

Thomas Guinter Giese

**ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE
TUNELADORAS INOVADORA E CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenadoria do Curso
de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil
Orientador: Prof. Dr. Marcos Noronha
Co-Orientador: Eng. Msc. Rafael
Pacheco

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Giese, Thomas Ginter
ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE TUNELADORAS
INOVADORA E CONVENCIONAIS / Thomas Ginter Giese ;
orientador, Marcos Noronha ; coorientadora, Rafael
Pacheco. - Florianópolis, SC, 2016.
93 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Túneis. 3. Estimativa de
Custos. 4. Máquina tuneladora. I. Noronha, Marcos. II.
Pacheco, Rafael. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Thomas Ginter Giese

ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE TUNELADORAS INOVADORA E CONVENCIONAIS

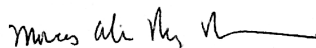
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil”, e aprovado em sua forma final pela Coordenadoria do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de fevereiro de 2016.



Prof. Lía Caetano de Bastos, Dr.
Coordenadora de TCC (ECV - UFSC)

Banca Examinadora: Eng. Rafael Pacheco, Msc. (Doutorando PPGEC-UFSC – Co-orientador), Prof. Patricia de Oliveira Faria, PhD (UFSC) e Eng. Lidiani Pierri, Msc. (Doutoranda PPGEC-UFSC)



Prof. Marcos Noronha, PhD.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus colegas, amigos e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todas as bênçãos concedidas ao longo dos anos de graduação e por me permitir ser capaz de enfrentar os desafios encontrados ao longo do caminho.

Aos meus familiares que estavam sempre otimistas e me motivando a seguir em frente, pelo apoio incondicional, pelas conversas acolhedoras e pelos momentos que passamos juntos. O meu agradecimento é uma gota d'água perto do oceano que são vocês.

Aos meus amigos que se tornaram mais que amigos. Mariana Rufino, Micheli y Castro e Vanderlei Cristóvão vocês foram as pessoas mais presentes nos momentos mais difíceis de estudo, bem como nas horas mais divertidas da fase mais rica de nossas vidas. Carrego comigo o significado de amizade que aprendi com vocês. Podemos estar longe, a tempo sem nos ver, mas quando nos encontramos, a paz de espírito nos invade e a vida se encarrega de escrever a história de nossas vidas.

Aos meus aventureiros, desbravadores, invencíveis e campeões amigos que tive o imenso prazer em conhecer durante o intercâmbio em Munique. Aprendi com vocês que mesmo vivendo nas melhores condições, sem amigos a vida é fria, escura e pesada. Mas com vocês, pude enfrentar as mais pesadas dificuldades e estive mais forte do que amedrontado. *“Die Freundschaft ist eine Kunst der Distanz, so wie Liebe eine Kunst der Nähe ist.” - Sigmund Graff.* (A amizade é a arte da distância, assim como o amor é uma arte da proximidade).

Aos meus amigos da BraBotech, os quais me ensinaram os primeiros passos no mundo fascinante que é a Pesquisa. Meus sinceros agradecimentos pelas incontáveis perguntas respondidas, pelas oportunidades geradas – das quais me pergunto até hoje se sou digno de tanta confiança, e pelo confortável ambiente de trabalho que me proporcionam.

Aos mestres e demais colaboradores da Universidade Federal de Santa Catarina, os quais trabalham arduamente para formar o futuro da nação. Agradeço também ao governo brasileiro pelo incentivo e fomento no setor de Pesquisa e Desenvolvimento e pelas oportunidades de capacitação oferecidas no Brasil e nos melhores centros tecnológicos ao redor do mundo.

Aos meus amigos de Cagliari, com os quais pude dividir momentos inesquecíveis e os quais me mostraram que para o ser humano não existem culturas adversas ou idiomas incompreensíveis que possam ser barreiras para expressar o afeto que temos pelos nossos

irmãos. Agradeço pelo apoio concedido nas últimas semanas de desenvolvimento desse trabalho e pela lembrança de como a vida é mais leve quando a encaramos com simplicidade

Ao meu orientador Prof. Marcos Noronha e ao meu coorientador Eng. Rafael Pacheco, os quais são exemplos profissionais pelos quais me espelho. Encontrar pessoas empenhadas em transformar o Brasil não é fácil, mas tive o privilégio de encontrar vocês, que além da transformação, formam pessoas capacitadas a continuar o trabalho por conta própria.

Por fim, às pessoas que participaram de alguma forma para que essa jornada se cumprisse cheia de memórias bonitas e aprendizados que me geraram frutos para enfrentar novos desafios. Muito obrigado por toda forma de ajuda que ofereceram. Muitas vezes um simples sorriso pode mudar o dia de uma pessoa, por isso espero que possam continuar sorrindo para todos que encontram em suas jornadas.

RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo do custo associado ao projeto básico de uma máquina tuneladora com inovações em seus principais componentes. Nesse novo conceito, o corte de rocha é feito por jato d'água com alto teor energético (alta vazão e alta pressão), substituindo os discos de corte utilizado nas máquinas tradicionais. Além disso, o sistema de suporte do túnel é feito pela extrusão do concreto, sendo a estrutura então moldada *in loco*, oferecendo uma resistência mais alta do que nas técnicas utilizadas atualmente. Nesse contexto, um estudo sobre o funcionamento das inovações propostas foi desenvolvido e, paralelamente, uma estimativa de custo para a confecção da máquina foi elaborado a fim de se obter insumos para uma análise de viabilidade econômica em seu uso futuro. Inicialmente pesquisou-se bibliografias de renome no ramo da construção de túneis para complementar o conhecimento da área. Posteriormente, uma análise detalhada do projeto básico foi necessária para embasar a etapa seguinte, levantamento de custos estimados. Dividiu-se os componentes da máquina de acordo com os sistemas de trabalho classificados no projeto e assim, orçadas com fornecedores da região. O fator usado para estimar os custos para componentes não encontradas no mercado foi a experiência dos orientadores em projetos do mesmo âmbito. Aplicando-se uma diretriz de classificação de estimativa de custo, criada pela AACE (Associação para Desenvolvimento da Engenharia de Custos), foi possível verificar e corrigir os valores de venda para a tuneladora. Com esses resultados, obteve-se uma correlação de custos entre os sistemas, bem como uma comparação do valor final para se fabricar uma tuneladora inovadora com os valores pagos por tuneladoras convencionais compradas no Brasil nos últimos anos. Esses resultados geraram indicadores de que é viável a execução do projeto com valores mais baixos do que os valores pagos pelos modelos convencionais.

Palavras-chave: Túneis, Estimativa de custos, Corte de rocha por jato d'água, Extrusão.

ABSTRACT

The current dissertation concerns the costs of a basic tunnelling machine with modifications in the main components. In this new concept, rock is cut by water jets with high energy content (high flow and high pressure) replacing the cutting discs used in traditional machines. Furthermore, the tunnel support system is made by concrete extrusion, offering a higher resistance than the techniques currently used. In this context, a study on the functioning of the proposed innovation was developed in addition with a cost estimate for the manufacturing in order to obtain data for an economic feasibility analysis to be used in the future. Initially it was accomplished an extensive literature review on the state of the art of tunnel construction. Subsequently, a detailed analysis of the basic design was needed to support the next step: research of the estimated cost. It divided the components of the machine according to the work systems classified in the project and thus budgeted with commercial vendors in the region. The cost estimation of components not found in the market was based on the experience of the present work supervisors. Applying a policy of cost estimate classification established by AACE (Association for Development of Cost Engineering), it was possible to check and correct sales figures for tunneling. With these results, we obtained a correlation of costs between the systems as well as a comparison between the final value of manufacturing an innovative tunnelling device and the amounts paid for conventional tunnelling devices purchased in Brazil in recent years. These results proved that this project can be viably executed and will cost less than conventional models.

Keywords: Tunnels, Cost estimate, Rock cutting by water jet, Extrusion.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Porcentagem de uso de túneis na Oceania
- Figura 2: Instalação dos explosivos com o uso de maquinário
- Figura 3: Detalhe equipamento de instalação dos explosivos
- Figura 4: Cordões de detonação (*Blasting cord*) e detonadores elétricos (*Detonators*)
- Figura 5: Execução do suporte de um túnel com concreto jateado
- Figura 6: Esquema da montagem de placas pré-moldadas para o suporte do túnel
- Figura 7: Etapas de escavação usadas no método OATM (vista frontal)
- Figura 8: Etapa de escavação usada no método OATM (vista em perspectiva)
- Figura 9: Etapa de escavação usada no método NATM (vista em perspectiva)
- Figura 10: Escavação em andamento (NATM)
- Figura 11: Paredes atirantadas no talude para construção de túnel com método *Cut and Cover*
- Figura 12: Modelo de uma TBM
- Figura 13: Modelos de máquinas para escavação de túneis
- Figura 14: Modelo de uma máquina *Gripper*
- Figura 15: Modelo de TBM com *Shiel* na parte superior
- Figura 16: Componentes do sistema de corte
- Figura 17: Distribuição das 32 forças no sistema *Point Load*
- Figura 18: Carregamento do duplo ensaio brasileiro em rocha com furo central (à esquerda) e sem furo (à direita)
- Figura 19: Posição do teste Brasileiro, furo central e furo para desmonte
- Figura 20: Sistema de movimentação do sistema de remoção de detritos
- Figura 21: Visão isométrica dos sistemas funcionais da extrusora
- Figura 22: Módulo de extrusão
- Figura 23: Couraça estrutural, seção da vista isométrica e detalhe A
- Figura 24: Couraça estrutural, seção da vista isométrica e detalhe B
- Figura 25: Módulo de Extrusão: elementos do sistema de compactação
- Figura 26: Equipamentos usuais no *Backup* de TBM
- Figura 27: Estrutura metálica para o suporte de equipamentos
- Figura 28: Fluxograma das fases do trabalho
- Figura 29: Gráfico da divisão dos custos para cada sistema
- Figura 30: Gráfico da comparação dos valores de aquisição das tuneladoras

Figura 31: Gráfico da comparação do valor das tuneladoras em relação à área da seção transversal das máquinas

