversos setores industriais e tipos de desenvolvimento, conforme citado por ROMANO (2003), REIS (2003) e DARÉ (2001). Dentre eles destaca-se o modelo proposto por ROMANO (2003) e revisado por LEONEL (2006) que sistematiza as pesquisas realizadas pelo Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NEDIP) da UFSC denominado PRODIP (Processo de desenvolvimento integrado de produtos). Esse modelo, como mostra a

Figura 31, é dividido em oito etapas distribuídas em três macrofases: Planejamento, Projetação e Implementação

Enquanto a macrofase de Planejamento preocupa-se com os processos de planejamento do projeto, que considera as ações para a elaboração do plano de projeto, visando orientar o desenvolvimento do produto e suas demais fases. A macrofase de Projetação envolve os processos para elaboração do projeto do produto, ou seja, a transformação das informações de necessidades em informações técnicas detalhadas da solução proposta. Esta macrofase é composta pelas etapas de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. (BACK et al., 2008)

Como ilustra a

Figura 31 o objetivo do desenvolvimento proposto nesta tese é apenas definir novos conceitos, as etapas de projeto preliminar e detalhado da macrofase de Projetação e todas da macrofase de Implantação e Planejamento de projeto não fazem parte do escopo do trabalho.

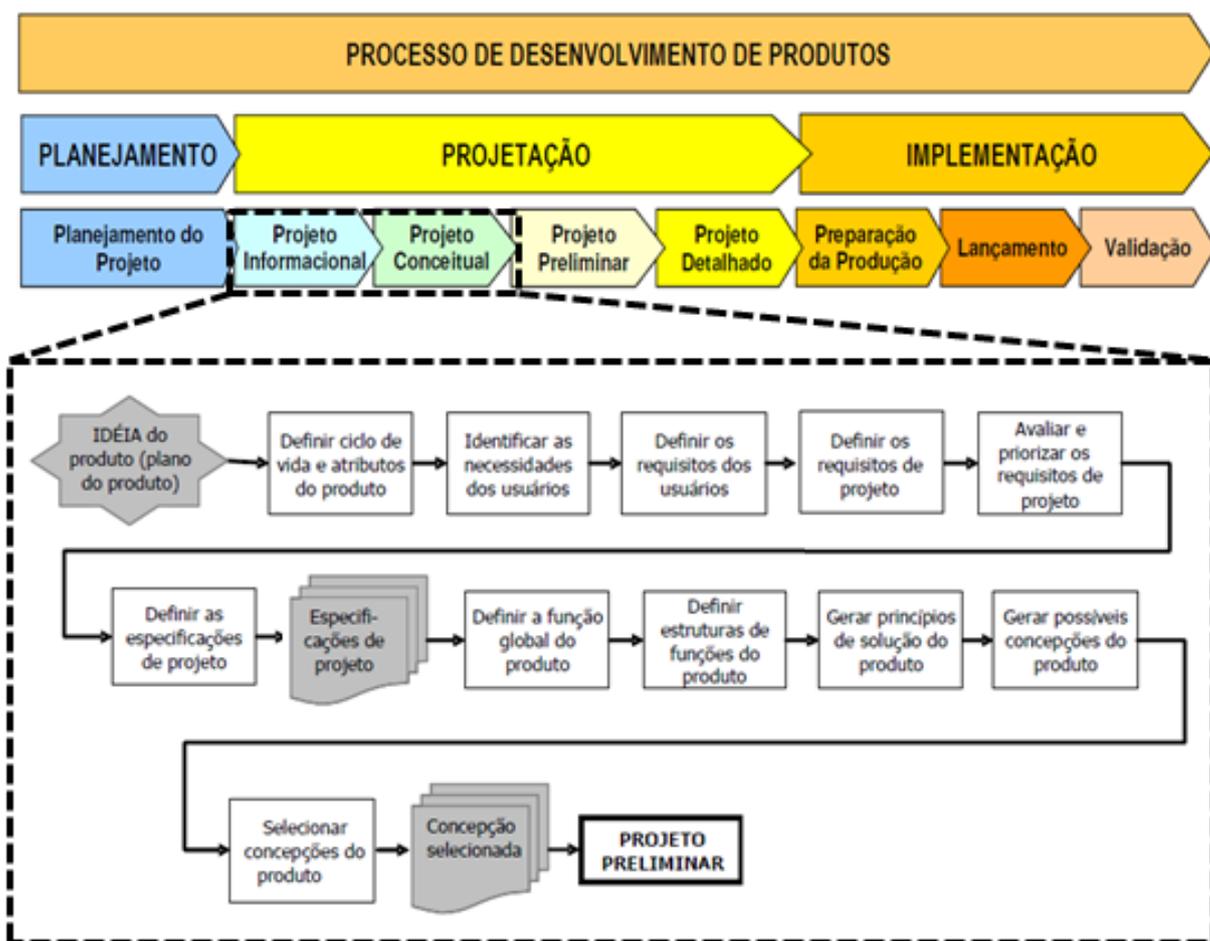


Figura 31 – Etapas de desenvolvimento do projeto baseada na método PRODIP

Fonte: Adaptado (ROMANO, 2003)

Os métodos e ferramentas utilizados para as etapas do projeto informacional e conceitual do desenvolvimento do projeto juntamente com o seus respectivos propósitos são mostrados na Tabela 10.

Macrofase	Etapas	Métodos	Resultado da etapa
Projeto informacional	Ciclo de vida e atributos do produto	Reunião de projeto e brainstorming	Definição do ciclo de vida e principais atributos
	Identificar as necessidades dos usuários	Reuniões de projeto, brainstorming e revisão de material publicado	Identificação dos principais usuários e definição das suas necessidades
	Definir os requisitos dos usuários	Classificação apresentada em (Fonseca, 2000)	Requisitos de usuário
	Definir os requisitos de projeto	Reunião de projeto e brainstorming	Requisitos de projeto e obrigatoriedade
	Avaliar e priorizar os requisitos de projeto	Casa da qualidade do método QFD (<i>Quality Function Deployment</i>)	Ponderação dos requisitos de projeto
	Definir as especificações de projeto	Reunião de projeto	Especificações de projeto

Projeto conceitual	Definir a função global do produto	Síntese funcional	Estabelecer função global de projeto identificando entradas e saídas
	Definir a estrutura de subfunções de produto	Síntese funcional	Estabelecer estrutura de subfunções e suas relações com as grandezas de entrada
	Gerar princípios de solução do produto	Métodos gerais de criatividade (<i>brainstorming</i> , pesquisa de patentes, etc...)	Soluções para as diversas subfunções
	Gerar possíveis concepções do produto	Combinação das soluções através da Matriz morfológica	Definição das possíveis concepções
	Selecionar concepções do produto	Exame “Passa ou Não Passa” e função mérito	Classificação das concepções quanto a adequabilidade à função de projeto

Tabela 10 - Métodos e ferramentas utilizadas no desenvolvimento do projeto

Fonte: Autor, (2016)

1.1 Etapas de desenvolvimento

1.1.1 Ciclo de vida e atributos do produto

Cada classe de produtos tem um ciclo de vida que respeita as suas peculiaridades. Considerando-se automóveis ou eletrodomésticos, por exemplo, além das fases de projeto, o produto passa por etapas de fabricação, montagem, embalagem, distribuição, uso manutenção e por fim desativação e reciclagem (BACK et al., 2008). No caso do conceito proposto o ciclo de vida é mostrado na Figura 32.

A diferença mais significativa entre o ciclo de vida do conceito proposto e das tuneladoras tradicionais é a importância da reciclagem dos principais componentes ao fim do ciclo de utilização.

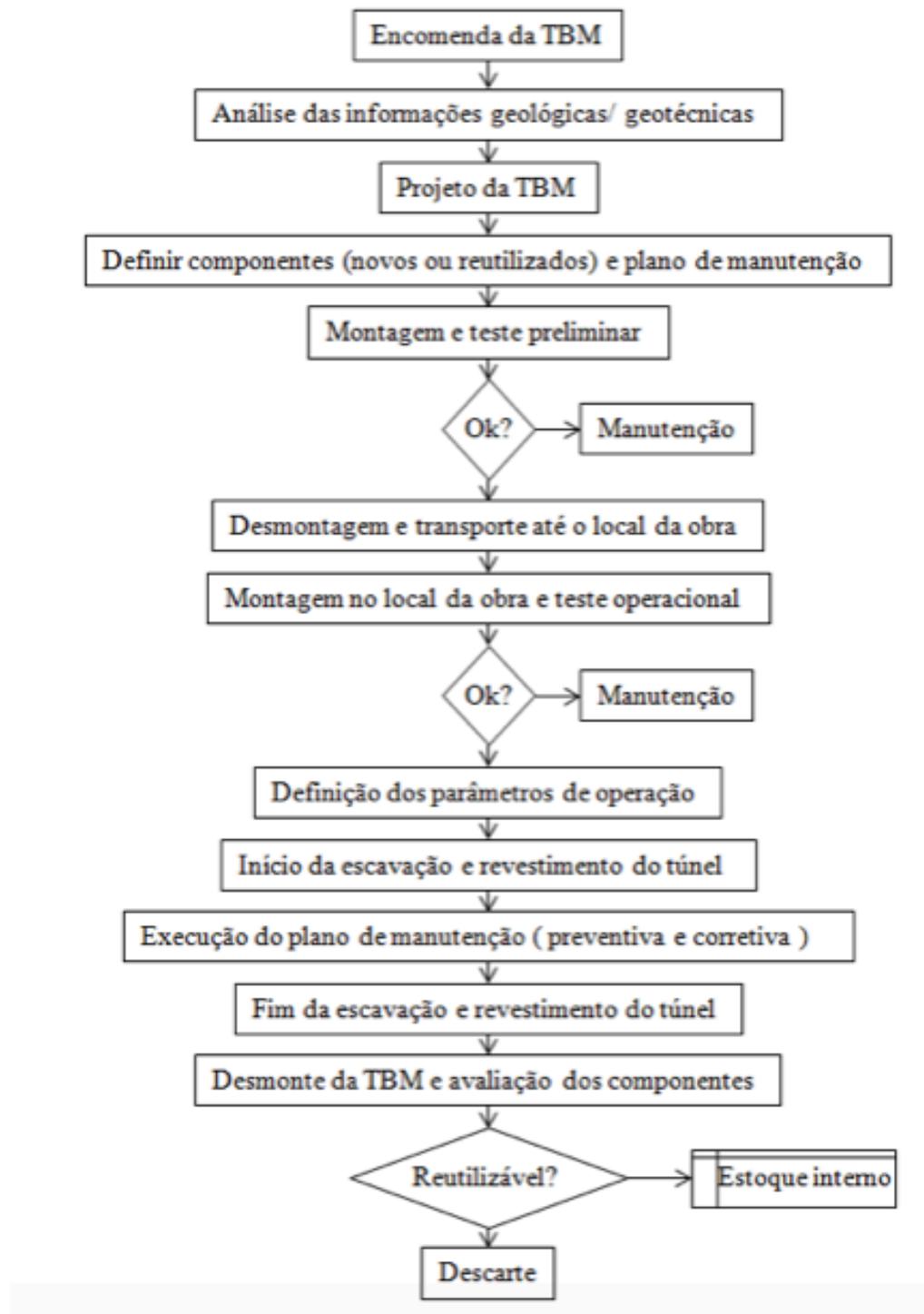


Figura 32 - Ciclo de vida do conceito proposto

Fonte: Autor, (2016)

1.1.2 Necessidades de usuários

Podemos entender usuários como todas as pessoas, órgãos ou instituições que têm interesse, direito de opinar, impor exigências ou expressar necessidades que afetem as características do produto a ser desenvolvido (BACK et al., 2008). Dessa forma identificaram-se os principais interessados que são explicitados na Tabela 11.

#	Usuários identificados
1	Contratante (Quem pagará)
2	Contratada (Quem executará)
3	Cliente final (Quem usará)
4	Sociedade e Meio Ambiente
5	Fabricante

Tabela 11 - Principais interessados

Fonte: Autor, (2016)

Através de pesquisa em materiais publicados em sites e revistas além de sessões de *brainstorming* e reuniões de projeto, as necessidades de usuários foram definidas e são mostradas na tabela 12.

#	Necessidades de usuários
1	Baixo tempo de execução do empreendimento
2	Executar função planejada pelo tempo estipulado
3	Baixo custo de empreendimento
4	Baixo custo de aquisição da tuneladora
5	Baixo custo de manutenção da tuneladora
6	Baixo custo de operação da tuneladora
7	Baixo custo de revestimento
8	Baixo custo das instalações complementares
9	Segurança dos colaboradores
10	Segurança do cliente final
11	Exatidão nas dimensões e trajeto desejados
12	Fácil operação, manutenção e transporte
13	Fácil movimentação dentro da máquina
14	Baixo ruído, vibração e temperatura agradável
15	Reciclar os principais componentes
16	Respeitar fauna e flora
17	Baixo consumo de insumos
18	Baixo nível de emissão de gases
19	Não poluir o lençol freático

Tabela 12 - Necessidades de usuários

Fonte: Autor, (2016)

1.1.3 Requisitos de usuários

Apesar da diversidade dos produtos de forma geral, as necessidades de usuário geralmente podem ser classificadas de diversas formas. Uma dessas classificações é explicitada em FONSECA (2000) sendo esta adotada nesse trabalho.

O resultado da classificação adotada revelou os requisitos de usuário mostrados na tabela divididos em mandatórios (a sua satisfação em nível adequado é obrigatória) ou desejáveis.

#	Requisitos de usuários	Categoria	Peso
1	Funcionabilidade	Mandatário	32
2	Segurança	Mandatário	38
3	Custo	Desejável	22
4	Desempenho	Mandatário	23
5	Confiabilidade	Desejável	22
6	Robustez	Desejável	21
7	Mantenabilidade	Mandatário	19
8	Geometria	Mandatário	30
9	Usabilidade	Desejável	15
10	Transportabilidade	Mandatário	16
11	Ergonomicidade	Desejável	33
12	Conforto ambiental para o trabalho	Desejável	33
13	Impacto ambiental	Mandatário	36
14	Reciclabilidade	Desejável	24

Tabela 13 - Requisitos de usuário e sua classificação quanto a mandatário ou desejável

Fonte: Autor, (2016)

A classificação em mandatário e desejável, entretanto, não satisfaz a necessidade de ponderação da importância de cada requisito de usuário frente aos demais. A ponderação é de grande importância para a correta utilização do método da “casa da qualidade” e foi realizado através do método de comparação “par-a-par”, mostrado na Tabela 14.

No método em questão, foram entrevistados especialistas na área questionando-os sobre a importância cruzada dos requisitos, comparando-se as linha às coluna da tabela 14.. Se o requisito da linha fosse mais importante, o valor designado era +3, caso ambos possuíssem a mesma importância, o valor seria +2 e, por fim, caso o requisito fosse menos importante o valor seria +1. A adição dos valores das linhas representa a importância relativa dos requisitos frente aos demais.