Figura 32: Gráfico da comparação custo da tuneladora inovadora em relação à área da seção transversal das média das tuneladoras convencionais

LISTA DE QUADROS

Tabela 1: Síntese de equipamento e sistemas do *Backup*

Tabela 2: Relação das características com as classes do método AACE

Tabela 3: Valores de componentes da Tuneladora inovadora

Tabela 4: Correção dos valores de venda da tuneladora inovadora com base nas diretrizes da AACE

Tabela 5: Comparação de horas dedicadas segundo a AACE

Tabela 6: Informações de cada tuneladora

Tabela 7: Comparação dos valores finais

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ITA – International Tunneling and Underground Space Association

AACE - The Association for the Advancement of Cost Engineering
(Associação para o Desenvolvimento da Engenharia de Custos)

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	19
INTRODUÇÃO.....	21
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivos Específicos.....	22
DESENVOLVIMENTO.....	23
2. USO DE TÚNEIS.....	23
3. CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS.....	25
3.1 Planejamento e preparação.....	25
3.2 Técnicas Construtivas.....	28
3.2.1 Drill and Blasting.....	29
3.2.2 New Austrian Tunnelling Method (OATM).....	33
3.2.3 Cut-and-cover.....	37
3.2.4 Tunnel Boring Machine (TBM).....	38
4. TUNELADORA INOVADORA.....	45
4.1 Cabeça de corte.....	45
4.1.1 Sistema de corte.....	46
4.1.2 Sistema de demolição.....	47
4.1.3 Sistema de demolição completa e transporte de detritos.....	49
4.1.4 Extrusão de concreto para o revestimento e suporte.....	50
4.1.5 Descritivo do Sistema de Compactação Hidráulico.....	53
4.2 Backup.....	54
5. ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	59
5.1 Classificação da diretriz AACE (Practice No. 17r-97).....	60
5.1.1 Definição das características.....	60
5.1.2 Relação e variação das características.....	62
6. MÉTODO.....	65

7. RESULTADOS.....	67
7.1 CUSTOS ESTIMADOS PARA TUNELADORA INOVADORA.	67
7.2 DIVISÃO DOS CUSTOS ENTRE OS SISTEMAS.....	68
7.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA AACE.....	68
7.3.1 Nível de projeto - característica primária.....	69
7.3.2 Finalidade do uso.....	69
7.3.3 Metodologia.....	69
7.3.4 Faixa de precisão.....	69
7.3.5 Esforço para preparação.....	70
7.3.6 Análise dos resultados do método aplicado.....	71
7.4 COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DE TUNELADORAS.....	72
7.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	74
8. CONCLUSÃO.....	77
8.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS.....	81
ANEXOS.....	83

INTRODUÇÃO

A construção de túneis está intimamente ligada aos desafios econômico/tecnológicos e nunca foi tão importante como nessas primeiras décadas do século 21. Por meio deles encurtam-se distâncias, transportam-se pessoas e mercadorias de forma mais rápida e segura, auxilia-se na geração de energia e também na melhora da qualidade de vida investindo-se em coleta de esgotos com os túneis para saneamento.

A escavação de um túnel depende dos condicionantes geológicos do local. Características como a litologia, presença de falhas e fraturas e resistência do solo/rocha contribuem para a escolha do tipo de escavação. Existem dois sistemas construtivos mais usados. Um é o *New Austrian Tunneling Method* (NATM), o qual tem como princípio a escavação por meio de explosivos e equipamentos como retroescavadeiras e martelos hidráulicos (VIEIRA, 2013). O outro é um método mecanizado, o qual utiliza uma máquina tuneladora denominada de *Tunnel Boring Machine* (TBM), ou popularmente conhecido por “*tatuzão*”. Com essa máquina é possível executar um túnel mais rapidamente e com menos riscos em acidentes de desmoronamento, contudo, seu custo direto é mais elevado e seu uso é único, sendo descartada após a conclusão da obra (NORONHA; FARIA, 2008).

O alto custo devido à importação de máquinas e à mão de obra qualificada freia o avanço brasileiro rumo à disseminação desse tipo de tecnologia. Atualmente, as máquinas tuneladoras usadas nas obras de túneis são todas importadas com taxas de impostos chegando a 60% (NORONHA; FARIA, 2008).

Apesar de bem estabelecidas, as TBM's são carentes de inovação. Com o avanço da Engenharia, faz-se necessário repensar os métodos usuais. Encontrar soluções de custos e impactos ambientais menores é sinônimo de superação e benefício para a sociedade. Dessa forma, pode-se dizer que surge então uma oportunidade de se devolver novas tecnologias nacionais.

Uma das iniciativas nesse sentido é desenvolvida pela empresa BraBo (*Brazilian Borer* - Perfuradora Brasileira). A tecnologia que está sendo desenvolvida utiliza outro sistema para corte e desmanche do maciço que está sendo escavado. No lugar de discos, o trabalho é feito por jatos de água, tornando os gastos de operação mais sustentáveis devido ao aumento da velocidade de avanço. As alterações em relação às TBM's convencionais que a BraBo propõem se baseiam na retirada dos componentes mais caros e complicados das máquinas atuais (NORONHA; FARIA, 2008).

Este trabalho apresenta um estudo das inovações propostas para uma tuneladora com sistema de corte por jato d'água e uma estimativa de custos para consumir a implantação dessas tecnologias na prática. Além disso, é apresentado uma comparação com valores de tuneladoras convencionais utilizadas atualmente em obras de metro no Brasil, para que seja possível a mensuração da viabilidade em se produzir a tuneladora inovadora.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho possui como objetivo geral elaborar uma estimativa de custo para uma tuneladora inovadora, afim de gerar insumos e informações para uma análise futura da viabilidade econômica da industrialização da tuneladora.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho estão descritos nos quatro pontos a seguir:

- Descrever as diversas técnicas de construção de túneis e os tipos de máquinas usadas atualmente;
- Apresentar os princípios de funcionamento dos componentes inovadores da tuneladora;
- Orçar os componentes da tuneladora inovadora;
- Discutir os resultados obtidos e comparar com valores de tuneladoras convencionais.

DESENVOLVIMENTO

2. USO DE TÚNEIS

“O objetivo dos túneis é permitir uma passagem direta através de certos obstáculos, que podem ser elevações, rios, canais, áreas densamente povoadas, etc.” (MARAGON, 2006). Dessa forma, existem diversas finalidades e usos para túneis. Apesar do desenvolvimento das técnicas construtivas se fortalecerem no século XIX, existem indícios de que os túneis já eram utilizados há mais de 2000 mil anos, comprovando que seu uso não é recente. Um exemplo disso é o Túnel de Ezequias, construído em 701 a.C. em Jerusalém. Relatos históricos trazem que o esse túnel foi planejado para proteger o abastecimento de água da população contra a invasão dos assírios. Com 535 metros de extensão, 1,80 metros de diâmetro e aproximadamente 40 metros de profundidade, a fonte de Gion estava conectada ao tanque de Siloé por esse empreendimento escavado em rocha maciça que pode ser classificado como um marco na história da Engenharia (PRITCHARD, 1974)

Com o passar dos anos e devido ao aumento do êxodo rural em virtude da Revolução Industrial, os centros urbanos foram desenvolvidos e expandidos. A divisão do espaço público em quadras, com avenidas centrais, distâncias entre residência e trabalho planejadas, dentre outras características que conhecemos hoje foi sendo aperfeiçoada. E por isso, o uso do subsolo foi uma solução encontrada para facilitar o acesso em locais já ocupados. Um exemplo para isso são os túneis de metrô. Podemos citar também os túneis rodoviários ou ferroviários em áreas não urbanizadas, que foram executados a fim de encurtar distâncias em regiões com o relevo acidentado. O túnel São Gotardo está localizado entre as cidades suíças de Erstfeld e Biasca, tendo uma extensão total de aproximadamente 57 km. É o maior túnel do mundo, e que tem previsão de inauguração em fevereiro de 2016, após seus 10 anos de construção. O relevo do local é extremamente acidentado, o que trouxe diversos desafios para os engenheiros, sendo então outro importante marco na Engenharia de Túneis (SHAFY, 2006).

Além dos túneis destinados ao transporte de pessoas e cargas, existem os túneis para transporte de fluidos, como água, esgoto e gases, ou também para instalação de cabos, como por exemplo, cabos de fibra ótica. Eles são menos complexos para serem construídos, mas muito importante para a infraestrutura das cidades.

Por fim, existem os túneis de mineração, os quais são destinados à exploração de minérios. As camadas com maiores concentrações de minérios estão, geralmente, em regiões mais profundas do solo ou da rocha.

Mas porque se aventurar pelo espaço subterrâneo se o Brasil e outros países em desenvolvimento possuem uma extensão territorial avantajada? Para o autor do artigo “*Why go underground?*” e ex vice presidente da ITA (International Tunneling and Underground Space Association), Jean Paul-Goudard (2002), o uso do espaço subterrâneo para transporte, utilidades públicas como abastecimento de água e instalações elétricas é prioridade no desenvolvimento de países emergentes, pois a infraestrutura serve de base para o progresso. Contudo, a dificuldade se encontra na justificativa para os poderes públicos da necessidade de investimento em usar o espaço subterrâneo.

3. CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

3.1 Planejamento e preparação

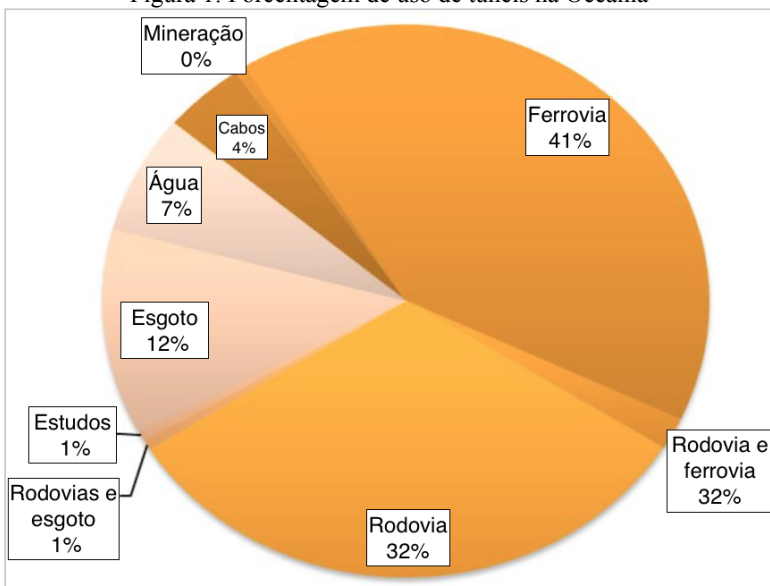
A construção de túneis envolve inúmeras incertezas que muitas vezes só poderão ser verificadas na hora de executar o túnel. A composição do solo é estimada em experiências passadas, bem como a magnitude da influência dos carregamentos. Como consequência disso, temos o aumento de risco para ocorrência de acidentes e uma impossibilidade de definir um fator de segurança quantitativo devido às inúmeras incertezas (NYGAARDSVOLL, 2014).