	1. Funcionabilidade	2. Segurança	3. Custo	4. Desempenho	5. Confiabilidade	6. Robustez	7. Manutenibilidade	8. Geometria	9. Usabilidade	10. Transportabilidade	11. Ergonomicidade	12. Conforto ambiental	13. Impacto ambiental	14. Reciclabilidade	Peso relativo
1. Funcionabilidade	3	1	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	1	1	32
2. Segurança	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	38
3. Custo	1	1	3	2	2	2	2	1	3	3	1	1	1	2	22
4. Desempenho	1	1	2	3	2	2	3	1	3	3	1	1	1	2	23
5. Confiabilidade	1	1	2	2	3	2	2	1	3	3	1	1	1	2	22
6. Robustez	1	1	2	2	2	3	2	1	2	3	1	1	1	2	21
7. Manutenibilidade	1	1	2	1	2	2	3	1	2	2	1	1	1	2	19
8. Geometria	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	3	30
9. Usabilidade	1	1	1	1	1	2	2	1	3	1	1	1	1	1	15
10. Transportabilidade	1	1	1	1	1	1	2	1	3	3	1	1	1	1	16
11. Ergonomicidade	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	33
12. Conforto ambiental	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	33
13. Impacto ambiental	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	36
14. Reciclabilidade	3	1	2	2	2	2	2	1	3	3	1	1	1	1	24

Tabela 14 - Ponderação dos requisitos de usuário através do método de comparação par-a-par.

Fonte: Autor, (2016)

1.1.4 Requisitos de projeto

A definição dos requisitos de usuários permite a definição dos requisitos de projeto. Eles nada mais são do que a tradução dos requisitos de usuário para parâmetros de engenharia que possam ser mensurados ou verificados (BACK et al., 2008).

Vários autores têm tentado sistematizar a transformação dos requisitos de usuário em requisitos de projeto, contudo são poucos (e voltados para outros setores industriais) os métodos práticos diretamente aplicáveis a esse fim. De fato, encontra-se mais literatura sobre “o quê” fazer do que “como fazer”. Dessa forma optou-se por reuniões de projeto para definição dos requisitos de projeto e o resultado é mostrado na tabela 15.

#	Requisitos de projeto	Unidade	Mandatário?
1	Normas de segurança e meio ambiente	-	Mandatário
2	Custo de aquisição da tuneladora	R\$/m ² _{Seção}	Desejável
3	Custo por quilometro executado	R \$ / km _{executado}	Desejável
4	Taxa de utilização do equipamento	%	Mandatário

5	Taxa de avanço	m dia _{trabalhado}	/ Mandatário
6	Desvio na execução do perfil	cm	Mandatário
7	Desvio na trajetória	cm	Mandatário
8	Controle automático das principais funções	-	Desejável
9	Peso dos componentes	kg	Mandatário
10	Dimensões dos componentes	cm	Mandatário
11	Reciclar principais componentes	% _{componentes}	Desejável

Tabela 15 - Requisitos de projeto e respectivas unidades

Fonte: Autor, (2016)

1.1.5 Avaliação e priorização dos requisitos de projeto

Segundo BACK et al. (2008), com a definição dos requisitos de projeto, a próxima atividade é a priorização dos mesmos quanto a sua importância frente aos demais. Essa tarefa pode ser realizada com o auxílio da “casa da qualidade” do método QFD (*Quality Function Deployment*).

Inicialmente proposto em AKAO (1990), o QFD é fundamentado na preocupação de que os produtos devem ser projetados para satisfazer desejos, gostos e expectativas de usuários. Ele é composto pelo desdobramento de quatro matrizes, sendo a primeira conhecida como “casa da qualidade”.

Esse método permite à equipe de projeto a documentação das necessidades e requisitos além do processamento sistemático das informações a fim de garantir a ponderação dos requisitos de projeto. A casa da qualidade para o presente desenvolvimento é mostrada na Figura 33.

Na matriz obtida os requisitos de usuário aparecem listados na coluna à esquerda enquanto os requisitos de projeto na linha superior. Na parte central encontram-se os valores que exprimem a correlação entre os requisitos de projeto e usuários.

Para correlações fortes foram designados o valor +9, já para correlações médias os valores designados foram +3. Por fim as correlações fracas receberam +1 e onde foi julgado não haver correlações o valor designado foi zero (representada por um vazio). Para exemplificar, considere-se o requisito de projeto “Normas de segurança e meio ambiente” o qual foi julgado ter uma forte correlação com o requisito de usuário “Segurança”, recebendo o valor +9. Já o requisito de projeto “Desvio na trajetória” e o requisito de usuário “Ergonomia” foram julgados não ter correlação, recebendo zero.

Os símbolos “x”, “seta para cima” e “seta para baixo” indicam respectivamente que aquele requisito deve ser atendido, deve ser maximizado e deve ser minimizado.

Por fim, o peso absoluto de cada requisito de projeto é o produto entre o valor da correlação (+9, +3, +1 ou zero) e o peso relativo do requisito de usuário (ponderados através da comparação par-a-par e sumarizados na coluna mais a direita na tabela). É justamente o peso absoluto que define a ordem de prioridade que os requisitos de

projeto devem ser atendidos.

Necessidades de usuário		Requisitos de projeto													
		x	↕	↕	↕	↕	↕	↕	x	↕	↕	↕			
M	Funcionabilidade	9		3	1	1	9	9	9	1	1				32
M	Segurança	1	9	9	3	9	1				1				38
D	Custo	1	3	3	9	9	1							9	22
D	Desempenho		3	3	9	9								1	23
D	Confiabilidade		3	3	1					1				1	22
D	Robustez		3			1									21
D	Mantabilidade		3	3	1	1				1	3			3	19
M	Geometria		3	1	1	1	9	9		9	9			3	30
D	Usabilidade									9	9			9	15
M	Transportabilidade	1									9			9	16
D	Ergonomia	9								3	3			3	33
M	Conforto ambiental para o trabalho	9	3		3									1	33
M	Impacto ambiental	9	3												36
D	Reciclabilidade		3	3	9	1									24
Peso absoluto		1321	822	606	697	537	580	580	682	374	473	349			
Peso relativo		40%	25%	18%	21%	16%	18%	18%	21%	11%	14%	11%			
Ordem de atuação		1	2	5	3	8	6	7	4	10	9	11			
															Peso relativo

Figura 33 - Casa da qualidade

Fonte: Autor, (2016)

1.1.6 Especificações de projeto

As especificações de projeto são o resultado do processo de transformação das necessidades dos usuários e são considerados como o resultado mais importante do desenvolvimento do produto (BACK et al., 2008). Para o presente desenvolvimento elas são mostradas na tabela 16.

#	Descrição das especificações	Modo de verificação	Critério	Mandatário? (Peso)
1º	Normas de segurança e meio ambiente	Averiguação	NR10, 11, 12,15,16,17, 22,23,33,09	Mandatário (1321)
2º	Custo de aquisição da tuneladora	Análise do custo de fabricação	Inferior US\$ 0,7 milhão/ m ² _{seção}	Desejável (822)
3º	Custo por quilometro executado	Análise do custo de operação	Inferior US\$ 3 milhões/ km _{executado}	Desejável (606)
4º	Taxa de utilização do equipamento	Registro de operação	Superior a 50%	Mandatário (697)
5º	Taxa de avanço	Registro de operação	Superior a 100 m/ dia	Mandatário (537)
6º	Desvio na execução do perfil	Topografia	Inferior a 200 mm	Mandatário (580)
7º	Desvio na trajetória	Topografia	Inferior a 200 mm	Mandatário (580)
8º	Controle automático das principais funções	Manual de operação	Superior a 80%	Desejável (682)
9º	Peso dos componentes	Balança	Inferior a 10 mil kg	Mandatário (374)
10º	Dimensões dos componentes	Trena	Inferior a 15 metros	Mandatário (473)
11º	Reciclar principais componentes	Averiguação	Superior a 50%	Desejável (349)

Tabela 16 - Especificações de projeto, resultado do processamento dos dados

Fonte: Autor, (2016)

1.1.7 Definição da função global e estrutura de funções do produto

Outra etapa bastante importante é a determinação da função global e estrutura de funções de projeto. Ela consiste na definição do processo operacional do equipamento, estabelecendo o fluxo de energia, matéria e informações entre os diversos sistemas. A função global é mostrada na Figura 34.

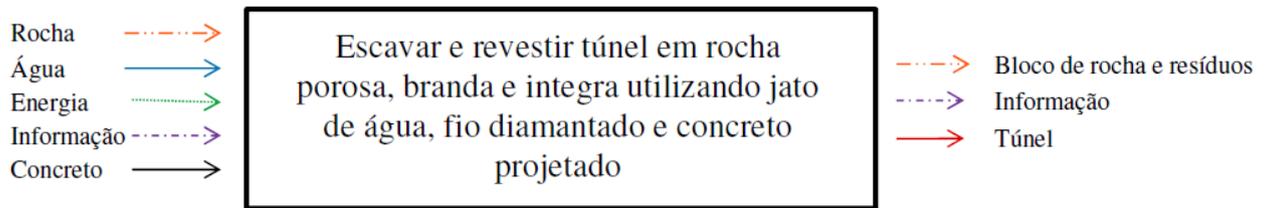


Figura 34 - Função global de projeto

Fonte: Autor, (2016)

Em projetos que envolvem inovações radicais, como no caso desse trabalho, a estrutura de funções e o relacionamento entre elas não são bem estabelecidas. Por isso essa etapa constituiu um dos passos mais desafiantes do desenvolvimento, conforme mostra a Figura 35.

Percebemos que se optou por um ciclo operacional dividido em duas etapas: corte periférico e corte transversal. Como será melhor detalhado adiante, o corte periférico é realizado por hidrodemolição e corresponde a cerca de 20% do volume escavado. Esse processo é realizado no módulo 1 que é o mais próximo da frente de escavação. Por sua vez o corte transversal utiliza fio diamantado para fatiar o núcleo rochoso remanescente em diversos blocos menores. Esses blocos, por sua vez, são cuidadosamente tombados e removidos. Essas atividades são de responsabilidade do módulo 2. Ele fica localizado entre o módulo 1 e o módulo suplementar (também denominado de *backup*). Por fim, o revestimento permanente é realizado por concreto projetado e um sistema de drenagem impede a inundação da frente de corte. Todos os sistemas de alimentação e controle além do estoque dos insumos necessários estão localizados no módulo suplementar.

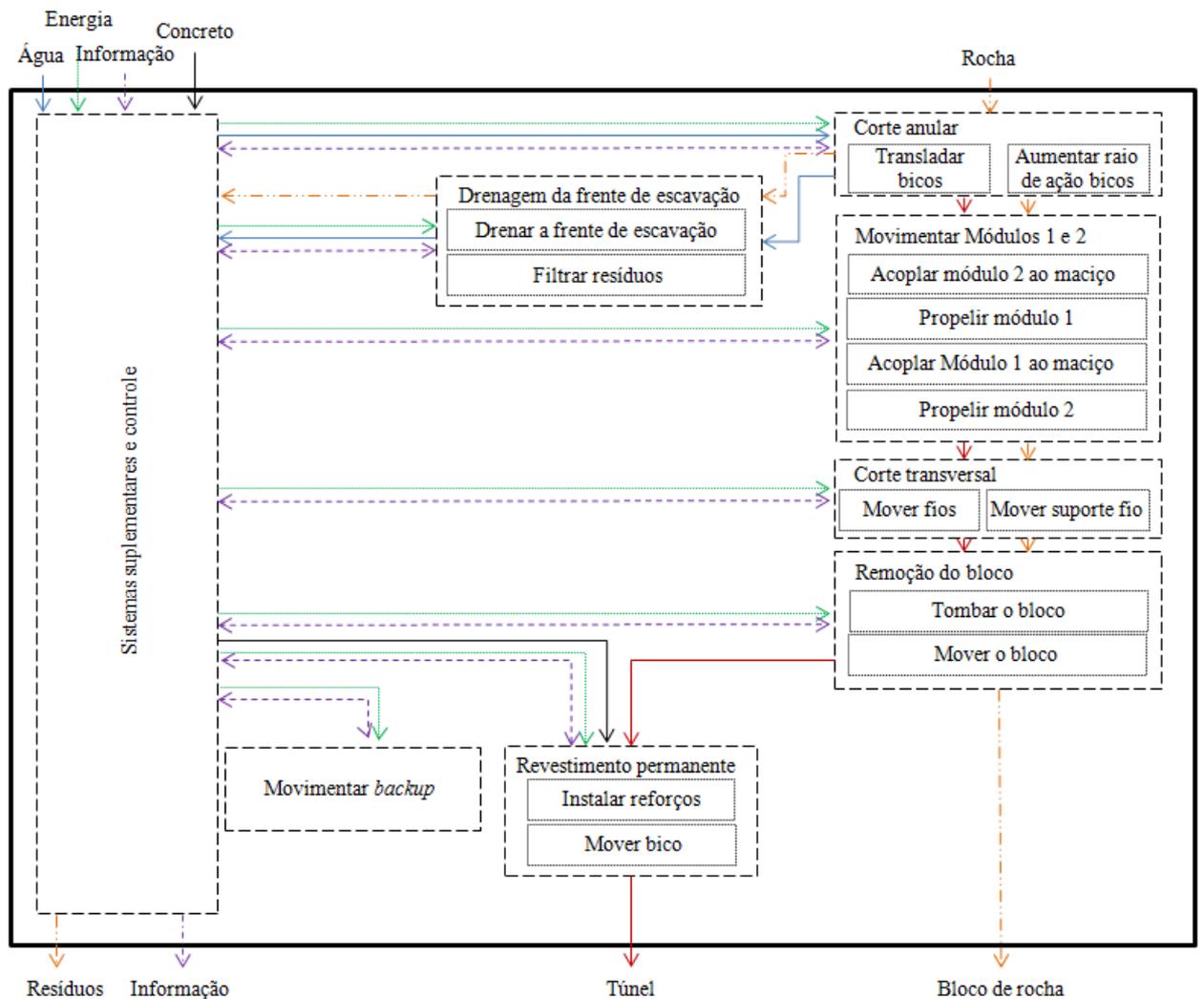


Figura 35- Estrutura de funções.

Fonte: Autor, (2016)

Como visto na Figura 35 todos os sistemas interagem com sistemas complementares e de controle que fornecem e controlam o fluxo de energia, água, concreto e parâmetros necessários além de controlar o avanço da tuneladora.

Uma vez que não há o desmonte total da rocha durante a segunda etapa de corte, o consumo energético desse processo é menor que o processo de escavação das TBMs tradicionais (baseados no desmonte completo da frente de escavação).

1.1.8 Geração de soluções para subfunções

O passo seguinte, a pesquisa por princípios de soluções, foi realizado com o objetivo de encontrar soluções para as funções elementares mapeadas. Diversos métodos de criatividade, intuitivos ou sistemáticos, foram utilizados para conduzir o processo de geração. Os mais produtivos foram: pesquisa em material publicado, análise de sistemas naturais, *benchmarking* e *brainstorming*.

1.1.8.1 Translação dos jatos de água.

O sistema de movimentação dos bicos de jato de água é de grande importância para o funcionamento e desempenho desejados. Ele deve transladar o bico de forma que os principais parâmetros permaneçam na faixa de valores pré-determinados. Dois mecanismos foram considerados como possíveis soluções.

O primeiro mecanismo utiliza o deslocamento de uma barra central para definir o ângulo de abertura do conjunto e, por consequência, definir a posição radial dos bicos. Nesse mecanismo os bicos deslocam-se de maneira conjunta.

Já o segundo mecanismo utiliza roldanas acionadas por motores elétricos para deslocar sobre o flange de uma viga metálica um suporte que contém o conjunto haste/bico. Nessa solução os bicos movimentam-se independentemente. A Figura 36 mostra sistemas reais que utilizam os dois mecanismos propostos.