Levando em consideração o exposto, as etapas de planejamento devem ser feitas com cautela e utilizando auxílios para obter um melhor resultado, como por exemplo, a experiência do profissional responsável e informações de projetos anteriores.

A AACE International (*The Association for the Advancement of Cost Engineering – Associação para o Desenvolvimento da Engenharia de Custos*) desenvolveu uma matriz de classificação para a estimativa de custo para os diversos setores da indústria. Essa matriz auxilia o Engenheiro com sugestões de margens de erro, possíveis finalidades do uso da estimativa, quantidade de horas a se dedicar e outros. Isso é feito com base no nível de conhecimento do projeto, possuindo a matriz então, cinco classes (AACE, 1997). Essa classificação foi feita com base em pesquisas em projetos já executados e em *benchmarkings* com empresas do setor. Contudo, o resultado obtido pela AACE é para comparar diferentes níveis de definição em um mesmo projeto e suas percentagens de variação na determinação de estimativas.

Além do planejamento financeiro, para a escolha das técnicas de construção e análise de viabilidade econômica, outros planejamentos são importantes na fase de estudos preliminares. Túneis são utilizados conforme a figura 1, segundo (EFRON; READ, 2012), 32% para rodovias e 41% para ferrovias na Oceania. Para a construção dessas obras, é necessário fazer estudos de impacto ambiental e de vizinhança, principalmente se a obra será realizada em centros urbanos.

Figura 1: Porcentagem de uso de túneis na Oceania



Fonte: (EFRON; READ, 2012), adaptado pelo autor

O processo de construção de um túnel é considerado um desafio complexo na Engenharia Civil (HARRIS, 2011). Todas as etapas possuem dificuldades e fatores com alto potencial de variabilidade. Isso se deve pela dificuldade em se trabalhar no subsolo, em um ambiente em que não se conhece as condicionantes (HARRIS, 2011).

Segundo (EFRON; READ, 2012), o processo de execução de um túnel pode ser dividido em cinco fases detalhadas a seguir:

- Estudo de viabilidade: etapa em que se dedica ao estudo e investigação do solo e da formação geológica do local, estimativa de custos e análise de potenciais riscos - como falhas geológicas. Uma atenção especial deve ser dada nessa fase pelo fato de que quanto mais informação em relação aos aspectos geológicos se obter, menor será a possibilidade de atraso devido à imprevistos e melhor será a estimativa de custos, já que se contabiliza desde o início as intervenções necessárias durante a execução (PARKER, 1996). Dependendo do empreendimento, é possível nesta fase a elaboração de um projeto com aproximadamente 20% das informações obtidas até o momento, para que se possa basear um planejamento construtivo e financeiro, necessários nas próximas etapas (EFRON; READ, 2012).

- Planejamento e projetos: nessa fase são tomadas as decisões como escolha de técnica de construção e demais definições necessárias para a elaboração do projeto executivo, o qual é o projeto mais completo e é usado para a execução do túnel. O planejamento também é visto como um projeto, pois toma como base as informações da fase anterior e programa as diversas etapas da obra. Porém, por se tratar de uma obra grande e pela dificuldade de se obter informações geológicas como exposto acima, algumas lacunas nos projetos ficam incompletas. Em virtude disso, uma análise de risco se torna um aliado para a busca de sucesso. Com base em projetos anteriores e contribuição de profissionais de diversas áreas, é possível se preparar para imprevistos como encontro de falhas geológicas. Contudo, isso pode se tornar um passo complicado e é necessário ser cauteloso entre detalhes e tempo. O planejamento requer detalhes suficientes para se obter ganhos e investimentos, mas se for muito detalhado, pode ser que demande muito tempo e dinheiro (HM TREASURY, 2014). Na maioria dos casos, a construção de um túnel é solicitada por órgãos governamentais. Nesses casos, existem diversas formas de trabalho, como Parcerias Público-Privada (PPP), licitações para projeto e execução ou só execução. Devido à concorrência que se pode gerar pela competitividade das empresas participantes, obtém-se uma qualidade melhor no trabalho final (EFRON; READ, 2012).

- Construção: após a fase de planejamento, definição do projeto e contratação das partes envolvidas, a execução se inicia. Pelo fato de que cada túnel ser praticamente único, a variabilidade das características da obra é alta. Diferentes máquinas, materiais, distribuição de espaços e outros fatores variam de acordo com as especificações definidas nas fases anteriores. A escavação pode ser feita, por exemplo, por *Cut and Cover*, *Drill and Blast*, *Tunnel Boring Machines (TBM)* e dentre outras técnicas. A escolha é feita com base na geologia do local e nos resultados do estudo de viabilidade (EFRON; READ, 2012).

- Comissionamento: depois de construir o túnel, cada parte do túnel deve ser testada e avaliada pelo contratante. Testes como de resistência à água e de funcionamento dos sistemas elétricos e de ventilação garantem o bom funcionamento do túnel. Por fim, a responsabilidade da manutenção e operação do uso é repassada para alguma empresa, ou então pelo próprio contratante. O monitoramento através de instrumentação gera informações necessárias para manter o túnel em operação. Deslocamentos do solo e rochas, bem como fluxo e

nível d'água são insumos que auxiliam no gerenciamento de riscos (EFRON; READ, 2012).

3.2 Técnicas Construtivas

Os túneis podem ser construídos em diversos tipos de solo e rochas e são as características geológicas que irão auxiliar na escolha da melhor técnica de escavação. Uma delas é a escavabilidade, a qual é a capacidade de o maciço rochoso resistir à ação provocada pelos equipamentos de escavação, podendo ser mecânicos ou explosivos (BASTOS, 1998). Atualmente existem critérios que utilizam diferentes parâmetros de avaliação, mas segundo (MOSER, 2013), as principais características que influenciam na escavabilidade são a resistência da rocha e a presença de descontinuidades como falhas e fissuras. Os parâmetros que os principais autores usam refletem a essas duas características.

Contudo, existem outros parâmetros na hora de se decidir qual técnica é a melhor escolha. Em países como o Brasil, em que o mercado de máquinas tuneladoras ainda não é muito desenvolvido, as taxas de importação e operação dessas máquinas geralmente induzem o uso de técnicas com explosivos, ou até mesmo, optar por não se construir. Segundo (NORONHA, 2008), as taxas de importação são de 60%, além de custos extras como contratação de pessoas capacitadas para acompanhar os trabalhos.

Se a construção for situada em uma zona urbana, como por exemplo, túneis para metrô, critérios como impacto nas construções vizinhas devem ser averiguadas com atenção, já que segundo a reportagem do jornal O Globo do dia 14/01/2015, os moradores vizinhos da Linha 4 do metrô Barra-Zona Sul em Ipanema - Rio de Janeiro se assustaram após encontrar fissuras e crateras na rua em frente a suas residências. O abastecimento de água, gás e água, bem como as instalações telefônicas foram danificadas. Esse tipo de imprevisto contribui para a perda de controle do planejamento financeiro. Os moradores afirmaram que irão solicitar indenização pelo incômodo e pelos prejuízos gerados pela poluição visual e sonora. Segundo o jornal, comerciantes locais tiveram seus negócios prejudicados devido à esses incômodos. Sabe-se que a construção de túneis contribui para o desenvolvimento das cidades e bem estar dos cidadãos, mas um bom planejamento e análise de riscos devem ser feitos para evitar esses

prejuízos. A propagação das ondas de choque causadas por uma tuneladora pode atingir mais de 200 metros de distância do epicentro (HERRENKNECKT, 2015). A causa desses problemas não havia sido averiguada até a data da publicação da matéria. Contudo, a escolha de técnicas de escavação pode contribuir para esse tipo de situação, já que a propagação das ondas de choque varia de acordo com a forma de construção escolhida.

3.2.1 *Drill and Blasting*

O *Drill and Blasting* é uma técnica que pode ser usada em solos com baixa resistência (argila) e em rochas de alta resistência, como granito e basalto. Devido essa característica, ela é amplamente utilizada, e normalmente o que induz seu uso é a dimensão do túnel, sendo indicada para curtas extensões ou quando não é viável economicamente o uso de TBM, e também quando se deseja seções não circulares, já que atualmente a maioria das tuneladoras não dispõe desse benefício. Ela é mais usada para curtas extensões, pois sua taxa de avanço é menor do que o uso de máquinas, mas em contra partida, a vibração gerada pelos explosivos pode ser um fator crítico. As etapas de construção são perfuração, instalação dos explosivos, detonação, ventilação, jateamento do concreto, transporte do material escavado e por fim execução do revestimento (CHAPMAN, 2010).

A perfuração é feita para a inserção dos explosivos na rocha a ser detonada. Para isso, usa-se uma máquina como na figura 2. Essa máquina faz a perfuração na rocha e a inserção dos explosivos (CHAPMAN, 2010).

Figura 2: Instalação dos explosivos com o uso de maquinário



Fonte: (CHAPMAN, 2010)

A velocidade de perfuração é aproximadamente de um a cinco metros por minuto. Um sistema automatizado localiza os pontos a se perfurar, a fim de garantir exatidão na locação dos pontos, e perfura-se 20 centímetros a mais a fim de corrigir qualquer imprecisão adquirida (CHAPMAN, 2010). Na figura 3 é possível observar em outro ângulo os componentes do equipamento de instalação dos explosivos.