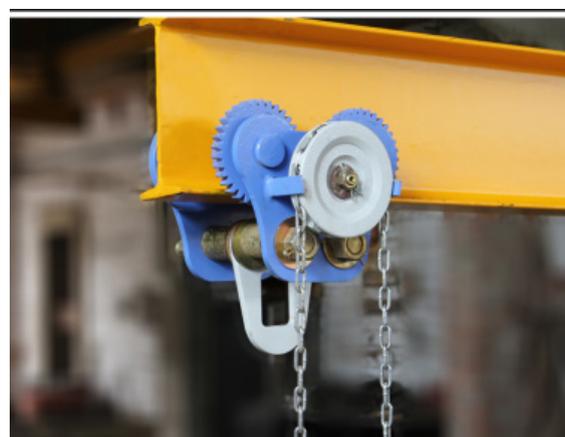


Figura 36 – Sistemas que utilizam o mecanismo de barras articuladas (esquerda) e o mecanismo de roldanas (direita).

Fonte: (STONEAGE COMPANY, 2016) (NK ENGINEERS, 2016)

1.1.8.2 Amplificação do raio de ação dos bicos

Além de mover a haste e o bico, há a necessidade de um mecanismo que permita que 500 mm de rocha sejam cortados pela ação de um jato de 3,5 mm de diâmetro. Dessa forma duas soluções foram sugeridas.

A primeira propõe a utilização de uma haste curvada dotada de rotação e com apenas um bico na extremidade. A segunda solução utiliza princípio diferente. Nesse caso vários bicos seriam posicionados em um carretel giratório que executaria a tarefa. A Figura 37 ilustra ambos os mecanismos.



Figura 37 - Sistemas reais que utilizam hastes curvadas (esquerda) e carretel (direita) para ampliar o raio de ação.

Fonte: (STONEAGE COMPANY, 2016) (WOMA GMBH, 2016)

1.1.8.3 Interação dos módulos com o maciço rochoso

Para realizar a interação entre módulos e maciço rochoso foram sugeridos dois mecanismos. O primeiro é comum em tuneladoras e é composto por sapatas acionadas por cilindros hidráulicos. Nessa solução a interação ocorre quando os cilindros expandem e a sapata pressionada a parede do túnel.

O segundo mecanismo é altamente inovador e composto por colchões hidráulicos posicionados entre a couraça e a parede do túnel. Nesse caso ao inflar os travesseiros a máquina interage com o maciço e o esforço transmitido. A figura 38 mostra sistemas que utilizam os dois princípios.



Figura 38 - Sistemas que utilizam sapatas hidráulicas (esquerda) e colchões hidráulicos (direita)

Fonte: (KABAK, 2014) (SARZI COMÉRCIO EXTERIOR, 2016)

1.1.8.4 Movimentação dos módulos

Com um dos módulos acoplados ao maciço é possível propelir o outro na direção axial. A solução mapeada (Figura 39), amplamente utilizada para diversos fins, é constituída de cilindros hidráulicos de alta capacidade.



Figura 39 – Cilindros hidráulicos utilizados para movimentar TBM.

Fonte: (STONECYPHER; LAMAR, 2011)

1.1.8.5 Movimentação do fio diamantado

O avanço do processo de escavação por hidrodemolição permite que o núcleo rochoso remanescente (parte do maciço rochoso que fica inserido dentro da máquina) seja fatiado em blocos menores. No conceito proposto, esse fatiamento é executado por fio diamantado que exige o deslocamento sobre a superfície da rocha. Para tanto a única solução levantada foi a utilização de motores elétricos devido ao ambiente confinado de trabalho. A Figura 40 exemplifica essa aplicação.



Figura 40 – Sistema de corte de rocha acionado por motor elétrico

Fonte: (CUTTING TECHNOLOGY INC, 2013)

1.1.8.6 Movimentação do suporte dos fios

O fio deve também ser conduzido durante todo o corte. Para isso uma estrutura deve ser capaz de deslocar-se transversalmente ao eixo da tuneladora com força adequada. A única solução que atende aos requisitos e já testada em diversas lavras de rocha é a combinação de fuso e guia mecânica acionada por motores elétricos, conforme mostra a figura 41.



Figura 41 - Sistema real que utiliza o conjunto fuso, guia e acionamento por motor elétrico

Fonte: (BLUEGRASS INC, 2016)

1.1.8.7 Tombamento dos blocos de rocha

O bloco solto do núcleo rochoso remanescente deve ser manipulado para a sua completa remoção. No ciclo operacional proposto (ver figura 35) a primeira atividade do processo é o tombamento. Para essa tarefa surgiram duas soluções.

A solução do “tombador de blocos” é amplamente utilizada em lavras de mármore. Ela é composta de uma plataforma articulada movimentada por um cilindro hidráulico telescópico.

Já segunda solução utiliza colchões hidráulicos para impulsionar e controlar o tombamento. Essa solução apresenta um grau de ineditismo maior. A Figura 42 mostra sistemas reais que utilizam ambos os princípios.



Figura 42- Tombador de blocos (esquerda) e colchão hidráulico sendo utilizado em lavra de mármore (direita)

Fonte: (BERMONTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 2015) (SARZI COMÉRCIO EXTERIOR, 2016)

1.1.8.8 Movimentação dos blocos de rocha

A remoção o bloco por completo pode ocorrer através da utilização de esteiras mecânicas ou vagões sobre trilhos. Ambas as soluções são utilizadas em tuneladoras. A Figura 43 mostra sistemas que utilizam os princípios.



Figura 43 – Esteira transportadora (esquerda) e vagão de remoção (direita).

Fonte: (COSTA, 2016)

1.1.8.9 Instalação de reforços

Caso os maciços não sejam auto-portantes, é necessário instalar estruturas que mantenham a estabilidade do mesmo. Inicialmente a estabilidade é mantida pelas couraças metálicas dos módulos 1 e 2 mas é necessária a execução de medidas que garantam a segurança do empreendimento com o avançar do tempo.

Segundo CHAPMAN et al. (2010) o concreto projetado tem vocação natural para a tarefa de revestimento em túneis de seção não circular. Dessa forma é necessária a instalação de cambotas, tirantes, telas e posterior projeção de concreto nas superfícies do túnel. Para a tarefa foram sugeridas duas soluções: instalação manual ou automatizada. Ambas são utilizadas pela indústria de túneis. A Figura 44 mostra sistemas reais que aplicam o princípio.

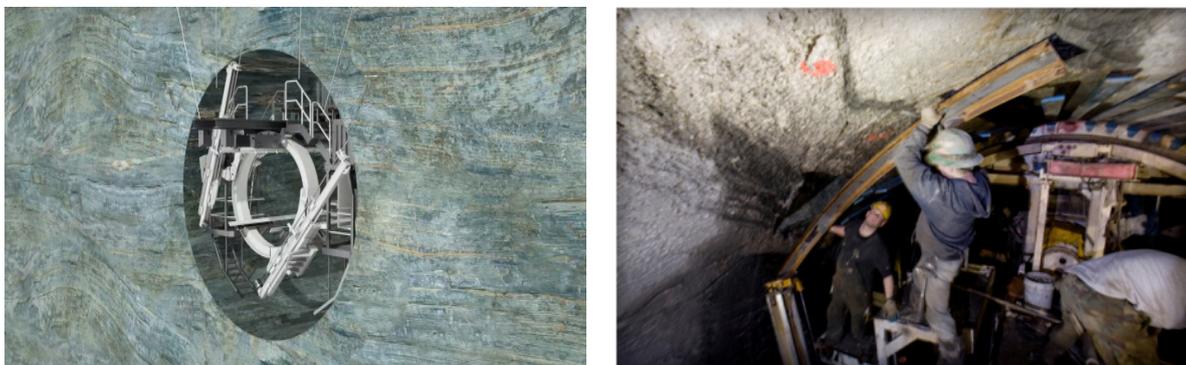


Figura 44 - Sistemas reais que utilizam as soluções propostas para instalação das cambotas, tirantes e telas.

Fonte: (THE ROBBINS COMPANY INC., 2008) (HECKSCHER, 2010)

1.1.8.10 Movimentação dos bicos de projeção de concreto

A tarefa de projeção de concreto exige que o bico acesse todas as paredes do túnel. Manter os parâmetros pré-estabelecidos e garantir que toda a superfície seja revestida é uma necessidade importante.

Para o conceito proposto, as soluções sugeridas consistem em mover o bico manualmente ou através de um sistema automatizado. Como a Figura 45 mostra ambas as soluções são utilizadas na indústria de túneis.



Figura 45 - Sistemas reais que utilizam as soluções propostas para mover o bico de projeção de concreto

Fonte: (THE ROBBINS COMPANY INC., 2008) (NAKAMURA, 2013)

1.1.8.11 Movimentação do módulo suplementar

Como se pretende que o módulo suplementar (*backup*) movimente-se independentemente, ele precisa de uma unidade motriz e um sistema que permita o seu deslizamento.

Para tanto três soluções foram consideradas para o conceito proposto: rodas sobre trilhos acionados por motores elétricos, sapatas articuladas acionadas por cilindros hidráulicos e esteiras rolantes movimentadas por motores elétricos. Como a Figura 46 mostra as duas primeiras soluções são utilizadas nas tuneladoras atuais enquanto a terceira é mais utilizada na movimentação do tanques de guerra e equipamentos pesados de construção ou agrícolas.

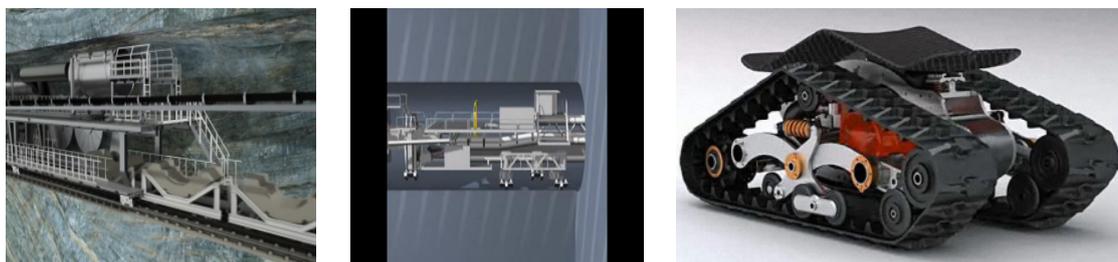


Figura 46 - Sistemas reais que utilizam as soluções propostas para o deslizamento do backup

Fonte: (HERRENKNECHT AG, 2016), (ALPTRANSIT INC, 2016) e (ANONYMOUS, 2016)

1.1.8.12 Drenagem da frente de corte

O processo de hidrodemolição, utilizado para o corte periférico, tem como resultado rocha triturada e grande quantidade de água na frente de escavação. Para que a segurança e o desempenho do processo sejam atingidos, é necessário drenar essa região.

A única solução considerada para essa atividade foi à utilização de bombas de sucção posicionadas na região inferior da tuneladora. Dessa forma a água e os fragmentos de rocha seriam removidos pelas bombas de sucção e levados até o sistema de filtragem de resíduos. A Figura 47 mostra sistemas com esses princípios.



Figura 47 - Sistemas reais que utilizam as soluções propostas para drenagem da frente de escavação

Fonte: (SHIJIAZHANG AN PUMP MACHINERY CO. LTD., 2016)

1.1.8.13 Filtragem dos resíduos

Como a quantidade de água utilizada pela hidrodemolição é bastante significativa (mais de 150 litros por minuto), a logística e o custo ambiental exigem o reaproveitamento de parte ou toda essa quantidade de água.

Entretanto a reintrodução com partículas de dimensões superiores a 10 micrômetros reduz significativamente a vida útil dos bicos de corte. Por isso um sistema que seja capaz de filtrar uma grande quantidade de água em níveis aceitáveis é de grande importância. Para tal a solução sugerida é a combinação de peneira vibratória com filtro de areia ou filtro de pano, mostrados na Figura 48.

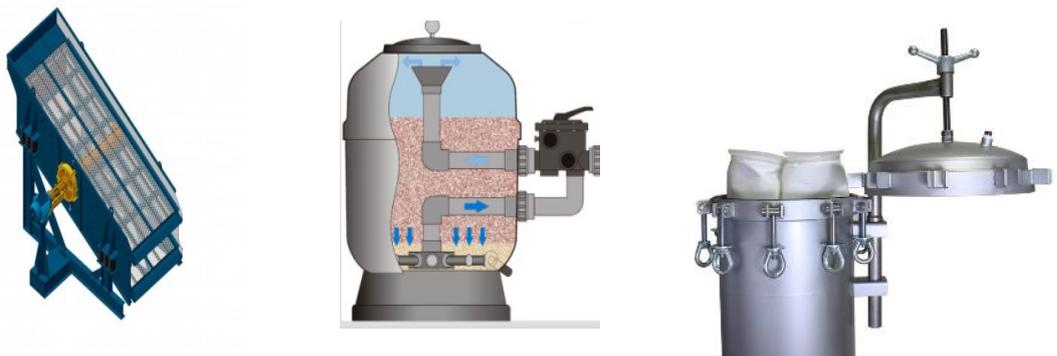


Figura 48 - Sistemas reais que utilizam as soluções propostas para filtrar resíduos

Fonte: (IMIC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 2016), (PISCINAS PLANALTO LTDA, 2016) e (G. M. AUTOFLOW INC, 2016)

1.1.9 Geração e seleção das concepções

As soluções mapeadas para cada subfunção foram organizadas em uma estrutura denominada matriz morfológica, mostrada na tabela 17. As soluções mapeadas, antes de compor as concepções que passarão pelo processo de seleção, foram sujeitas a um processo de triagem pelo exame “passa ou não passa”. Esse exame foi realizado

utilizando como critérios os requisitos de projeto considerados obrigatórios como mostra a tabela 18.

Esse exame foi realizado pela equipe de projeto de maneira qualitativa e elimina as soluções, que apesar de serem viáveis isoladamente, quando analisadas em relação à aplicação ou aos demais sistemas não tiveram desempenho satisfatório.

Função	Subfunção	Solução A	Solução B	Solução C
Corte Periférico	Transladar o bico	Mecanismo de barras	Mecanismo de roldanas e viga "I"	
	Amplificar raio de ação	Haste curvada	Carretel de bicos	
Movimentar módulos 1 e 2	Acoplar módulo 2 ao maciço	Sapata hidráulica	Colchão hidráulico de acoplamento	
	Propelir módulo 1	Cilindro hidráulico		
	Acoplar o módulo 1 ao maciço	Sapata hidráulica	Colchão hidráulico de acoplamento	
	Propelir o módulo 2	Cilindro hidráulico		
Corte transversal	Mover os fios	Motor elétrico		
	Mover suporte dos fios	Fuso + guia + motor elétrico		
Remoção do bloco	Tombar o bloco	Colchão hidráulico	Plataforma + cilindro hidráulico	
	Mover o bloco	Esteira transportadora	Vagão transportador	
Revestimento permanente	Instalar reforços	Manual	Robô	
	Mover bicos	Manual	Robô	
Movimentar <i>backup</i>	Movimentar <i>backup</i>	Esteira	Rodas	Sapatas articuladas
Drenagem	Drenar a frente de escavação	Bomba de sucção		
	Filtrar resíduos	Peneira vibratória + filtro de areia	Peneira vibratória + filtro de pano	

Tabela 17 - Matriz morfológica

Fonte: Autor, (2016)

w

	Normas de segurança	Taxa de utilização	Taxa de avanço	Desvio do perfil	Desvio da trajetória	Peso dos componentes	Dimensões componentes
Mecanismo de barras	P	P	P	P	P	P	P
Mecanismo de roldanas	P	P	P	P	P	P	P
Haste curvada	P	P	P	P	P	P	P
Carretel	P	NP	P	P	P	P	P
Sapata hidráulica	P	P	P	P	P	P	P
Colchão hidráulico (acoplamento)	P	NP	NP	P	NP	P	P
Cilindro hidráulico	P	P	P	P	P	P	P
Motor elétrico	P	P	P	P	P	P	P
Fuso+Guia+Motor elétrico	P	P	P	P	P	P	P
Colchão hidráulico (Tombamento)	NP	P	P	P	P	P	P
Plataforma+Cilindro hidráulico	P	P	P	P	P	P	P
Esteira transportadora	P	P	P	P	P	P	P
Vagão transportador	P	P	P	P	P	P	P
Instalação manual dos reforços	NP	P	P	P	P	P	P
Instalação mecânica dos bicos	P	P	P	P	P	P	P
Movimentação manual dos bicos	P	P	P	P	P	P	P
Movimentação mecânica dos bicos	P	P	P	P	P	P	P
Esteira de movimentação	P	P	P	P	P	P	P
Rodas	P	P	P	P	P	P	P
Sapatas articuladas	P	P	P	P	P	P	P
Bomba de sucção	P	P	P	P	P	P	P
Peneira vibratória + filtro de areia	P	P	P	P	P	P	P
Peneira vibratória + filtro de pano	P	P	P	P	P	P	P

Tabela 18 - Exame “Passa ou Não Passa” nas soluções mapeadas

Fonte: Autor (2016)

Da mesma forma que a “instalação manual dos reforços” foi descartada por não atender as normas de segurança, a utilização de “balões hidráulicos” para acoplamento entre módulos e maciço e tombamento do bloco rochoso foi considerada perigosa para ser executado em ambiente confinado.

Enquanto que a utilização do “carretel” de bicos foi considerada inadequada por apresentar partes móveis que trancam em presença de partículas demasiadamente grandes. Isso acarretaria em uma taxa de utilização inadequada. No total foram geradas noventa e seis concepções que satisfazem a função de projeto.

A seleção da concepção mais adequada, por sua vez, é um processo de tomada de decisão muito importante no desenvolvimento do produto. As informações sobre as soluções adotadas, contudo, ainda são bastante incipientes e a adoção de um método de seleção sistematizado é muito importante para garantir que a melhor ou a mais adequada concepção seja escolhida. (BACK et al., 2008)

No desenvolvimento proposto por este trabalho, o processo aconteceu em duas etapas. Na primeira a triagem das soluções viáveis foi realizada por um exame “passa ou não passa” (Tabela 8) e na segunda as concepções geradas foram ordenadas quanto a sua adequabilidade tendo em vistas os requisitos de projeto e seus relativos pesos. Esse ordenamento utilizou o coeficiente de ordenamento, I , que pode ser definido como o somatório do produto entre o peso relativo do requisito, P_i , e o grau de satisfação da concepção, S_i , como mostra a equação 11.

$$I = \sum_{i=1}^{i=15} (P_i \cdot S_i) \quad \text{Equação 11}$$

A tabela 19 traz o valor “I” calculado para todas as concepções. A concepção julgada mais adequada é a concepção número setenta e dois que é composta pelas soluções de “mecanismo de roldanas” e “haste curvada” para a realização do corte periférico. Já para a movimentação da tuneladora foram selecionadas as soluções de “sapata hidráulica” e “cilindro hidráulico”. Já o corte transversal e o tombamento do bloco utilizaram as soluções de “motor elétrico”, “conjunto fuso/guia/motor elétrico” e “plataforma articulada”.

Por fim a remoção do bloco, reforço do maciço, movimentação do backup e drenagem da frente de corte utilizou as soluções de “vagão transportador”, “instalação dos reforços no maciço mecanicamente”, “movimentação do bico de projeção de concreto manualmente”, “rodas”, “drenagem da frente de corte por bomba de sucção” e “peneira vibratória associada a um filtro de pano” respectivamente.

#	I, []	#	I, []	#	I, []	#	I, []
C1	49.234	C25	51.919	C49	50.618	C73	53.303
C2	51.702	C26	54.387	C50	53.086	C74	55.771
C3	51.748	C27	54.433	C51	53.132	C75	55.817
C4	53.236	C28	55.921	C52	54.620	C76	57.305
C5	54.408	C29	57.093	C53	55.792	C77	58.477
C6	56.876	C30	59.561	C54	58.260	C78	60.945
C7	56.922	C31	59.607	C55	58.306	C79	60.991

C8	60.370	C32	63.055	C56	61.754	C80	64.439
C9	47.759	C33	50.488	C57	49.143	C81	51.872
C10	50.227	C34	52.956	C58	51.611	C82	54.340
C11	50.273	C35	53.002	C59	51.657	C83	54.386
C12	51.761	C36	54.490	C60	53.145	C84	55.874
C13	52.933	C37	55.662	C61	54.317	C85	57.046
C14	55.401	C38	58.130	C62	56.785	C86	59.514
C15	55.447	C39	58.176	C63	56.831	C87	59.560
C16	58.895	C40	61.624	C64	60.279	C88	63.008
C17	53.394	C41	49.013	C65	54.778	C89	50.397
C18	55.862	C42	51.481	C66	57.246	C90	52.865
C19	55.908	C43	51.527	C67	57.292	C91	52.911
C20	57.396	C44	53.015	C68	58.780	C92	54.399
C21	58.568	C45	54.187	C69	59.952	C93	55.571
C22	61.036	C46	56.655	C70	62.420	C94	58.039
C23	61.082	C47	56.701	C71	62.466	C95	58.085
C24	64.530	C48	60.622	C72	65.914	C96	61.533

Tabela 19 - Ordenamento das 96 soluções quanto a adequabilidade aos requisitos de projeto.

Fonte: Autor, (2016)

1.2 Síntese do capítulo

Reconhece-se que as decisões tomadas no início do processo de desenvolvimento tem papel fundamental na manufatura e custos do produto. Por isso a adoção de um processo de desenvolvimento que minimize decisões empíricas ou por tentativa e erro é muito importante. Dentre esses métodos destaca-se o PRODIP (Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto) que sintetiza as pesquisas realizadas pelo NEDIP (Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos) da UFSC.

Esse método é dividido em oito etapas distribuídas em três macrofases: Planejamento, Projetação e Implementação. Enquanto as macrofases de Planejamento e Implementação se preocupam com os processos de planejamento e inserção do produto no mercado respectivamente, a macrofase de projetação (em especial as fases de Projeto Informacional e Conceitual) preocupa-se com o desenvolvimento de requisitos e conceitos, que são os objetivos dessa tese.

Na fase de Projeto Informacional foram executadas seis etapas: definição do ciclo de vida do produto, identificação das necessidades de usuários, definição dos requisitos dos usuários, definição dos requisitos de projeto, avaliação e priorização dos requisitos de projeto e, por fim, definição das especificações de projeto. O resultado mais importante dessa fase é a definição das especificações de projeto que conduziu o processo de seleção das concepções geradas.

Já na fase de Projeto Conceitual as etapas executadas foram cinco: definição da função global do produto, definição da estrutura de subfunções do produto, geração do princípio de soluções do produto, geração das possíveis concepções do produto e seleção das concepções do produto.

1.1 Conceito proposto

Conforme discutido na sessão anterior, o processo de desenvolvimento do conceito proposto para uma nova tuneladora culminou na definição da concepção 72 como a alternativa mais adequada. Para uma melhor análise e determinação da integração entre as diversas soluções, a concepção selecionada foi modelada tridimensionalmente e é mostrada a figura 49.

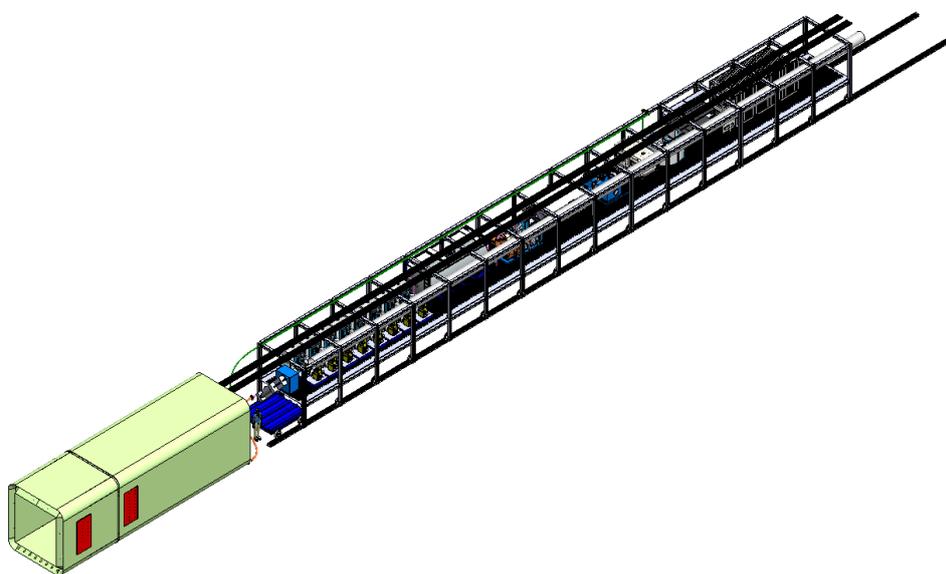


Figura 49 – Visão geral da Tuneladora proposta

Fonte: Autor, (2016)

As principais dimensões foram definidas a partir de algumas das aplicações típicas de tuneladoras para rocha como túneis rodoviários e ferroviários. No caso o equipamento tem uma seção transversal quadrada de 4 metros, com raio de arredondamento dos cantos de 500 mm, e comprimento total de 114,76 metros, conforme mostra a 51.

Conforme esquematizado na estrutura de subfunção (figura 35), a primeira etapa de funcionamento é a realização do corte axial seguido pelo avanço e corte transversal do núcleo rochoso remanescente. Essas etapas são mostradas na figura 50.

Percebemos pela análise da Figura e 51 que a tuneladora foi dividida em três módulos: módulo de corte axial (módulo “1”), de corte transversal e tombamento (módulo “2”) e suplementar (modulo “3”). Cada um medindo 4, 11 e 99,76 metros de comprimento respectivamente.

Vale citar ainda que entre o módulo “2” e “3” não há uma ligação rígida, apenas

tubos flexíveis que conduzem o fluxo dos insumos e resíduos do ciclo de funcionamento. Dessa forma os módulos “1” e “2” movimentam-se independentemente do “3” além de criar um espaço importante para as tarefas de reforço e revestimento estrutural do túnel.

Entre todos os componentes o maior é a couraça metálica do módulo “2” com 11,00 metros de comprimento. Vale citar também que a estrutura do módulo “3” é formada por 144 vigas de perfil “I” com comprimento variando de (3 – 3,75)m que podem ser montadas no local da obra. Isso facilita a logística de transporte dos componentes da fábrica para o local da obra.

Desconsiderando o peso dos insumos (água, cimento, fluido hidráulico, etc.) e adotando os principais componentes fabricados em aço carbono SAE 1020, estimasse que o peso aproximado da tuneladora seja de 44,94 toneladas (bastante leve se compara as dezenas de toneladas de uma TBM tradicional).

a)

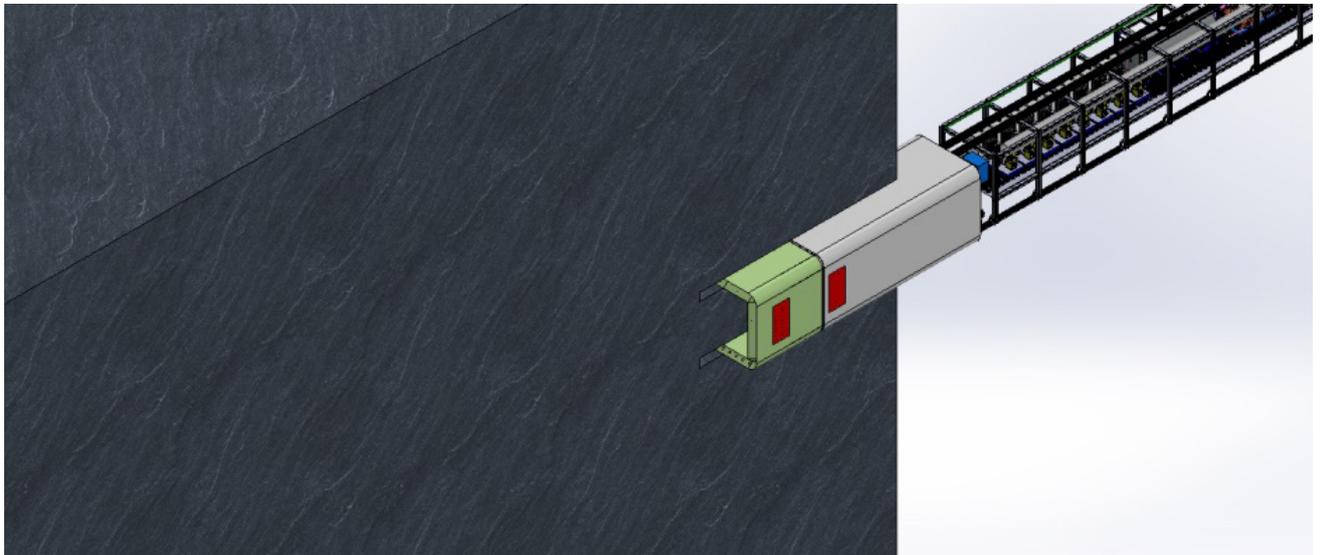


Figura 50 - Corte axial e transversal

b)

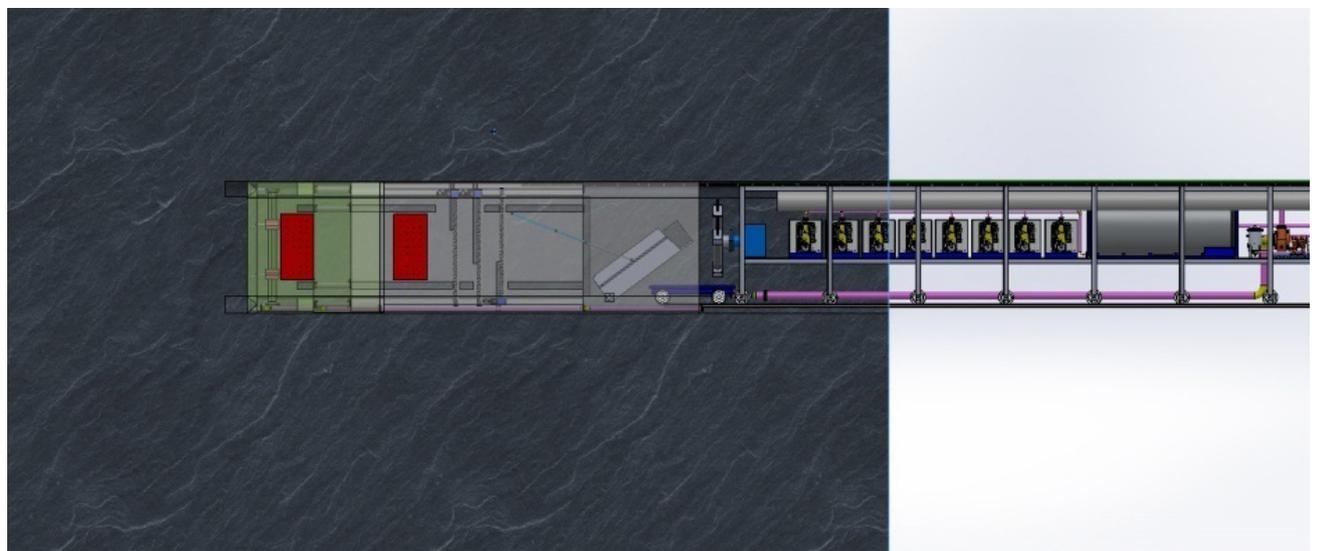
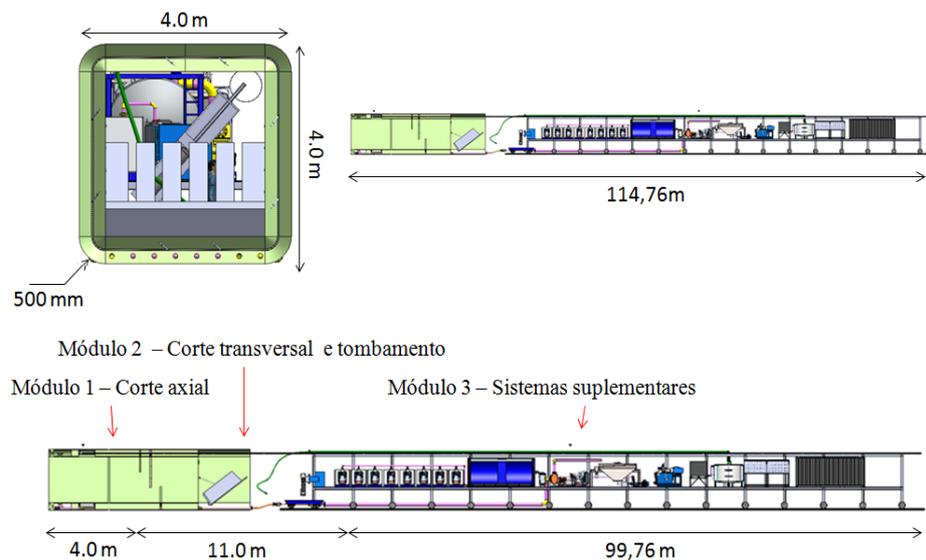


Figura 51 - Dimensões principais da tuneladora proposta.