Figura 3: Detalhe equipamento de instalação dos explosivos



Fonte: (CHAPMAN, 2010)

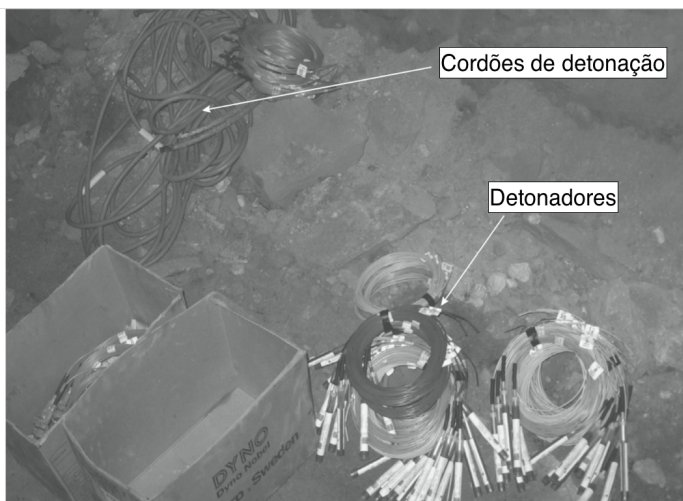
O diâmetro dos furos deve ser definido no Plano de Fogo, projeto em que se dimensiona a quantidade de material explosivo, locação dos mesmos, espaçamentos e outros (CHAPMAN, 2010). Geralmente usam-se diâmetros de 30 a 100 milímetros e o número de furos por metro quadrado diminui com o aumento da seção transversal (CHAPMAN, 2010). Acima de 30 m² o número de furos não diminui significativamente. Adicionalmente, a determinação do número de furos se baseia na taxa de avanço desejada, no tipo de material explosivo e no tipo de solo ou rocha.

A instalação dos explosivos é a inserção dos mesmos nos furos realizados na perfuração. Existem diversos tipos de explosivos, podendo ser em forma de cartucho, gelatina, emulsões, pó, líquidos e outros. Cada tipo possui propriedades como resistência à água, sensibilidade à iniciação (quão fácil é iniciar a detonação), e potencial de detonação (CHAPMAN, 2010).

Na fase de detonação selam-se os furos a fim de diminuir a propagação de poeira e prepara o ambiente para a explosão do maciço rochoso. A detonação é um processo perigoso, o qual gera uma reação

química que pode atingir velocidades a cima de 8000 m/s. Elevadas temperaturas e pressões geram uma quantidade grande de gás, o qual colide com as paredes do furo fazendo com que a rocha seja demolida pelo alto impacto. Além do desmanche, fissuras no maciço podem ser geradas pela vibração da detonação. Por questões de segurança, usa-se explosivos com baixa sensibilidade de iniciação, para que não haja detonação não intencional (CHAPMAN, 2010). Por isso, faz-se uso de detonadores elétricos ou cordões de detonação, pois oportuniza o trabalho a distância. O consumo de explosivos, segundo Kolymbas, D. (2005) pode variar entre 0.3 to 4.5 kg/m³. Na Figura 4 encontra-se uma imagem de cordões de detonação e detonadores.

Figura 4: Cordões de detonação (*Blasting cord*) e detonadores elétricos (*Detonators*)



Fonte: (CHAPMAN, 2010)

A ventilação mecanizada da área escavada deve ser feita durante pelo menos 15 minutos após a explosão e os trabalhos no local devem ser interrompidos (NYGAARDSVOLL, 2014). Ela é feita com o auxílio de dutos de ar e ventiladores instalados ao longo do túnel. Um controle da qualidade do ar deve ser feito, já que com a explosão, gases tóxicos como o CO (monóxido de carbono) são liberados. Recomenda-se que esses dutos transportem esses gases para pelo menos 30 metros a frente da face de escavação (CHAPMAN, 2010). O custo do sistema de ventilação é previsto desde o início da construção, e quando a extensão é

considerada grande, procede-se executando canais permanentes de ventilação vertical.

Após a preparação e detonação da face rochosa, vem a etapa de transporte do material escavado. Devido à pequena área transversal em comparação com a extensão do túnel, faz-se necessário organizar esse transporte e combinar com as demais frentes de trabalho que acontecem simultaneamente (NYGAARDSVOLL, 2014). Ele pode ser feito através de caminhões caçamba, os quais são carregados com o material e o mesmo é transportado para um local de “bota-fora” - termo utilizado para despejo do material - o qual pode ser usado para construção de aterro ou vendido para a indústria de concreto. A vantagem desse transporte é que ele pode ser feito em trajetos com inclinação superior a 3% (CHAPMAN, 2010). Outra forma utilizada é o transporte por meio de esteiras, o qual despeja o material da boca do túnel, e então é transportado para o bota fora. Ou ainda, pode-se combinar as duas opções, o que definirá a escolha é disposição de espaços no canteiro e a logística das frentes de trabalho.

Por fim, é feito o acabamento da área escavada com revestimento de concreto. Ele pode ser na forma de concreto jateado (figura 5), concreto moldado *in loco* ou em placas pré moldadas (figura 6). A escolha dependerá de fatores que deverão ser avaliados pelo projetista, como operação e manutenção elétrica e mecânica, segurança e resistência aos carregamentos recebidos do solo ou rocha em volta, e resistência ao fogo (LEGGE, 2006).

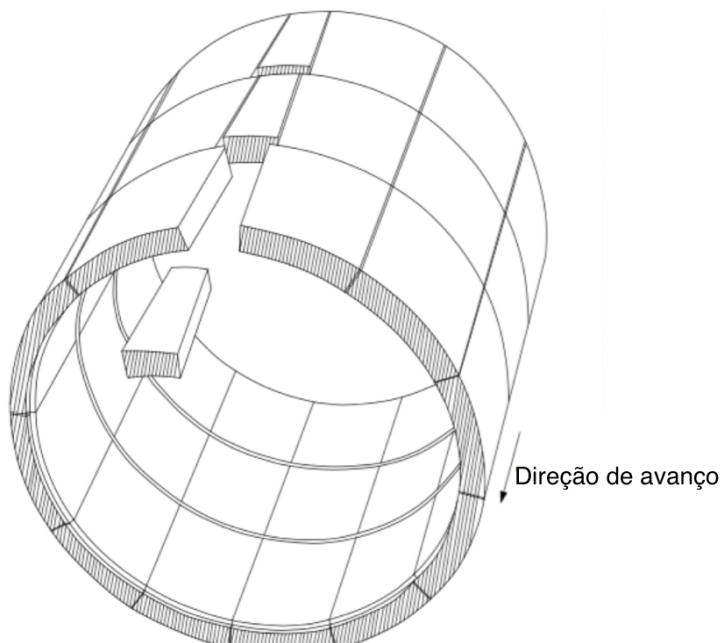
Na Figura 5 observa-se um operário trabalhando no jateamento do concreto nas estruturas de aço já instaladas no túnel. Na Figura 6 encontra-se um esquema da instalação de placas pré moldadas de concreto.

Figura 5: Execução do suporte de um túnel com concreto jateado



Fonte: (CHAPMAN, 2010)

Figura 6: Esquema da montagem de placas pré-moldadas para o suporte do túnel

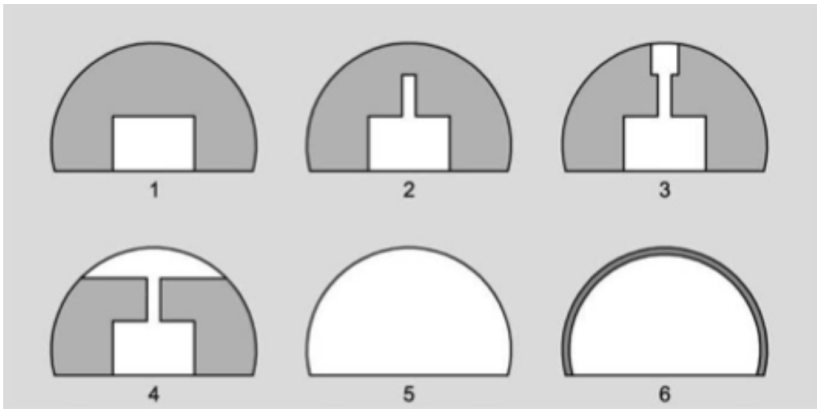


Fonte: (CHAPMAN, 2010)

3.2.2 *New Austrian Tunnelling Method* (OATM)

Esse método se baseia nos princípios do *Drill and Blasting*, com o diferencial na forma da sequência de avanço (NYGAARDSVOLL, 2014). Nas Figuras 7 e 8 é representada as etapas de escavação usadas no método OATM (*Old Austrian Tunnelling Method*), o qual é o método precursor do NATM. Nesse método, iniciava-se a escavação pela porção central da seção e avança verticalmente, até alcançar o topo do túnel. Em seguida, prosseguia-se com a escavação da porção lateral, até finalizar a escavação, etapa 5 na Figura 7. Na etapa 6, encontrava-se o processo de revestimento.

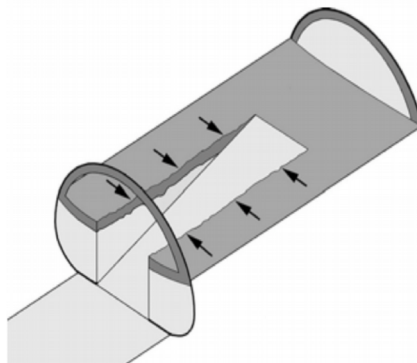
Figura 7: Etapas de escavação usadas no método OATM (vista frontal)



Fonte: (NYGAARDSVOLL, 2014)

Na figura 8 é possível compreender melhor o avanço da escavação pois o esquema mostra o processo em perspectiva. A porção central era escavada em forma de rampa, e então avançava-se até atingir o topo.

Figura 8: Etapa de escavação usada no método OATM (vista em perspectiva)



Fonte: (NYGAARDSVOLL, 2014)

A atualização do método OATM para o NATM foi desenvolvido pelos austríacos Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller e Franz Pacher na década de 50. Eles descobriram que o principal apoio que o túnel possa ter é o próprio solo/rocha. Com isso, puderam reduzir a

camada de revestimento para 20 centímetros, e assim usaram concreto jateado como material (SCHUBERT, 1999).

Em 1978, Müller e Fecker publicaram 22 princípios que descrevem o NATM, e alguns deles são:

- O terreno oferece o suporte principal do túnel, e o revestimento é o suporte secundário;
- O revestimento não deve ser instalado demasiadamente tarde ou cedo, e não deve ser muito rígido e nem muito fraco;
- A transferência de esforços do terreno para o suporte deve ser na hora certa;
- A escolha de uma construção de suporte é feita com base no monitoramento de deslocamento;
- O revestimento é feito por concreto jateado;
- O aumento da resistência do suporte é feito com o uso de vigas, reforços de aço e âncoras;
- O túnel é para ser visto como um sistema composto pelo terreno, revestimento e medidas de estabilização;
- Escavação com frente de avanço completa deve ser usada sempre que possível;
- A sequência de escavação é importante para a estabilidade geral;
- Manter uma forma arredondada para a seção transversal
- O revestimento do chão também deve ser fino e haver um sistema de transferência de cargas das paredes sem atrito;

Complementando os princípios definidos pelos autores, o que classifica um túnel que não foi construído usando o NATM é:

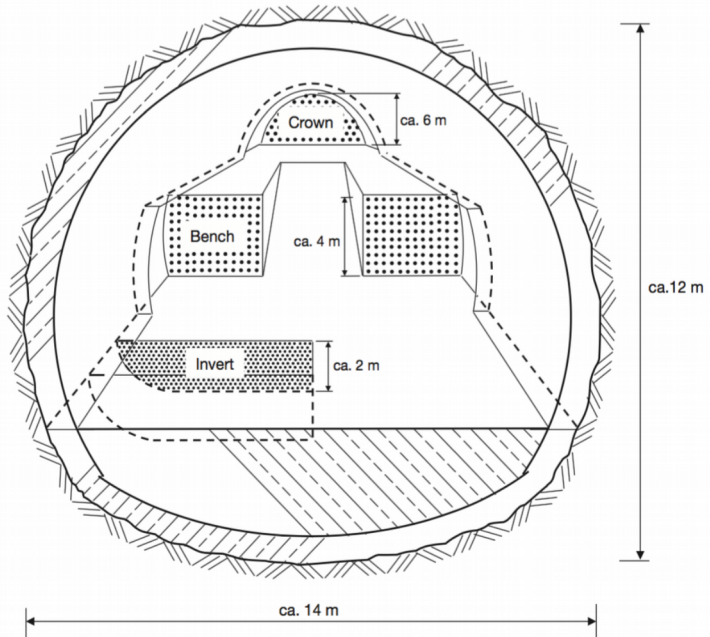
- Uso de TBM;
- Suporte por estruturas segmentadas (Aço, concreto, etc...);
- O não uso de suporte ao longo do túnel;
- Uso de um método não flexível para o suporte.

Métodos que não usam essas características do NATM, mas usam o concreto jateado como revestimentos são conhecidos por “*sprayed concrete lining*” - revestimento com concreto projetado (CHAPMAN, 2010).

Para que possa se usar o NATM na construção de um túnel, o subsolo deve possuir uma capacidade de auto sustentação mínima, entre pelo menos o período entre a escavação e de instalação do suporte. A escavação pode ser feita por detonação, como explicado anteriormente, por tuneladoras parciais (a face de corte da máquina não abrange toda a seção transversal), ou uma máquina escavadora simples. A escolha da forma é dada pelas condições do solo (CHAPMAN, 2010).

Na figura 9 pode-se observar as diferentes faces de escavação do método apresentado.

Figura 9: Etapa de escavação usada no método NATM (vista em perspectiva)



Fonte: (CHAPMAN, 2010)

As etapas de construção são:

- Escavação;
- Vedação do solo (se necessário);
- Remoção do material escavado;
- Instalação das malhas de aço para receber o concreto projetado e colocação de estruturas adicionais se necessário;
- Colocação de mais camadas de reforço, se necessário;
- Construção do revestimento externo.

A Figura 10 mostra o canteiro da obra de um túnel em fase de escavação usando a técnica NATM.

Figura 10: Escavação em andamento (NATM)

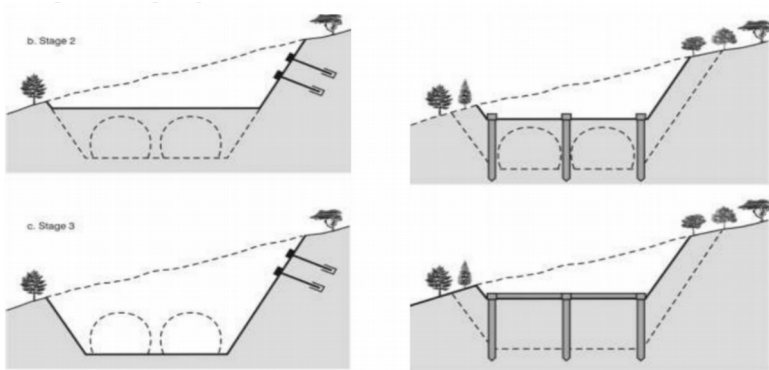


Fonte: (CHAPMAN, 2010)

3.2.3 *Cut-and-cover*

Esse método é usado para profundidades de até 25 ou 30 metros, pois a construção é feita por escavação a céu aberto e posteriormente execução da cobertura (NYGAARDSVOLL, 2014). É muito usada para construção de galerias, túneis rodoviários e para metrô, e pode ser considerada a técnica mais simples aqui abordada. A contenção das paredes pode ser feita por meio de tirantes, cortinas de estacas ou taludes (OLIVEIRA, 2012), como na Figura 11:

Figura 11: Paredes atirantadas no talude para construção de túnel com método *Cut and Cover*



Fonte: (OLIVEIRA, 2012)

Usando-se essa técnica, é possível diminuir riscos de acidentes nas escavações se comparado com as outras técnicas (CHAPMAN, 2010). Segundo (WISNIEWSKI; MUNFAH, 2009), as vantagens de se construir usando a técnica *Cut and Cover* é a fácil execução e alocação e acessibilidade das máquinas no canteiro e o baixo custo de execução comparado aos outros métodos, e a desvantagem é a impossibilidade de uso do solo até finalizar a construção. Isso pode ser um problema para regiões urbanas de tráfego intenso de veículos.

3.2.4 *Tunnel Boring Machine (TBM)*

Essa técnica utiliza uma máquina de seção circular que pode trabalhar em diversos tipos de solo e rochas. Suas dimensões podem chegar a diâmetros de quase 20 metros (NYGAARDSVOLL, 2014). É uma opção melhor vista do que a *Drill and Blast* pois os ruídos e perturbações são menores, sendo uma boa indicação para áreas urbanas (NYGAARDSVOLL, 2014). Contudo, o custo de implantação da máquina é muito elevado, estando ligado o critério financeiro com o comprimento do túnel (NYGAARDSVOLL, 2014). A Figura 12 ilustra uma tuneladora do tipo TBM.

Figura 12: Modelo de uma TBM



Fonte: (NYGAARDSVOLL, 2014)

Uma tuneladora é cara para se construir, difícil de transportar e requer pessoas capacitadas suficientemente para operá-las. Além disso, é recomendada para terrenos como argila dura, areia compacta e rochosa pelo fato de possuírem sua estabilidade assegurada pela resistência do terreno a ser escavado (SANTOS, 2012). Contudo, é possível encontrar modelos que são dimensionados para o uso em diversos tipos de estratos encontrados na mesma obra (HERRENKNECHT, 2015).

Seus sistemas de funcionamento podem ser divididos em quatro partes: sistema de corte, sistema de avanço, remoção de material escavado e sistema de suporte (MAIDL, 2008).

O sistema de corte é o mais importante, pois é onde se determina o desempenho da tuneladora. Nele estão alocados os discos de corte, os quais são feitos de um material de alta resistência (como por exemplo, carbetos de tungstênio), e conseqüentemente representando um alto custo no valor final da obra (NYGAARDSVOLL, 2014). Esses discos giram contra a face de escavação gerando um bulbo de pressão superior ao da resistência da rocha ou solo, ocasionando a quebra e fratura da face. O arranjo de distribuição dos discos, bem como o diâmetro e força aplicada por eles é dimensionado com base nas características do solo e da taxa de avanço desejada.

No sistema de avanço encontramos os componentes hidráulicos que geram a pressão necessária para o sistema de corte atuar e os

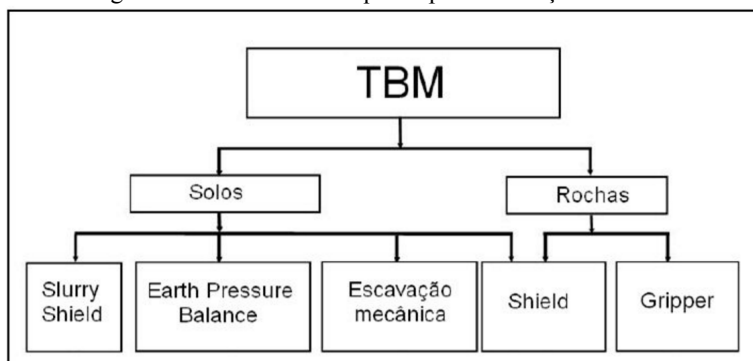
componentes que fazem a tuneladora avançar ao longo do eixo de corte. Durante o corte, esse sistema impulsiona o escudo frontal contra a face a ser escavada, portanto deve ser forte o suficiente para suportar os momentos gerados no corte. Após o corte, o sistema usa as paredes do túnel como apoio para impulsionar a tuneladora avante e começar um novo ciclo de corte (MAIDL, 2008).

O sistema de transporte do material escavado é basicamente o que foi mencionado na técnica do *Drill and Blast*. O material pode ser transportado por esteiras até o fim da tuneladora, e depois pode-se usar caminhões caçamba, caçambas em trilhos de trem ou também por esteiras instaladas ao longo do túnel. Problemas encontrados nesse sistema é que é possível existir fragmentos de rocha muito grandes para se transportar por esteiras, ou material muito líquido (MAIDL, 2008).