O módulo de corte axial, além de ser o mais importante, é o que concentra a maior parte das inovações (corte com HD e FD combinados e seção não circular). Tendo como principal função executar um corte periférico de 500 mm no maciço rochoso, ele é composto por uma couraça metálica, sistema de movimentação e ampliação do raio de ação dos bicos de hidrodemolição, anel de vedação e partes dos sistemas de movimentação e drenagem, como mostra a Figura 52.

Destaque deve ser dado ao sistema de movimentação e ampliação do raio de ação do bico de HD. Como mostra a Figura 53 esse sistema faz uso de quatro roldanas que envolvem o flange de uma viga “T” soldada na parede interna da couraça. Essas roldanas, acionadas por quatro motores de passo, movimentam o “carro” que suporta a haste na qual o bico é fixado.



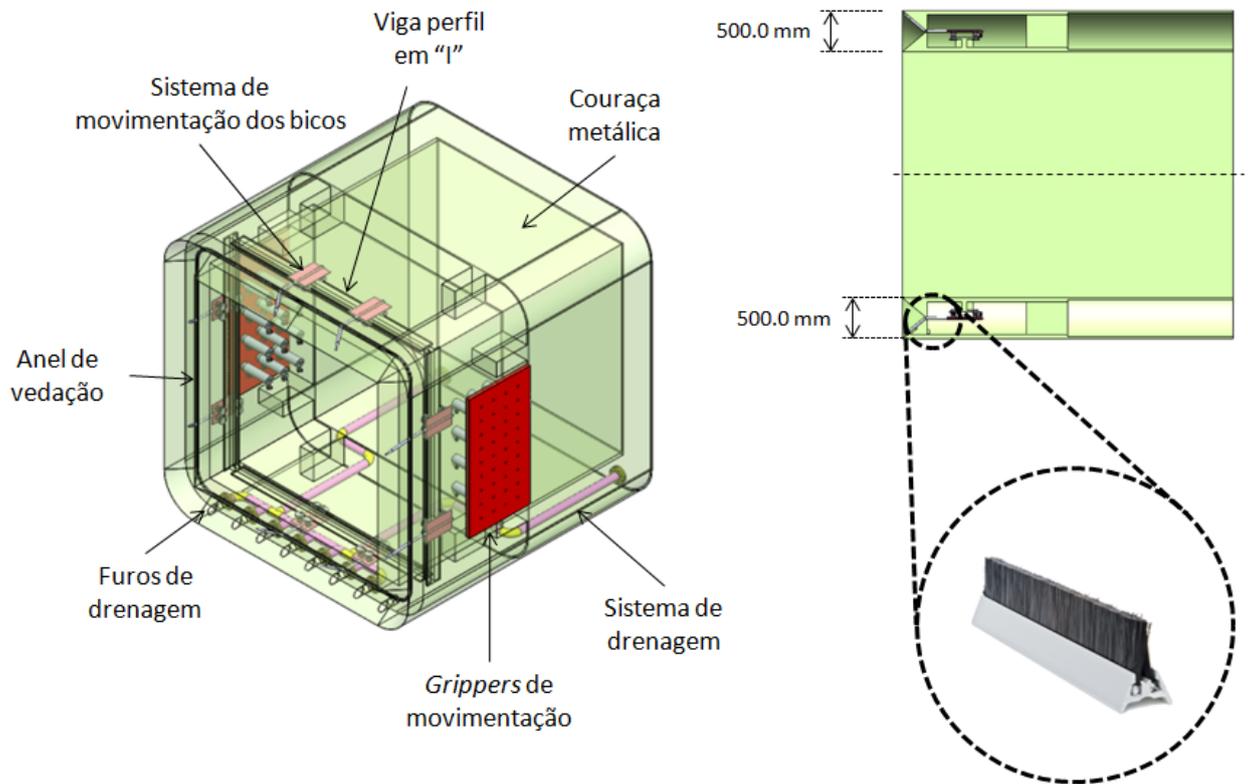


Figura 52 - Módulo corte axial

Fonte: Autor, (2016)

Essa haste, por sua vez, também é dotada de movimento de rotação acionado por um quinto motor de passo localizado na parte traseira do sistema. Esse mecanismo permite o corte dos 500 mm com um bico de apenas alguns milímetros.

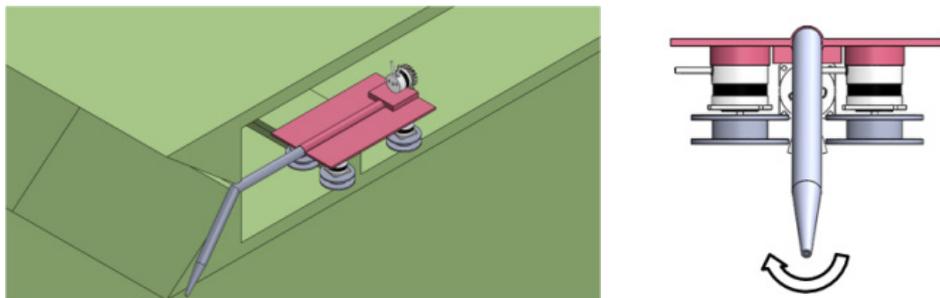


Figura 53 - Sistema de movimentação e ampliação do raio de ação do bico de hidrodemolição.

Fonte: Autor, (2016)

Para o caso da tuneladora do presente desenvolvimento com seção quadrada de quadro metros ao total são oito “carros” que suportam oito bicos, representando 45,5% do material removido.

Outro ponto que vale ser citado é a necessidade de um anel de vedação que permite a movimentação das hastes, mas impeça o retorno da água e dos detritos ao equipamento. Isso foi obtido com a utilização de um conjunto de escovas retentoras posicionadas na abertura frontal do módulo “1”.

O sistema de drenagem (Figura 54) também tem características inovadoras. Ele

usa um circuito de dutos e duas bombas de alta potência para sugar as centenas de litros de água e dezenas de quilos de cascalhos provenientes do processo de desmonte do maciço. Como mostra a figura a mistura de água e detritos é encaminhada para um sistema de peneira vibratória que separa o particulado maior que 0,10 mm. O restante é então encaminhado para filtros de pano que são responsáveis por remover o particulado entre (0,01- 0,10) mm. Por fim a água, em condições de ser reintroduzida ao ciclo, é bombeada para o tanque que alimenta as bombas de HD.

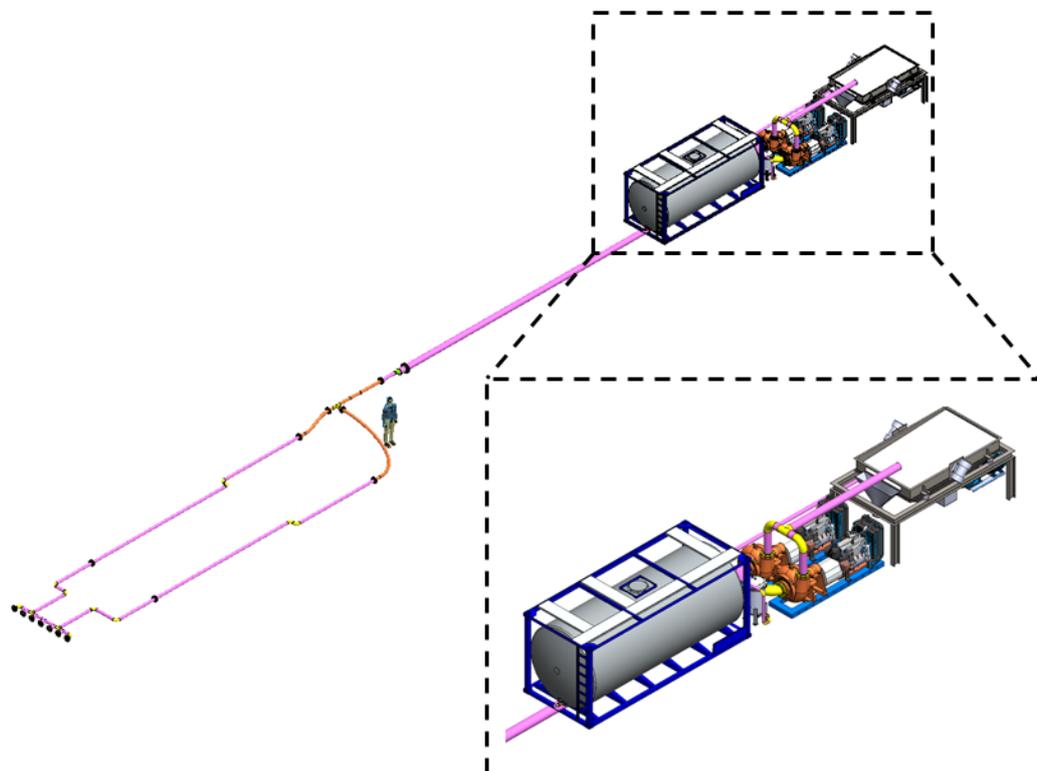


Figura 54 - Sistema de drenagem e separação

Fonte: Autor, (2016)

A movimentação, por sua vez, utiliza dois pares de sapatas acionadas por cilindros hidráulicos. Cada par de sapatas é acionado em um ordem específica e, com o auxílio de 4 cilindros de duplo ação posicionados entre os módulos axial e transversal, permitem a movimentação da máquina semelhante a uma minhoca. O ciclo de movimentação segue as seguintes etapas.

1. Expansão dos cilindros e acoplamento do módulo de corte transversal ao maciço rochoso;
2. Expansão dos cilindros de dupla ação entre módulos e avanço do módulo de corte axial;
3. Expansão dos cilindros e acoplamento do módulo de corte axial ao maciço rochoso;
4. Retração dos cilindros e desacoplamento do módulo de corte transversal ao maciço;

5. Retração dos cilindros de dupla ação entre módulos e avanço do módulo de corte transversal;
6. Retração dos cilindros e desacoplamento do módulo de corte axial ao maciço.

Os dois conjuntos, cada um com 2 m de altura por 1 m de largura, exercem 720 kN (2 x 360) nas paredes laterais do túnel permitindo o acoplamento entre a máquina e o maciço.

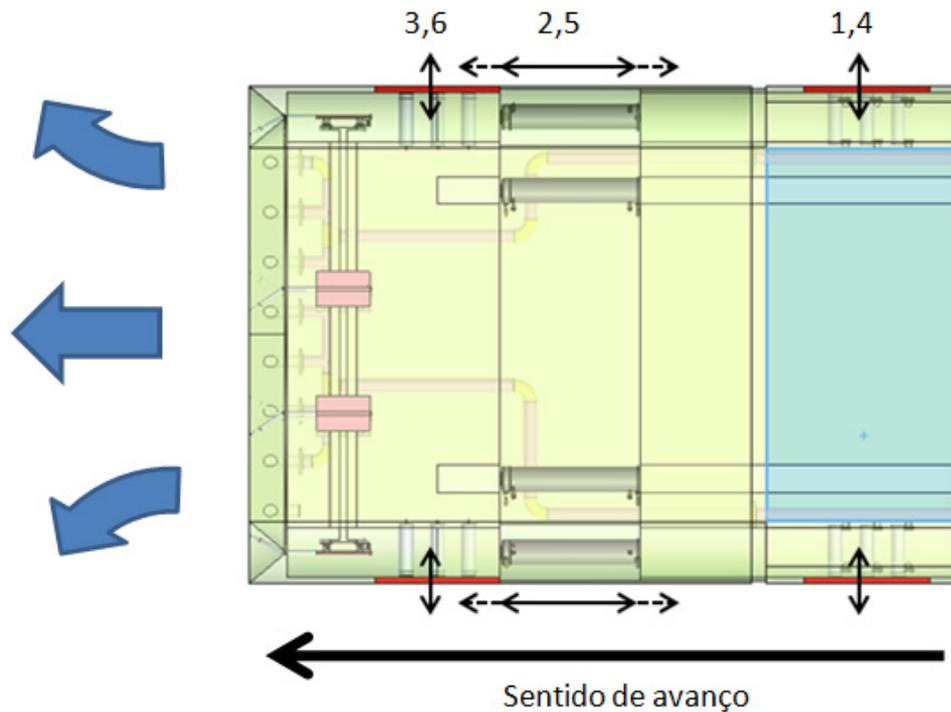


Figura 55 - Seqüência de operação do sistema de movimentação da tuneladora

Fonte: Autor, (2016)

O resultado do processo executados no módulo de corte axial é o surgimento do núcleo rochoso remanescente que nada mais é do que a porção de rocha dentro da máquina ainda ligada ao maciço. A separação sistemática desse núcleo rochoso é feita de forma controlada pelo módulo de corte transversal ou módulo “2”.

Basicamente, o módulo “2” é composto por uma couraça metálica, por partes dos sistemas de remoção e movimentação, pelo sistema de corte transversal além do sistema de tombamento, todos mostrados na figura 56.