Por fim, temos o sistema de suporte. Em regiões de falhas geológicas, ou solos de baixa resistência pode-se encontrar tempos de auto sustentação menores do que em rochas maciças sem falhas (NYGAARDSVOLL, 2014). Por isso, reforça-se a importância de se conhecer as características do material que se está escavando. Com base nessas informações, decisões como o tipo de revestimento e tempo sem revestimento ou estruturas de sustentação são tomadas (MAIDL, 2008).

Para a escavação, existem diversos tipos de *Cutterhead* - cabeça de corte - pois para cada tipo de solo existem condições de trabalho diferentes. Na figura 13 encontra-se um esquema com os variados tipos de máquinas utilizadas na escavação de túneis (PEREIRA, 2014).

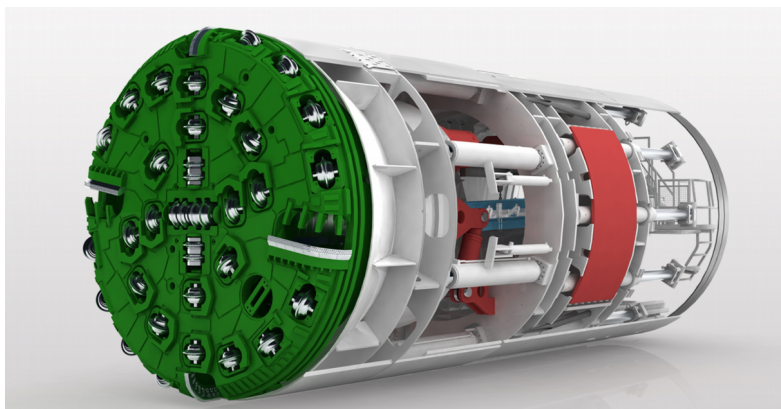
Figura 13: Modelos de máquinas para escavação de túneis



Fonte: (PEREIRA, 2014)

Em máquinas com frente de escavação inteira, encontramos dois tipos, as *Gripper TBMs* e as *Shield TBMs*. As *Gripper TBMs* são caracterizadas como “abertas”, já que são destinadas à terrenos com tempo entre médio e alto de auto sustentação e então não envolvem totalmente a parte já escavada (MAIDL, 2008). Para o avanço, a tuneladora exerce uma pressão radial contra as paredes do túnel através dos *Grippers*, componente vermelho na lateral da máquina ilustrado na Figura 14 (MAIDL, 2008):

Figura 14: Modelo de uma máquina *Gripper*



Fonte: (HERRENKNECHT, 2015)

As outras *Grippers* podem ser classificadas em:

- *Open TBM* (TBM abertas): são TBM's sem revestimento estático atrás da cabeça de corte e hoje em dia são encontradas em diâmetros menores (MAIDL, 2008);
- TBM com *Shield* na parte superior: são TBM's abertas, mas com uma proteção na parte superior da seção posterior à cabeça de corte. Ela serve pra prevenir acidentes de deslocamentos de rochas durante a escavação (MAIDL, 2008). Na figura 15, pode-se observar um exemplo:

Figura 15: Modelo de TBM com *Shield* na parte superior



Fonte: (HERRENKNECHT, 2015)

- TBM com *Shield* na parte superior e apoios laterais para avanço: é o mesmo modelo anterior com apoios na lateral que agem na propulsão da máquina através da aplicação de força na mesma direção de avanço da escavação. Portanto, esse modelo possui dois mecanismos de avanço (MAIDL, 2008).
- TBM com *Shield* de cabeça de corte: esse modelo oferece uma área de proteção maior aos operários da frente de corte da máquina (MAIDL, 2008).

Outro tipo de máquina que é usada na escavação de túneis é o *Shield TBM*, o qual possui como característica principal uma maior área de contato com a seção transversal escavada. Por isso, é mais indicada para solos ou rochas com um menor tempo de auto sustentação. Existem duas classificações para esse modelo, as TBMs com *Shield* simples ou duplos (MAIDL, 2008).

Os modelos com *Shield* simples é mais utilizado para rochas rígidas com curto tempo de auto sustentação e em rochas fraturadas. A cabeça de corte não necessariamente é diferente dos sistemas da *Gripper* e esse *Shield* se estende da cabeça de corte até o fim da máquina a fim de proteger os trabalhadores e fornecer suporte temporário para o maciço. A diferença para o último modelo de *Gripper* apresentado, é que o avanço se dá pela aplicação de força diretamente contra o suporte do túnel construído.

O uso de *Shield* duplo é para a mesma finalidade do *Shield* simples. A diferença entre os modelos se dá pela divisão da máquina em dois *Shields*. O primeiro é a cabeça de corte e o segundo é o *Gripper*, e

são ligados por cilindros hidráulicos. O avanço é feito dependendo da condição do maciço que se está escavando. Em situações normais, a aplicação da força para o avanço é dada ao longo da seção radial, e em locais como condições geológicas delicadas, a força pode ser aplicada na estrutura já executada (MAIDL, 2008).

Existem também as tuneladoras com sistemas combinados, como por exemplos em escavações abaixo do nível de água, onde se faz necessário o uso de ar comprimido ou então, sistemas do tipo EPB (Earth Pressure Balance) que fornece um equilíbrio de pressões entre a face a ser escavada e o interior da cabeça de corte (MAIDL, 2008).

Por fim, podemos citar as microtuneladoras, as quais também são usadas para rochas duras, possuindo as mesmas características de máquinas para grandes diâmetros. A diferença, portanto, se dá pela menor dimensão dos diâmetros (MAIDL, 2008).

4. TUNELADORA INOVADORA

Como já explanado anteriormente, o cenário brasileiro atual oferece grandes possibilidades de inovação na área de túneis. A tuneladora BraBo (Brazilian Borer – Perfurador Brasileiro) foi desenvolvida com o objetivo de diminuir custos e aumentar as taxas de avanço (NORONHA ET AL, 2013). Ela é composta por subsistemas acoplados independentes, cada um com uma função específica como detalhado a seguir. A inovação se encontra nos sistemas de corte de rocha e de suporte do túnel. O corte é feito com jato d'água ao invés de discos metálicos, com o qual se espera atingir taxas de avanço de duas a três vezes maiores. O sistema de suporte foi pensando para que o túnel escavado seja revestido por uma estrutura de concreto extrudado. Nas tuneladoras tradicionais isso é feito com concreto projetado, o qual oferece baixas resistências, ou com peças pré-moldadas, com a desvantagem de se necessitar custos de transporte elevados e logística de fabricação.

Essas inovações foram projetadas tanto para escavação em solo como em rocha. O presente estudo foi desenvolvido com base nas escavações em rocha, tendo como diferenças o maior comprimento, e um sistema para remoção de material escavado projetado especialmente para isso.

A máquina pode ser dividida em três principais subsistemas de funcionamento: cabeça de corte, extrusora de concreto e os sistemas adicionais.

4.1 Cabeça de corte

Segundo Noronha et al. (2013), a Cabeça de Corte é o sistema que oferece maiores vantagens competitivas, devido à quantidade de inovações, as quais estão listadas abaixo segundo:

a. A utilização da tecnologia de hidrodemolição no corte do maciço;

b. O sistema de movimentação da Tuneladora BraBo independente de movimentação dos bicos de corte, o que permite um maior controle sobre o processo de corte;

c. Sistema de corte Axial e Transversal;

d. A estrutura colmeada da couraça que possibilita leveza, resistência além de permitir o acesso de tubos à região frontal;

e. A diferença entre os diâmetros interno inicial e final da couraça o que permite a ação e acoplamento do sistema de remoção;

f. O acoplamento em forma de “meia-lua” da couraça frontal com os demais componentes da máquina;

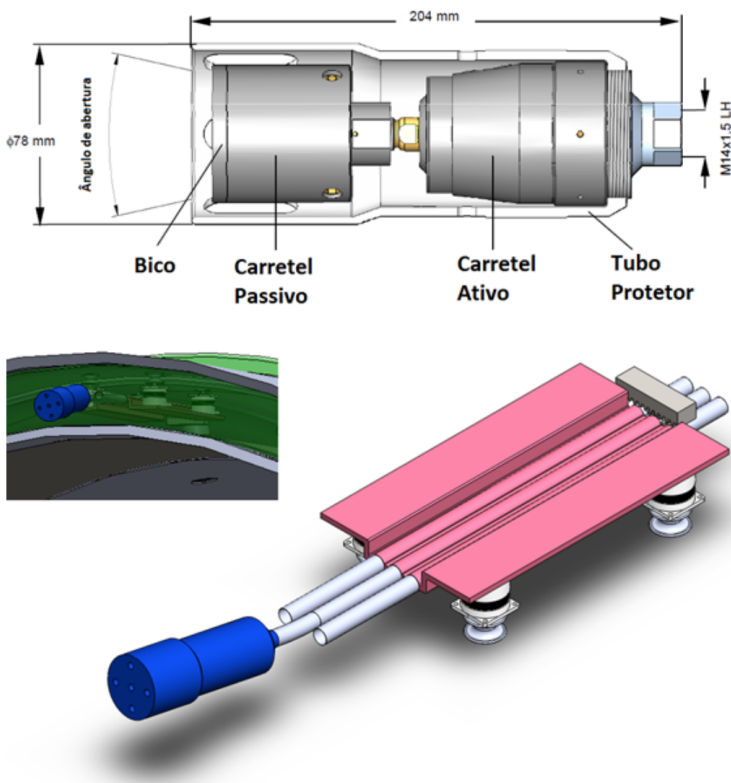
g. Os anéis de vedamento que permitem a movimentação independente dos bicos, ao mesmo tempo em que impedem a inundação do equipamento.

Na cabeça de corte encontram o sistema de corte, de demolição e a coleta do material escavado para que o sistema de transporte carregue o material para o exterior do túnel.

4.1.1 Sistema de corte

O corte da rocha é feito por jato d'água com bombas de elevada potência. Quatro bicos de hidrodemolição estão distribuídos de forma radial, e um quinto está alocado ao centro da face de escavação. A movimentação dos bicos é feita pelas hastes em torno do eixo do túnel, permitindo um alcance de 90° para cada bico. A movimentação se dá de forma translacional pela periferia da seção transversal da máquina. Com isso, é possível um alcance de 100% do perímetro da seção. A Figura 16 ilustra em detalhe o bico do jato de Hidrodemolição, a posição do bico na periferia da seção e a estrutura que suporta o bico.

Figura 16: Componentes do sistema de corte



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

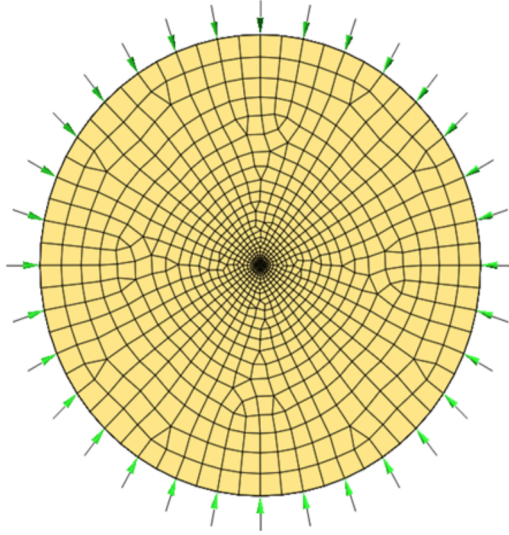
O maciço rochoso é cortado então circularmente de forma anelar e com uma profundidade variável com o tipo de rocha e potência disponível para a bomba. Após esse corte, o sistema de demolição entra em ação.

4.1.2 Sistema de demolição

A área do maciço a ser escavada é demolida por meio de dois procedimentos: o “teste brasileiro” (corte axial) e o “*point load test*” (corte transversal). O teste brasileiro utiliza quatro conjuntos de nove cilindros e uma régua que são dispostos a 90° de defasagem, e o “*point*

load test” utiliza 32 cilindros dispostos ao redor do núcleo rochoso, como mostra a Figura 17.

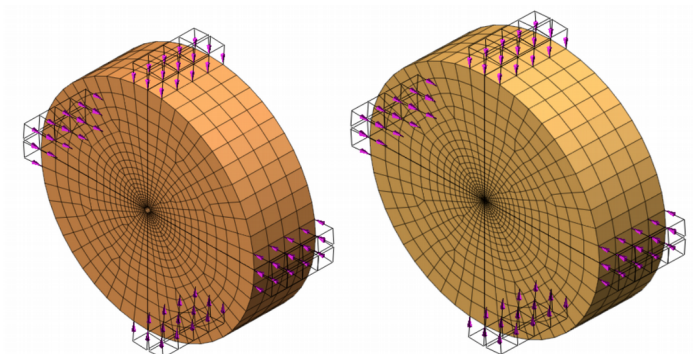
Figura 17: Distribuição das 32 forças no sistema *Point Load*



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

Além disso, um furo central é feito para que a distribuição de forças seja alterada, favorecendo o desmanche. Na Figura 18 é possível observar a aplicação do carregamento na rocha a ser demolida.

Figura 18: Carregamento do duplo ensaio brasileiro em rocha com furo central (à esquerda) e sem furo (à direita)

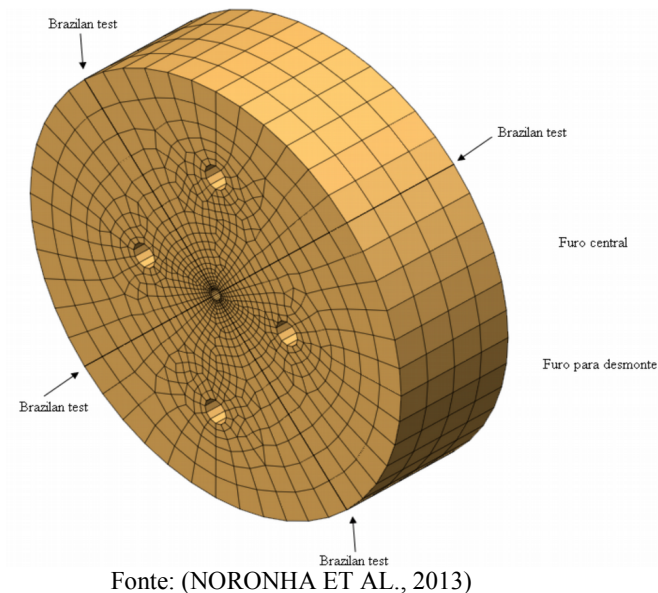


Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

4.1.3 Sistema de demolição completa e transporte de detritos

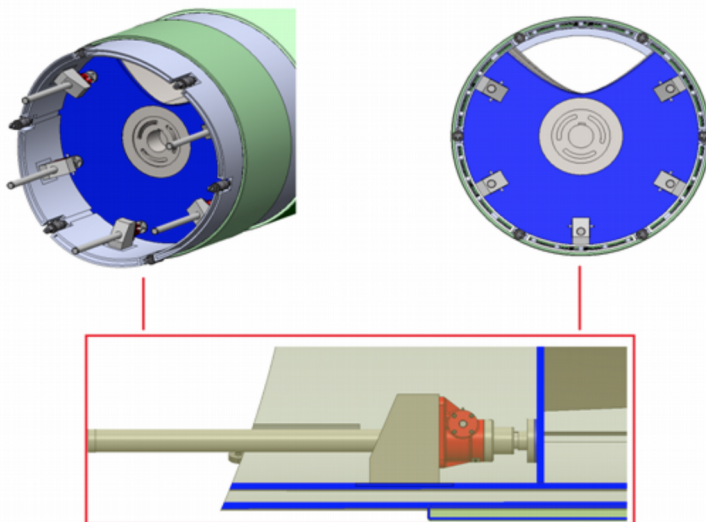
Além dos procedimentos explicados acima, o uso de cilindros expansores é feito para a quebra do maciço. Esse procedimento é realizado para auxiliar no desmonte do maciço. Na Figura 19 é possível observar a locação dos 4 furos na seção.

Figura 19: Posição do teste Brasileiro, furo central e furo para desmonte



A remoção dos detritos é feita pelo disco de remoção, o qual transporta o material da área de demolição, para as esteiras de remoção. Um motor central rotaciona o disco a uma velocidade de 6 rpm (rotações por minuto). Os detritos entram pela cavidade superior, detalhada na Figura 20, e por possuir um formato helicoidal, os detritos são transportados até as esteiras, as quais estão localizadas atrás do disco.

Figura 20: Sistema de movimentação do sistema de remoção de detritos



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

4.1.4 Extrusão de concreto para o revestimento e suporte

Atualmente as principais opções para revestir um túnel são concreto projetado, que reduz custos e também o diâmetro devido ao fato de possuir baixa resistência, e peças pré-moldadas, com a vantagem de se ter uma capacidade de carga e qualidade do material melhor. Contudo, necessitando uma logística de fabricação e transporte para o interior da máquina que fazem esse método tornar-se desvantajoso.

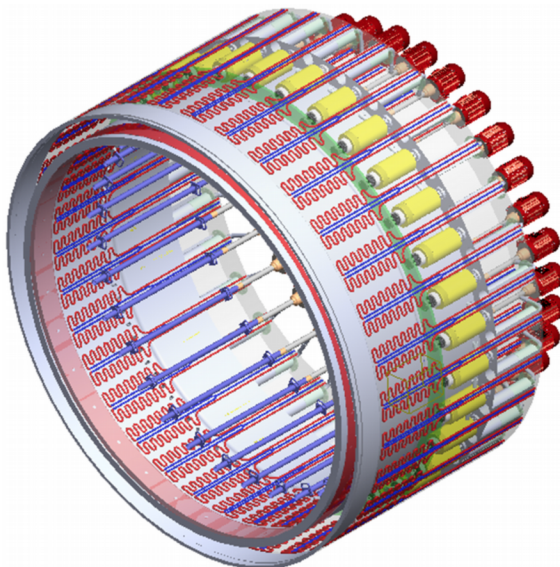
A inovação de se usar concreto extrudado é a união da facilidade de execução da estrutura, como no concreto projetado, e a resistência e qualidade das peças pré-moldadas. A pasta cimentícia é produzida em um misturador, transportada para a região de extrusão e comprimida para o exterior da área de confinamento. Seu sistema funciona como um tubo de pasta de dente, o qual dá formato ao material de acordo com as características do bocal.

Para conferir uma cura rápida, faz parte do processo a adição de um ácido que acelera o endurecimento, o qual está detalhado abaixo. A resistência à compressão pode atingir de 70 a 90 MPa (NORONHA ET AL., 2013).

O processo de extrusão pode ser dividido em cinco etapas, como descrito a seguir:

Etapa 1: A mistura cimentícia é feita em um misturador apropriado e transportado para a câmara de compactação, a qual possui um anel inflável de borracha que permite a pasta entrar na câmara. Injetores de alta pressão adicionam o ácido oxálico à mistura na entrada da câmara, conferindo um endurecimento em um espaço de tempo menor. A figura 21 detalha a posição dos misturadores e injetores. Os componentes em amarelo são os cilindros que fazem o trabalho da compressão da pasta, os componentes vermelho na extremidade direita são os motores que fazem parte do sistema de injeção e as serpentinas em vermelho fazem a troca de calor, partes do sistema de arrefecimento.