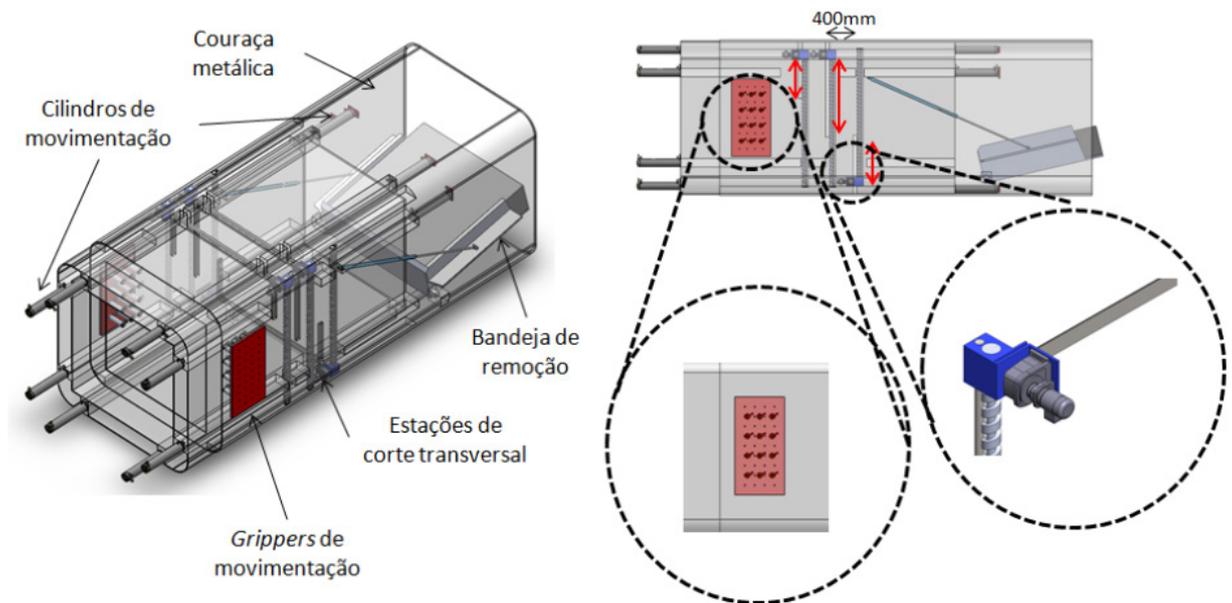


Figura 56 - Módulo de corte transversal e tombamento

Fonte: Autor, (2016)

O sistema de corte transversal é formado por três traves separadas por 750 mm. A ideia é que o primeiro terço da seção transversal seja cortada no primeiro estágio, o segundo terço no segundo e o restante no terceiro estágio. Dessa forma o processo o processo de corte por fio diamantado, que poderia ser um gargalho, tem o seu desempenho maximizado.

As traves foram dimensionadas para desempenhar o corte transversal de forma compatível com a taxa de avanço desejada para a tuneladora proposta. Mais especificamente, os postes das traves são formados por uma guia e um fuso, ambos com comprimento de 3.530 mm. Enquanto o fuso é acoplado a um mancal e acionada por um motor elétrico.

A travessa, por sua vez, tem uma pequena ranhura na região central na qual corre o fio diamantado, componente que efetivamente corta a rocha. Esse laço de fio, contudo, não se desloca sozinho. Ele é acionado por um motor elétrico acoplado ao carro, subindo e descendo com o avançar do processo de corte.

Por último, mas não menos importante, está o sistema de tombamento dos blocos rochosos (destacados do núcleo rochoso remanescente). Tal sistema é composto por uma “bacia” ranhurada e articulada na sua região inferior. Com 3 m de altura e largura e 0,75 m de comprimento comporta um bloco rochoso por vez. Ela também possui dois pequenos ressaltos (um de cada lado) que permitem a perfeita conexão com dois cilindros, como mostra a figura 57. Controladamente, então, os blocos rochosos são tombados sobre um vagão com ressaltos que se encaixam nas ranhuras da bacia, transferindo o bloco da “bacia” para o vagão.

Após o corte transversal, o vagão remove os blocos por debaixo do módulo suplementar e permite que as medidas de reforço estrutural do túnel sejam executadas, caso necessário. Essas medidas podem ser desde a instalação de tirantes e cambotas

ou até mesmo telas de reforço para posterior revestimento com concreto projetado. Todas essas atividades podem ser executadas no espaço entre o módulo “2” e “3” manualmente ou através de dispositivos especialmente projetados, como é o caso da instalação de tirantes.

Relativo à projeção de concreto há um sistema específico para misturar e bombear a pasta cimentícia para o local de utilização. Ele é composto de reservatórios de água e aditivos, misturador e bomba de pistão adaptada para a utilização na tuneladora proposta

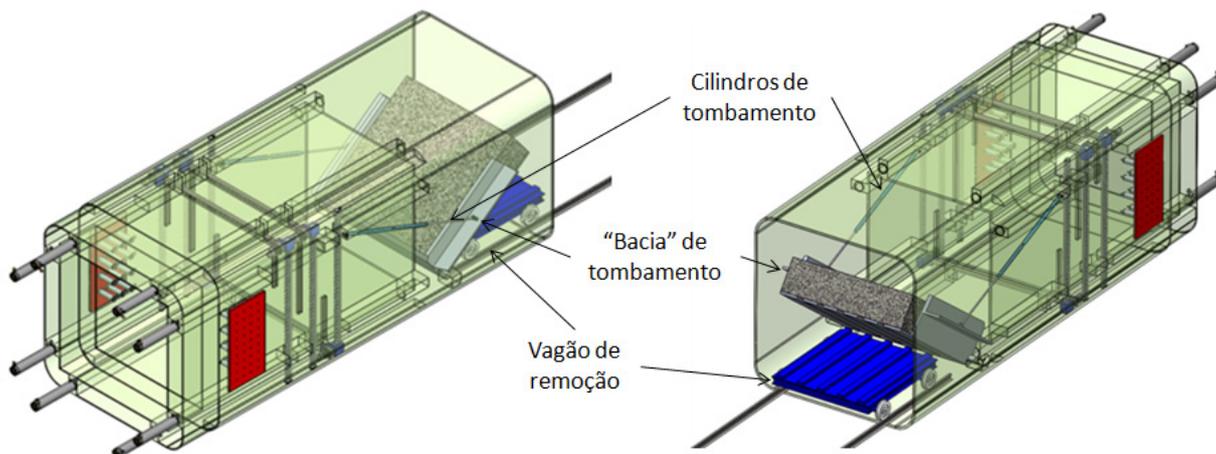


Figura 57 - Tombamento e transferência do bloco.

Fonte: Autor, (2016)

Por fim o módulo de sistemas suplementares armazena e fornece a maioria dos insumos e equipamentos necessários para as atividades descritas. É nele também que fica localizada a cabine de comando no qual é possível gerenciar todas as atividades.

Da mesma forma que o vagão de remoção o módulo suplementar movimentar-se sobre trilhos sendo acionado por motores elétricos de grande potência. Apesar do tamanho ele é bastante compacto quando comparado com o *backup* das tradicionais TBMs. A distribuição espacial dos equipamentos do módulo suplementar é mostrada na figura 58. O arranjo proposto permite a alocação de todos os equipamentos necessários deixando espaço livre para a movimentação de pessoas, insumos e dos blocos.

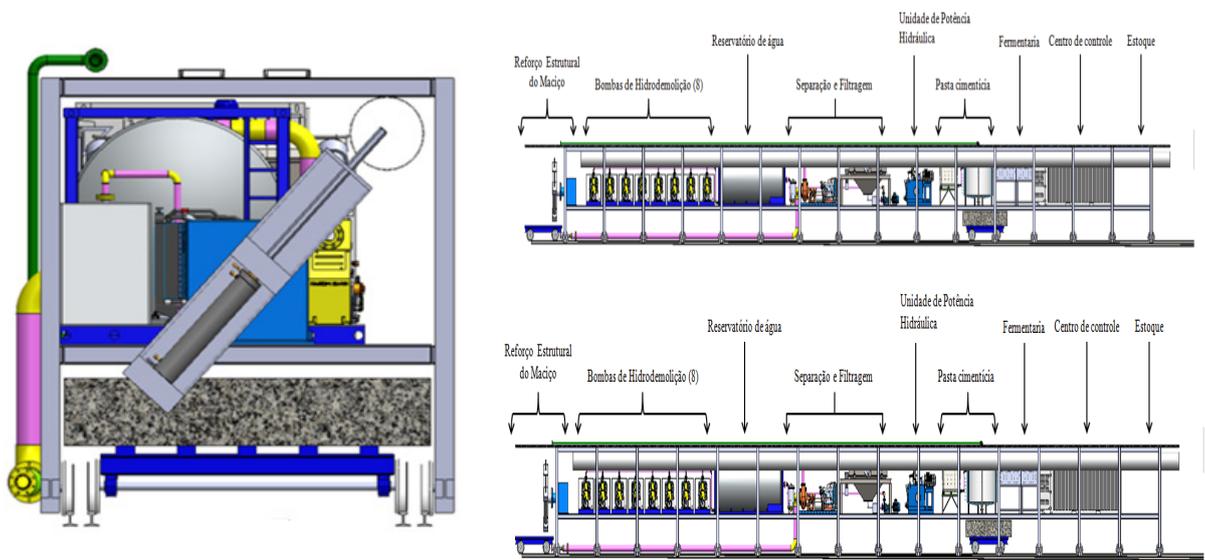


Figura 58 - Distribuição espacial dos equipamentos alocados no módulo suplementar

Fonte: Autor, (2016)

1.2 Análise de desempenho

O desempenho de uma tuneladora em ação é fator decisivo na qualidade e custo final do empreendimento (FARROKH et al., 2012). Além disso, escolhas inadequadas podem colocar vidas, equipamentos e até a saúde financeira da empresa executora em risco. Por isso a determinação e análise do desempenho de tais equipamentos nos estágios preliminares das obras são tão importantes. Para isso há diversos métodos disponíveis de predição de desempenho para tuneladoras com disco de corte.

Entretanto outra aplicação para esses métodos é a comparação entre os diversos métodos construtivos. Um exemplo pode ser encontrado em ZARE, S. et al. (2016) no qual os métodos de predição desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia Civil e Transportes da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU) foram utilizados para calcular o desempenho teórico de escavação feitas a fogo e por tuneladoras em túneis de grande e pequena área de seção transversal.

Uma abordagem similar foi realizada nesse trabalho. As comparações entre as taxas de avanço, [m/dia] e entre os custos primários da escavação, [reais/m³], para uma tuneladora tradicional de 4,5 m de diâmetro e para o conceito proposto com seção quadrada de 4,0 m em duas situações geológicas distintas (condição geológica “A” e “B”) são descritas nas próximas sessões.

Vale reforçar que o desempenho da TBM tradicional fez uso da abordagem sugerida pelo método NTNU. Entretanto o conceito proposto necessitou das adaptações sugeridas na seção 2.4.1 e os dados de taxa de remoção volumétrica, V , apresentados na tabela 03 para a determinação da taxa de avanço e custo primário de escavação.

1.2.1 Condições geológicas

O desempenho das tuneladoras é bastante dependente da condição geológica. Para este trabalho as condições são apresentadas na tabela 20. Enquanto a condição “A” é uma formação de arenito de boa porosidade, a condição “B” é uma formação de granito de baixa porosidade. O conteúdo de quartzo de ambas é 40%.

Parâmetros	Condição A	Condição B
Formação, []	Arenito	Granito
Resistência à compressão, [MPa]	22,00	57,00
Coeficiente de escavação, (DRI), []	65,00	35,00
Coeficiente de durabilidade dos discos, (CLI), []	25,00	6,00
Porosidade, [%]	10,00	1,00
Conteúdo de Quartzo, [%]	40,00	40,00
Ângulo de mergulho, [graus]	0,00	0,00
Direção do túnel, [graus]	0,00	0,00
Ângulo de orientação, [graus]	0,00	0,00
Classe da fratura, []	zero	Zero

Tabela 20 – Parâmetros geológicos da condição “A” e “B”.

Fonte: Autor, (2016)

Já os coeficientes DRI que quantificam a resistência do maciço ao desmonte por contato mecânico são 65 e 35, respectivamente. Outro coeficiente importante é o de durabilidade dos discos. Ele mensura o desgaste dos discos de corte pelo fenômeno da abrasão e assume os valores de 25 e 6 para as condições “A” e “B”, respectivamente. Vale citar que quanto maior o valor assumido pelo indicador menor a resistência ao desmonte e menor o desgaste por abrasão.

1.2.2 Taxa de avanço

Também são necessárias definições quanto às características da TBM tradicional e do conceito proposto. Os dados referentes à TBM tradicional são mostrados na Tabela 21 e do conceito proposto na tabela 22.

Parâmetros	Condição A	Condição B
Diâmetro da TBM, [m]	4,50	4,50
Diâmetro do disco, [mm]	483,00	483,00
Número de discos da TBM, []	32,00	32,00
Distância entre os discos, [cm]	70,00	70,00
Velocidade de rotação, [rpm]	11,20	11,20
Produtividade, []	0,59	0,59
Horas trabalhadas, [h]	14,3	14,3

Tabela 21 - Parâmetros da TBM tradicional

Fonte: Autor, (2016)

O conceito proposto, por sua vez, exige um conjunto de dados diferente. Devido à inexistência de um protótipo e bancadas de experimentação disponíveis, alguns dos dados foram compilados a partir de referências bibliográficas publicadas nos principais jornais científicos sobre o assunto e outros provêm de características do próprio equipamento.

Destaque é o fator de forma, $F_{seção}$, que introduz o efeito da forma geométrica do módulo de corte axial (módulo “1”) ao cálculo da taxa de avanço. Para o conceito apresentado nesse trabalho o fator de forma é definido pela equação 12 mostrada abaixo.

$$F_{seção} = 1/(L_{externo}^2 - L_{interno}^2 - R^2 \cdot (4 - \pi)) \quad \text{Equação 12}$$

Sendo $L_{externo} = 4,0$ m, $L_{interno} = 3,0$ m, $R = 0,5$ m, no presente desenvolvimento

Parâmetros	Condição A	Condição B
Número de bicos, []	8	8
Taxa de remoção, [m³/h]	10,92	0,04
Fator de forma, [m]	0,1473	0,1473
Produtividade, []	0,59	0,59
Horas trabalhadas, [h]	14,3	14,3

Tabela 22 - Parâmetros do conceito proposto

Fonte: Autor, (2016)

Os dados geológicos (tabela 20), da TBM tradicional (tabela 21) e os dados do conceito proposto (tabela 22) juntamente com as equações 05 e 11 permitiram a determinação das taxas de avanço que são mostradas na Figura 599.

Os dados ilustram bem a maior vocação da tuneladora proposta: rochas brandas com alta porosidade. Isso decorre de dois motivos. O primeiro é a pressão limiar da rocha granítica que é superior a da formação arenítica. A pressão limiar pode ser entendida como a pressão mínima do jato a partir da qual ocorre a remoção do material. Por regra geral quanto maior a pressão limiar, menor é a taxa de remoção. O segundo refere-se ao fato de que a hidrodemolição tem o seu desempenho maximizado com o aumento da porosidade. Isso é ocorre devido ao fenômeno de “arrancamento” que se torna mais significativo com o incremento dessa característica. Conclusão compartilhada por diversas publicações como OZCELIK et al. (2010), VIJAY (1992), KARAKURT, I.; AYDINER (2007).

JENG et al. (2004) e NYGARDSVOLL (2014) são claros em afirmar que a tecnologia apresenta resultados encorajadores para rochas brandas, mas não podem ser consideradas alternativas para rochas duras ainda. Esse panorama pode tornar-se diferente com pesquisas que visam maximizar da taxa de remoção através do

incremento do fluxo de abrasivo e a utilização de jato de água pulsátil (MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, 2012). Entretanto essas alternativas têm esbarrado em problemas operacionais. Enquanto o aumento da taxa de injeção do abrasivo gera problemas de entupimento, a utilização de jato de água pulsátil sofre com problemas técnicos associado à utilização de cristais piezométricos em um ambiente tão adverso.

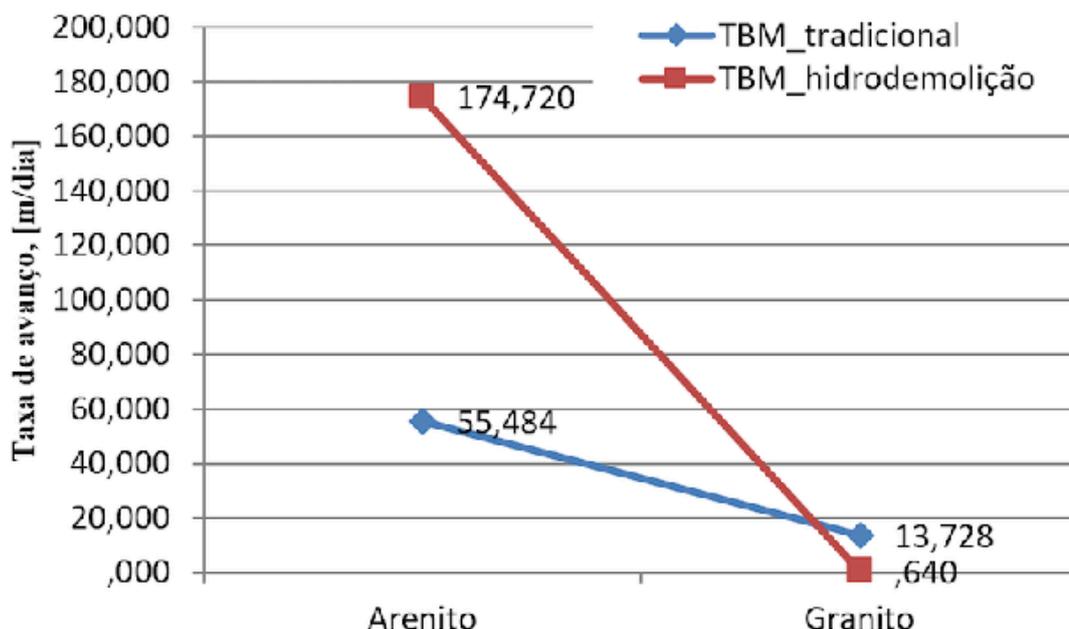


Figura 59- Comparação da taxa de avanço para as condições “A” e “B” para as tuneladoras tradicionais e o conceito proposto

Fonte: Autor, (2016)

Vale citar ainda que, sendo a tuneladora bem dimensionada, um possível aumento de superfície cortada por fio diamantado pode ser compensada por um incremento do número de estações de corte. Dessa forma acredita-se que a tecnologia de fio diamantado tem pouca influência sobre a taxa de avanço se desconsiderarmos problemas associados à manutenção.

1.2.3 Custo primário de escavação

A determinação do outro indicador de desempenho, o custo primário de escavação, exige dados extras das duas tecnologias. Para a tuneladora tradicional o dados estão sumarizados na tabela 23. Enquanto taxa de penetração, durabilidade média dos discos e número de discos são parâmetros técnicos, o preço médio dos discos de corte foi estimado a partir de informações coletadas em site especializados.

Parâmetros	Condição A	Condição B
Taxa de penetração, [m/h]	6,52	1,61
Durabilidade média dos discos, [m³]	8.729,00	2.220,59
Número de discos de corte, []	32	32
Preço dos discos de corte, [reais]	9.660,00	9.660,00

Tabela 23 - Parâmetros adicionais para a determinação do custo primário de escavação da TBM tradicional

Já o conceito proposto exigiu a definição dos principais itens relacionados com o processo de escavação juntamente com seus custos unitários e quantidades. Enquanto o custo unitário foi determinado a partir de cotações, a tarefa de determinação das quantidades necessárias foi mais complexa. Ela envolveu informações sobre a taxa de consumo dos insumos, vida útil das ferramentas de corte e taxas de reciclagem da água e abrasivo. A tabela 24 sumariza o custo unitário e as quantidades necessárias de cada item.

Parâmetros	Condição A		Condição B	
	\$, [reais]	Qtd	\$, [reais]	Qtd
Bicos de hidrodemolição, []	161,00	0,003	161,00	0,840
Água, [m³]	15,00	0,147	15,00	40,343
Abrasivo, [kg]	1,50	1,10	1,50	302,57
Fio diamantado, [m]	128,82	0,32	128,82	0,94

Tabela 24 - Parâmetros adicionais para a determinação do custo primário de escavação para o conceito proposto

Fonte: Autor, (2016)

As informações das tabelas 24 e 23 juntamente com as equações 10 e 12 permitiram a definição do custo primário de escavação como mostra a figura 60. Os custos de instalação dos reforços e do revestimento permanente não estão inclusos.

A análise do gráfico permite afirmar que tanto na condição “A” quanto na condição “B” os custos primário de escavação por metro cúbico para o conceito proposto são superiores aos custos apresentados pela TBM tradicional. Contudo para a condição “A”, rocha branda com alta porosidade, o custo primário de escavação é apenas 28% superior, enquanto para condição “B”, rocha dura pouco porosa, o custo é 859,62% superior.

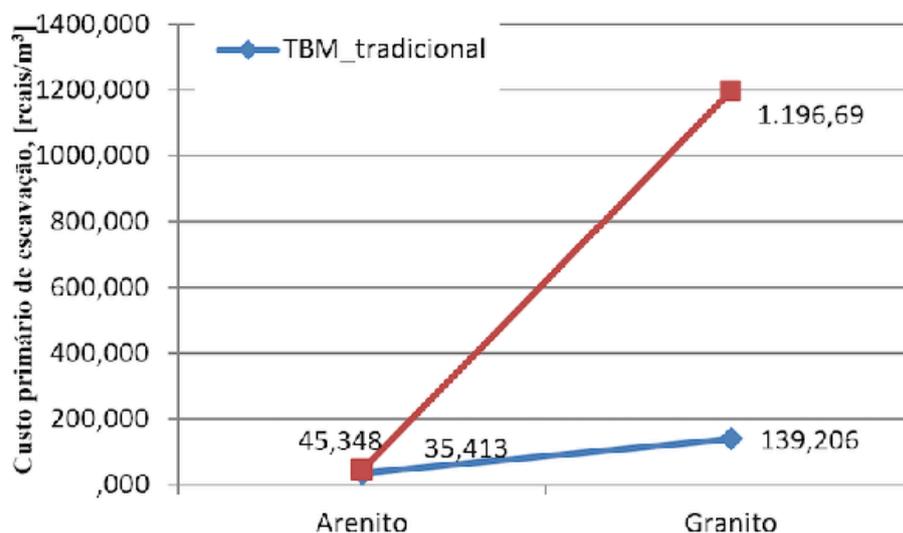


Figura 60 - Comparação do custo primário de escavação para as condições “A” e “B” para as tuneladoras tradicionais e o conceito proposto

Fonte: Autor, (2016)

Essa diferença é resultado da diferença nas taxas de remoção volumétrica nas duas situações. Enquanto para a condição “A” o valor é 10,92 m³/h para a condição “B” o valor é apenas 0,04 m³/h. Isso gera uma necessidade muito maior de insumos, elevando, dessa forma, os custos primários de escavação.

Da análise da composição de custo, tabela 24, percebe-se que a maior responsabilidade sobre o aumento significativo da condição “A” para a condição “B” recaio sobre o incremento da quantidade de abrasivo necessário. No caso de arenito são necessários apenas 1,10 kg enquanto para o granito são necessários mais de 320 kg. Tal fato coincide com as conclusões obtidas em AYDIN, GOKHAN; KARAKURT; HAMZACEBI (2014).

Uma redução do custo primário de escavação do conceito proposto passa invariavelmente pelo aumento de performance e redução no consumo de granalha. Relativo a granalha uma opção é a substituição por areia de granulometria controlada. Essa foi uma sugestão apresentada em NYGARDSVOLL (2014), mas merece uma análise cuidadosa quanto a sua aplicabilidade. Ela discorre contra conceitos apresentados em MOMBER, A. W.; KOVACEVIC (2012) que afirma que o abrasivo deve ter dureza superior ao do substrato escavado.

Outra alternativa para a redução de custo, analisada em AYDIN, G. (2014) e AYDIN, GOKHAN (2015), é a reciclagem do abrasivo em taxa de 81,77%, 57,50%, 34,37 e 17,72% respectivamente, no primeiro, segundo, terceiro e quarto cortes. Essa taxa, contudo, reduz com o tipo de substrato e processo de separação utilizado.

A mesma composição de custo considera água proveniente de fonte externa, mas em situações nas quais há reservatórios subterrâneos próximos, a sua utilização pode ser considerada. Segundo MOMBER, A. W.; KOVACEVIC (2012) e MOMBER, ANDREAS (2007) impurezas de até 100 micrometros não tem potencial nocivo significativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade de inovações significativas no setor de escavação mecânica por máquinas tuneladoras é intensa. Um das razões é que a produção científica relacionada está focada em inovações incrementais da tecnologia atual, abrindo mão da importante busca por novos princípios de funcionamento que caracteriza os processos de inovação radical. O resultado são máquinas caracterizadas pelo excessivo tamanho além do consumo elevado de insumos e peças de reposição, gerando um alto custo de aquisição e operação. A incapacidade das atuais tuneladoras de competirem com os métodos de escavação a fogo e por escarificação em diversas situações é uma das conseqüências dessa lacuna.

Essa situação se agrava nos países em desenvolvimento que não possuem a indústria de tuneladora bem desenvolvida como no Brasil. Nesse caso os custos com importação e logística desestimulam ainda mais a tecnologia das TBMs em detrimento aos demais métodos. A introdução de novas tecnologias também colabora com um setor industrial tão concentrado em poucas empresas.

O presente trabalho trabalhou com essa oportunidade. Desenvolvendo de uma maneira sistemática um conceito baseado em inovações radiais, balizado por requisitos de projeto que valorizam maior eficiência e um ciclo operacional diferenciado que permite a redução do consumo de insumos e peças além da redução de tamanho e peso. Apesar de não completamente dimensionado, esse conceito mostrou-se mais simples, com alta taxa de avanço e um custo competitivo.

1.1 Conclusões

Os produtos finais desse trabalho demonstram a viabilidade da aplicação das tecnologias de hidrodemolição e fio diamantado como sistema de corte de uma tuneladora de alto desempenho para rochas brandas. Essa oportunidade ganha ainda mais vulto quando consideramos a possibilidade de executar túneis de geometria não circular, que em algumas situações mostra-se vantajoso.

Requisitos e especificações de projeto para tuneladoras de alto desempenho também foram propostos. Eles foram essenciais na condução dos processos decisórios que culminaram na proposição de um conceito que renega algumas das principais características das tuneladoras tradicionais.

O ciclo operacional proposto talvez seja a maior contribuição do trabalho e pode ajudar em posteriores desenvolvimentos. Ele propõe o desmonte da frente de escavação em dois estágios, executados por duas tecnologias diferentes. O processo de remoção é simples e gera blocos de rocha que podem ainda ser utilizados para

outros fins.

O banco de concepções também merece destaque. Ele contém dezenas de opções que podem vir a ser reavaliadas e reinventadas induzindo novos desenvolvimentos ou inovações na tecnologia atual.

Por fim a concepção proposta mostrou-se adequada às especificações de projeto, atingindo taxa de avanço superior a 100 metros por dia e custo primário de escavação competitivo em formação arenítica porosa. No caso de formações mais duras e pouco porosas, a viabilidade técnica e econômica depende de desenvolvimentos na tecnologia de hidrodemolição que já se encontram em andamento, como a tecnologia de jatos pulsáteis e abrasivos de nova geração.

Portanto o trabalho alcançou os seus objetivos primários e secundários de maneira sistemática e contribui para o estado da arte da engenharia de túneis, indústria de tuneladoras e sociedade (através da geração de valor e redução dos impactos socio-ambientais desse tipo de empreendimento).

1.2 Trabalhos futuros

Diversas lacunas, contudo, devem ser ainda preenchidas para que tuneladoras baseadas em corte de rocha por jato de água e fio diamantado sejam uma realidade. As principais identificadas são:

- Investigação do desempenho da hidrodemolição em variadas de geologias: a dificuldade na elaboração de modelos matemáticos e até mesmo numéricos para a determinação dos parâmetros de desempenho exigiu que as pesquisas sobre o assunto sejam realizadas experimentalmente. Devido ao custo dessa abordagem o número de pesquisas nesse sentido é pequena.
- Investigação da granulométrica dos resíduos de rocha geradas durante o corte por hidrodemolição: resíduos de rocha demasiadamente grandes podem ser um problema para o sistema de drenagem da frente de corte. A determinação da granulometria ajudará no correto dimensionamento do sistema.
- Elaboração de um sistema de controle que mantenha os parâmetros operacionais otimizados: o desempenho do processo de hidrodemolição é bastante sensível a variação de alguns parâmetros, em especial à distância entre maciço e bico. A elaboração de um sistema de controle que mantenha os parâmetros em uma faixa admissível contribuirá para tornar a tuneladora proposta uma realidade.
- Projeto detalhado do conceito proposto: o presente trabalho apenas propôs conceitos. O desenvolvimento deve seguir o próximo passo que é a elaboração do projeto detalhado com toda a sua complexidade.

Para tanto é essencial a parceria entre setores acadêmicos, indústria de tuneladoras e executores de obras de túneis para o avanço consistente e concretização do conceito proposto. Permitindo, dessa forma, que ela represente um elemento de geração de valor e contribua para a sociedade e o meio ambiente.

- AKAO, Y. **Quality Function Deployment: integrating customer requirements into products design**. Cambridge Productivity Press, 1990.
- ALPTRANSIT INC. Tunnel Boring Machine. p. 2-3, 2016. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=yFHrI3HFMDg> >.
- ANONYMOUS. Skate com um tanque de guerra? **Engenharia Mecânica - FASB**, p. 11-13, 2016. Disponível em: < <http://mecatronica-fasb.blogspot.com.br/2010/12/skate-com-um-tanque-de-guerra.html> >. Acesso em: 09/11/2016.
- ATAEI, M. et al. Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 5, n. 6, p. 1289-1295, 2012.
- AYDIN, G. Recycling of abrasives in abrasive water jet cutting with different types of granite. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 10, p. 4425-4435, 2014.
- AYDIN, G. Performance of recycling abrasives in rock cutting by abrasive water jet. **Journal of Central South University**, v. 22, n. 3, p. 1055-1061, 2015.
- AYDIN, G.; KARAKURT, I.; HAMZACEBI, C. Artificial neural network and regression models for performance prediction of abrasive waterjet in rock cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 9-12, p. 1321-1330, 2014.
- BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008. ISBN 978-85-204-2208-3.
- BERMONTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Tombador de bloco. **Produtos**, p. 1-3, 2015. Disponível em: < <http://www.bermontec.com.br/produtos.html> >. Acesso em: 01/09/2016.
- BLUEGRASS INC. The Pioneer of Diamond Wire Sawing. p. 1-4, 2016. Disponível em: < <http://www.bluegrassbit.com/resources/diamond-wire-sawing.aspx> >. Acesso em: 01/09/2016.
- BORTOLUSSI, A. et al. Improvement of disk cutters performance in the excavation of small tunnels. Proceedings of the 14th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES 2005 and the 5th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries, CAMI 2005, 2005. **Conference Paper**. p.145-160.
- BRULAND, A. **Hard rock tunnel boring**. 2000. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi
- _____. The NTNU prediction model for TBM performance. **Norwegian Tunneling Technology**, v. 23, p. 10, 2014.
- CHAPMAN, D.; METJE, N.; STÄRK, A. **Introduction to tunnel construction**. CRC Press, 2010. ISBN 0203895150.
- CHEN, S.; LEE, S.; YANG, W. Numerical analysis of ground settlement induced by a double-o-tube (dot) shield tunnel excavation. In: (Ed.). **ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation**, 2013. p.949-958.

CIALKOWSKA, B. Application of diamond wire for cutting various materials. Proceedings of the International Conference Geomechanics'93, Sep 28 - 30 1993, 1994. Ostrava, Czech republic. A.A. Balkema. p.413-413.

CICCU, R. WATER JET IN ROCK AND MINERAL ENGINEERING. 1998.

CICHINELI, G. Técnica drill and blasting para desmonte de rochas. **Infraestrutura Urbana: Projetos, Custos e Construção**, v. 37, p. 4, 01/03/2014 2014.

CLARKE-HACKSTON, N.; BELZ, J.; HENNEKER, A. **Guidance for Partial Face Excavation Machines**. 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008: 457-465 p. 2007.

COOK, N. **Drilling and Excavation Technologies for the Future**. Washinton, D.C: National Academy press, 1994.

COSTA, V. Transportador com vagões sobre trilhos faz “pirueta” e transporta até 954 t por Revista Minérios. **Revista Minérios** p. 1-4, 2016.

CUTTING TECHNOLOGY INC. Diamond Wire Sawing At Nuclear Reactor Nuclear Plant Selective Demolition. 2013. Disponível em: < http://www.cuttingtechnologies.com/case_study_9.html >. Acesso em: 01/09/2016.

DARÉ, G. Proposta de um modelo de referência para o desenvolvimento integrado de componentes de plástico injetados. 2001.

FARROKH, E.; ROSTAMI, J.; LAUGHTON, C. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 30, p. 110-123, 2012.

FONSECA, A. J. H. Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional. 2000.

G. M. AUTOFLOW INC. Domestic and Industrial Water Filtration. p. 2016-2016, 2016. Disponível em: < <http://www.gmautoflow.co.uk/domestic?and?industrial?water?filtration.htm> >. Acesso em: 09/11/2016.

GHASEMI, E.; YAGIZ, S.; ATAELI, M. Predicting penetration rate of hard rock tunnel boring machine using fuzzy logic. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 1, p. 23-35, 2014.

GODARD, J. Why go underground. Urban underground space: a resource for cities, Actes de la conférence internationale de l'ACUUS, Torino, 2002.

GRANDORI, C. Tunnelling and underground construction in the twenty-first century. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 2, n. 2, p. 143-145, 1987.

HAGAN, P. C. The cuttability of rock using a high pressure water jet. p. 1-12, 1974.

HASSANPOUR, J.; ROSTAMI, J.; ZHAO, J. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 26, n. 5, p. 595-603, 2011.

HASSANPOUR, J. et al. Evaluation of common TBM performance prediction models based on field data from the second lot of Zagros water conveyance tunnel (ZWCT2). **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 52, p. 147-156, 2016.

HECKSCHER, B. **Down in the Tunnel**. The Launch Box: A Blog About Building the Second Avenue Subway in New York City: 1-2 p. 2010.

HEMPHILL, G. B. **Practical tunnel construction**. John Wiley & Sons, 2012. ISBN 1118330005.

HERRENKNECHT AG. Gripper TBM: Expert for tough hard rock. **Gripper TBM**, p. 1-4, 2015. Disponível em: < <https://www.herrenknecht.com/en/products/coreproducts/tunnelling/grippertbm.html> >. Acesso em: 27/01/2015.

HERRENKNECHT AG. Double Shield TBM: Continuous tunnelling at maximum speed. p. 1-4, 2015a. Disponível em: < <https://www.herrenknecht.com/en/products/coreproducts/tunnelling/doubleshieldtbm.html> >. Acesso em: 27/01/2015.

_____. Single Shield TBM: Fast tunnelling in changing rock conditions. p. 1-4, 2015b. Disponível em: < <https://www.herrenknecht.com/en/products/coreproducts/tunnelling/singleshieldtbm.html> >. Acesso em: 27/01/2015.

_____. Gripper TBM. 2016. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=PHHrHL3qUil> >. Acesso em: 09/09/2016.

HLAVAEK, P. et al. Sandstone Turning by Abrasive Waterjet. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 48, n. 6, p. 2489-2493, 2015.

IMIC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Peneira Vibratória Inclínada**. 2016

JENG, F.-S.; HUANG, T.-H.; HILMERSSON, S. New development of waterjet technology for tunnel excavation purposes. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 19, n. 4-5, 2004.

JONES, M. Choices for excavation. **T & T international**, n. MAI, 2011.

KABAK, B. **Down the rabbit hole , a tunnel boring machine comes alive**. 2nd Avenue: Sagas. New York 2014.

KARAKURT, I.; AYDIN, G.; AYDINER, K. An experimental study on the depth of cut of granite in abrasive waterjet cutting. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 27, n. 5, p. 538-544, 2012.

KARAKURT, I.; AYDINER, K. **Rock cutting performance of abrasive water jet cutting systems**. 2007. 127-134 ISBN 978-9944-89-287-2.

KMT COMPANY. **KMT WaterJet: Overview** 2010.

KOLLÉ, J. J. Compressed-water pulse generators and applications. p. 1-6, 2000.

KRCIK, M. Non-circular full face tunnel boring machines – 21st century challenge. p. 1205-1210, 2007.

KULEKCI, M. K. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 12, p. 1297-1306, 2002.

LEONEL, C. E. L. Sistematização do processo de planejamento da inovação de produtos com enfoque em empresas de pequeno e médio porte. 2006.

LIU, Q. et al. A Wear Rule and Cutter Life Prediction Model of a 20-in. TBM Cutter for Granite: A Case Study of a Water Conveyance Tunnel in China. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 50, n. 5, p. 1303-1320, 2017.

LONG, Z. Y. A second mega TBM river crossing for Nanjing. **TBM**

Recorder, p. 4-5, 2011. Disponível em: < <http://www.tunneltalk.com/TBM?Recorder?Aug11?Mega?TBM?for?second?river?crossing?in?Nanjing.php> >. Acesso em: 28/04/2016.

LU, Y. et al. Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, p. 47-56, 2013.

MAIDL, B. et al. **Mechanised shield tunnelling**. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 3433601496.

MAIDL, B. et al. **Hardrock tunnel boring machines**. John Wiley & Sons, 2008. ISBN 3433016763.

MARTINHO, J. F. D. C. O uso de explosivos na escavação de túneis: implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folhas de cálculo. 2012.

MAURER, W. C. **Novel Drilling Techniques**. Pergamum Press, 1979.

MCCARTHY, S. Diamond wire cutting. **QUEENSLAND ROADS**, v. 10, p. 29-39, 2011.

MINAS, D. E. et al. **Corte de rochas com jactos de água de alta pressão**. 2009.

MOMBER, A. **Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete**. Aachen, Germany: Elsevier, 2005.

MOMBER, A. **Blast cleaning technology**. Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 354073645X.

MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, R. **Principles of abrasive water jet machining**. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 1447115724.

MOSER, S. R. **Inovações tecnológicas na escavação mecanizada de túneis**. 2013.

NAGHADEHI, M. Z.; MIKAEIL, R. Optimization of tunnel boring machine (TBM) disc cutter spacing in jointed hard rock using a distinct element numerical simulation. **Periodica Polytechnica. Civil Engineering**, v. 61, n. 1, p. 56, 2017.

NK ENGINEERS. Overhead traveling crane. p. 1-2, 2016. Disponível em: < <http://www.overheadcrane.in/content.php?pid=9> >. Acesso em: 14/09/2016.

NORONHA, M.; FARIA, P. Modernização na Construção de Túneis Rodoviários Através do Uso de uma Nova Máquina Tuneladora. **O Empreiteiro**, p. 1-12, 2008.

NORONHA, M. et al. Construction of non-circular tunnels with water jet cutting. **30th International No-Dig Conference**, 2012.

NYGARDSVOLL, E. **Application of water jet cutting for tunnel boring**. 2014. faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Stavanger.

OH, T. M.; CHO, G. C. Characterization of effective parameters in abrasive waterjet rock cutting. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 47, n. 2, p. 745-756, 2014.

_____. Rock Cutting Depth Model Based on Kinetic Energy of Abrasive Waterjet. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 49, n. 3, p. 1059-1072, 2016.

OH, T. M. et al. Effect of water jet geometric parameters on rock fracturing. **Ksce Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 3, p. 772-779, Apr 2014.

OZCELIK, Y. et al. Performance assessment of water jet cutting for Italian granite. *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering - Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010*, 2010. **Conference Paper**. p.827-830.

ÖZKAN, E.; SARIIŞIK, G.; CEYLAN, S. Application and productivity analysis of new channel opening method in natural stone quarries with diamond wire cutting machine. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 2, p. 1089-1098, 2015.

PAULO, I. D. Análise de produtividade de máquinas tuneladoras em rochas duras. 2014.

PISCINAS PLANALTO LTDA. Porque trocar a areia do filtro de piscina ? , p. 1-5, 2016. Disponível em: < <http://www.piscinasplanalto.com.br/porque/trocar/a?areia?do?filtro?de?piscina> >. Acesso em: 15/09/2016.

REIS, Â. V. D. Desenvolvimento de concepções para a dosagem e deposição de precisão para sementes miúdas. 2003.

ROMANO, L. N. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas. 2003.

ROSTAMI, J. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 57, p. 173-182, 2016.

ROSTAMI, J.; OZDEMIR, L.; NILSON, B. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. *Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas*, 1996. p.1-10.

SALIMI, A.; ROSTAMI, J.; MOORMANN, C. TBM performance prediction in basalt and pyroclastic rocks of Deccan traps, a case study of Maroshi-Ruparel water supply tunnel. 2016.

SANDVIK AB. Roadheaders tunneling: Sandvik MT720. **Mechanical Cutting**, p. 2-3, 2016. Disponível em: < <http://mining.sandvik.com/en/products/equipment/mechanical?cutting/roadheaders?tunneling/mt720> >. Acesso em: 11/04/2016.

SARZI COMÉRCIO EXTERIOR. Travesseiro pneumático. p. 1-2, 2016. Disponível em: < <http://sarzicomex.com.br/produto/travesseiro?pneumatico/> >. Acesso em: 14/09/2016.

SHIJIAZHANG AN PUMP MACHINERY CO. LTD. Bomba de água grande da irrigação da agricultura da capacidade do motor Diesel. p. 1-4, 2016. Disponível em: < http://pt.made?in?china.com/co_anpump/product_Diesel?Engine?Big?Capacity?Agriculture?Irrigation?Water?Pump_ehhegyng.html >.

SPEEDCUT COMPANY. **SpeedCut : Diamond wire cutting machines** 2015.

STACK, B. **Encyclopaedia of tunnelling, mining and drilling equipment**. Mudén Publishing Company, 1995. ISBN 0958771111.

STONEAGE COMPANY. **StoneAge: Engineering the power of water** 2016.

STONECYPHER, J. R.; LAMAR. **James Robbins and his \$10,000,000 Machine**: 1-3 p. 2011.

SURJAATMADJA, J. B.; BAILEY, A. J.; SIERRA, S. A. Hydrajet testing under deep-well conditions

points to new requirements for hard-rock perforating. **SPE Drilling & Completion**, v. 25, n. 03, p. 372-379, 2010.

THE ROBBINS COMPANY INC. **Hard rock tbms**. Solon: 1-9 p. 2008.

VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**: CETEM/MCTI 2013.

VIJAY, M. M. Comparison of the performance of high-speed abrasive-entrained, cavitating and plain water jets for selective mining applications. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 1992.

WOMA GMBH. **CATALOG: TURBO NOZZLE TD3000 – SCS**: 1-9 p. 2016.

YANG, Y. et al. Analysis of face stability during excavation of double-o-tube shield tunnel. **The Scientific World Journal**, v. 2013, 2013.

YE, G.-L. et al. Lessons learnt from unusual ground settlement during Double-O-Tube tunnelling in soft ground. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 49, p. 79-91, 2015.

ZARE, S. **Drill and Blast Tunneling Blast Design**. 2007. Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway,

ZARE, S.; BRULAND, A.; ROSTAMI, J. Evaluating D&B and TBM tunnelling using NTNU prediction models. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 59, p. 55-64, 2016.

ZHANG, Z.; MENG, L.; SUN, F. Wear analysis of disc cutters of full face rock tunnel boring machine. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 27, n. 6, p. 1294-1300, 2014.

SOBRE OS AUTORES

RAFAEL PACHECO Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2009), mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2012), especialização em Petróleo e Energia Renováveis pela Universidade Estácio de Sá (2018) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2017). Atualmente é pesquisador da BraBo Engenharia em Santa Catarina desde 2012. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e Civil, com ênfase em escavação mecanizada e predição de desempenho, atuando principalmente nos seguintes temas: máquinas tuneladoras, sondas de petróleo e escavação com jato d'água de alto teor energético.

LIDIANI CRISTINA PIERRI Nascida em Florianópolis, dedico minha vida aos estudos. Em 1999 iniciei o curso de Licenciatura em matemática finalizando-o em 2004 na Universidade Federal de Santa Catarina. Logo em seguida, ainda em 2004, comecei o curso de Engenharia de Materiais, na mesma instituição tendo este sido concluído em 2009. Já no ano seguinte dei início ao mestrado na Engenharia Mecânica tendo este sido finalizado em 2012. Em, 2013 o doutorado foi iniciado na área de Engenharia Civil e concluído em 2018. Ainda em 2010 tive o prazer de conhecer meu amigo Rafael Pacheco dos Santos nas primeiras aulas do mestrado, e ele não apenas dividiu as puras emoções durante o desenvolvimento do projeto de dissertação, como também esteve ao lado em festas e momentos de distrações. Além disso, fui indicada por ele a trabalhar na empresa Brabo Engenharia na qual atuo até hoje. Lá conheci outros grandes amigos, o professor Marcos Aurélio Marques Noronha (chefe e amigo), a professora Patricia de Oliveira Faria (chefe e amiga) e o engenheiro Jair José dos Passos Junior (colega de trabalho e amigo). Por fim, tenho apenas a agradecer ao grande trabalho de desenvolvemos juntos e espero seguir em frente com essa equipe que já faz parte da minha vida não somente profissional como também pessoal.

JAIR JOSÉ DOS PASSOS JUNIOR Possui mestrado em Engenharia de Sistemas de Transportes pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018), com graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2016) e Engenharia Civil pelo Centro Universitário Estácio de Santa Catarina (2018). Atualmente cursa o MBA em Infraestrutura de Transportes e Rodovias pelo IPOG-Florianópolis. Tem atuado com Pesquisa e Desenvolvimento na BraBo Engenharia desde 2015, com experiência na área de Engenharia Mecânica e Civil, com ênfase em escavação mecanizada e predição de desempenho, atuando nos seguintes temas: Máquinas Tuneladoras, Escavação com Jato D'água, Obra Subterrâneas e Infraestrutura Subterrânea de Transportes

MARCOS AURÉLIO MARQUES NORONHA possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (1991), mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1994), doutorado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1998) e University of Stuttgart, Alemanha (1995-1996, programa-sanduiche), pós-doutorado pela Technical University of Graz, Áustria (2004),

e pós-doutorado pela University of California, Davis (2006). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina, após ter atuado por 11 anos como professor doutor da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia de Túneis, atuando principalmente nos seguintes temas: sondas de perfuração, máquinas tuneladoras, obras subterrâneas, infra-estrutura subterrânea de transportes. O seu principal trabalho de pesquisa atualmente é voltado para novos desenvolvimentos tecnológicos de sondas de perfuração e máquinas tuneladoras de alto desempenho.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-220-3



9 788572 472203