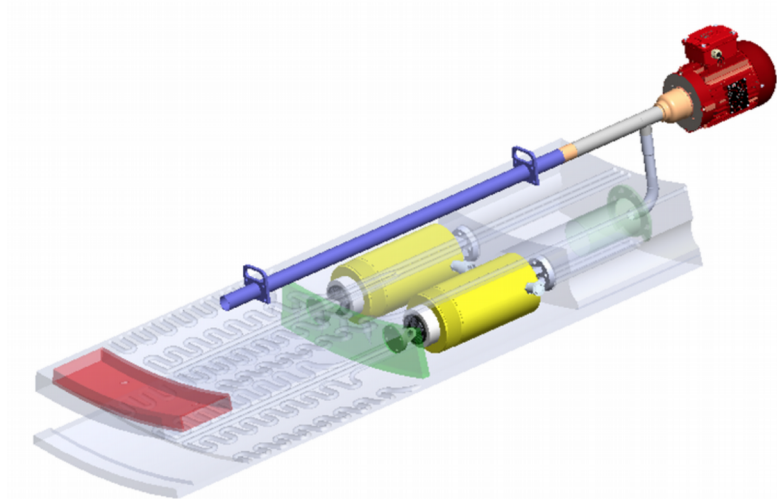
Figura 21: Visão isométrica dos sistemas funcionais da extrusora



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

Na Figura 22 observamos o módulo de extrusão do concreto, com a bomba injetora (em vermelho) para o ácido oxálico, os cilindros (em amarelo) responsáveis pela compressão da pasta e movimentação, e em rosa o anel de borracha.

Figura 22: Módulo de extrusão



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

Etapa 2: Após o preenchimento da câmara de compactação, inicia-se a aplicação da pressão na mistura. O anel de borracha é inflado, a fim de fornecer suporte à massa confinada. Essa pressão é mantida até atingir o valor de 20 MPa. Paralelo a isso, um sistema de arrefecimento é acionado para manter uma temperatura constante de 60 °C (+ - 3°C), pois durante a cura do concreto existe uma liberação de calor, que quando não é controlada, pode gerar problemas de fissuras.

Etapa 3: Nesta etapa, acontece a cura do concreto. O anel é despressurizado e recolhido, abrindo passagem para a saída da peça compactada.

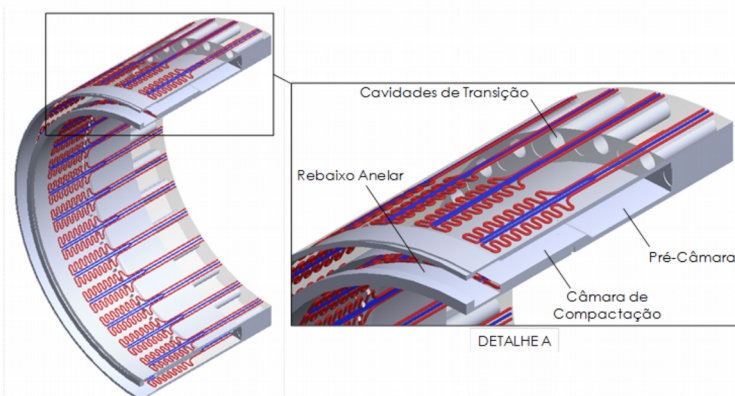
Etapa 4: Após a cura ocorre a desmoldura do extrudado. Os cilindros hidráulicos que aplicaram a pressão de compactação são acionados até o curso máximo, deixando a câmara de compactação vazia e conseqüentemente deslocando a peça de concreto pronta para a posição final, em contato com a peça extrudada anteriormente. Esse deslocamento da peça faz com que a tuneladora avance em direção da escavação.

Etapa 5: O sistema é reestabelecido à configuração inicial. O anel é inflado, os cilindros voltam à posição inicial e a câmara é novamente preenchida com a mistura.

Na Figura 23 observa-se outro detalhe dos componentes desse sistema. É nas cavidades de transição por onde a pasta cimentícia entra,

e onde os cilindros de compressão atuam. A câmara de compactação é o local da compressão da pasta já misturada com o ácido e o rebaixo anelar é onde o anel inflável está alocado.

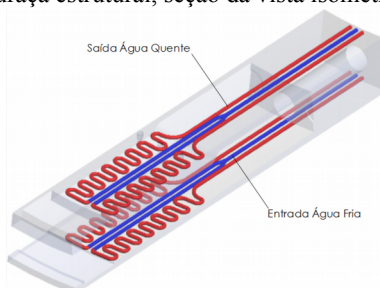
Figura 23: Couraça estrutural, seção da vista isométrica e detalhe A



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

Na Figura 24 observa-se o detalhe do sistema de arrefecimento do concreto. Funciona basicamente por troca de calor com o resfriamento da água por meio de uso de serpentinas e movimentação constante da água durante o uso.

Figura 24: Couraça estrutural, seção da vista isométrica e detalhe B



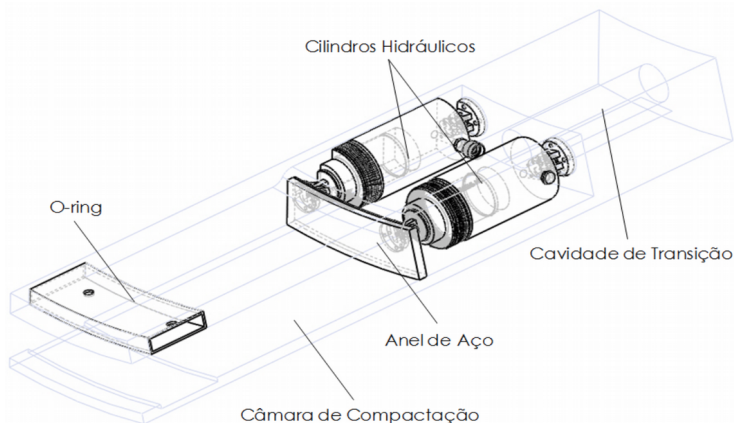
Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

4.1.5 Descritivo do Sistema de Compactação Hidráulico

Esse sistema é responsável por compactar a pasta cimentícia na câmara de compactação. O material é transportado pelo sistema descrito

anteriormente até a câmara. O anel de borracha é pressurizado a fim de manter a cavidade vedada. Os bicos injetores são acionados e os cilindros hidráulicos comprimem a massa até adquirir um concreto compactado. Na Figura 25 é possível visualizar destacada a localização dos cilindros na máquina. O anel de aço se desloca até o anel inflável (*O-ring*) quando os cilindros são acionados por completo.

Figura 25: Módulo de Extrusão: elementos do sistema de compactação



Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

Os cilindros escolhidos são do tipo ENERPAC RC-DUO 756, os quais possuem uma capacidade de 718 kN cada. No total são 32 unidades, gerando uma capacidade final de aproximadamente 23000 kN (2300 toneladas). Além da função de compactar o concreto, os cilindros são responsáveis pelo avanço da máquina na perfuração, justificando a sua elevada capacidade. Ou seja, quando os trabalhos do sistema de demolição estão finalizados, a máquina avança até a frente do maciço, afim de continuar a perfuração.

4.2 Backup

As informações apresentadas até o momento, bem como seus componentes, estão localizadas na cabeça de corte, região dianteira da máquina. Nela encontram-se o Suporte de Escavação, Suprimento de Energia, Transporte de Material, Extrusora de concreto e Componentes. Contudo, a tuneladora com as inovações apresentadas possui uma

extensão de aproximadamente 120 metros. Essa extensão anexada à cabeça de corte se chama backup. No esquema da Figura 26 é possível observar a inter-relação entre os componentes do *Backup* com os sistemas de transporte, ventilação, escavação e suprimento de energia.

Figura 26: Equipamentos usuais no *Backup* de TBM

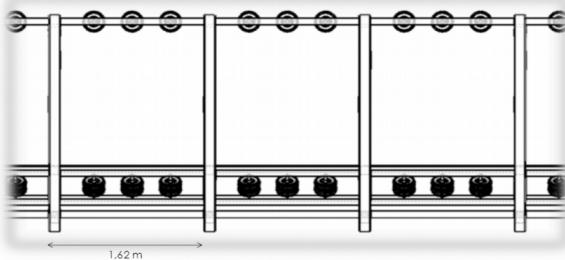


Fonte: (NORONHA ET AL., 2013)

No backup encontram-se máquinas e sistemas de apoio ao funcionamento da TBM. Alguns exemplos de sistema ali presente são: sistema de ventilação, controle acompanhando do funcionamento de todos os sistemas, dentre outros. Além disso, a estrutura metálica circular trabalha no suporte estrutural e também como apoio para a aplicação de força axial resultante do trabalho da cabeça de corte e da extrusora.

A movimentação do backup é feita por um conjunto de 72 rodas acionadas por três motores de 400 cavalos de potência, como a Figura 27 mostra:

Figura 27: Estrutura metálica para o suporte de equipamentos



Fonte: (NORONHA; FARIA, 2013)

Na Tabela 1 é possível entender a relação dos componentes e sistemas presentes no *Backup*. Por exemplo, a Zona de Manutenção presta suporte para todos os sistemas da Tuneladora BraBo, bem como o *Grounting* está relacionado com a Extrusora de Concreto.

Tabela 1: Síntese de equipamento e sistemas do *Backup*

Backup	Tuneladora BraBo				
	Cabeça de Corte	Desmorte Primário	Desmorte Secundário	Remoção e Transporte	Extrusora Concreto
Zona de Manutenção					
Navegação					
Grouting					
Drenagem e Tratamento					
Unidade Bombeamento					
Transportador Sistema HDP 3000					
Misturador Zona Fluidizada					
<i>Common Rail</i>					
Unidade de Hidrodemolição					
Unidade de Potência Hidráulica					
Ventilação e Remoção de Particulados					
Sistema Lubrificação					
Estação de Potência Elétrica					

Fonte: (NORONHA; FARIA, 2013)

5. ESTIMATIVA DE CUSTOS

A AACE (Associação para Desenvolvimento da Engenharia de Custos – *The association for the advancement of cost engineering*) é uma organização mundial com sede nos Estados Unidos e reconhecida pela sua representatividade na área de custos. Sua atuação é na certificação de profissionais e na promoção do conhecimento da Engenharia de Custos através de publicações e seminários.

A estimativa de custos faz parte dos estudos preliminares para a execução de túneis (ALPTRANSIT, 2015). É fator decisivo para escolha de técnicas de construção, análise financeira e econômica, e é um pilar para a Engenharia de Custos e Gerenciamento de Custos (AACE, 1997).

No Brasil não existem ainda nenhum documento que normatiza a elaboração de planejamento financeiro ou estimativa de custo para túneis. Por isso, cada empresa pode usar um método diferente, tornando reduzido o compartilhamento de informações sobre projetos já realizados.

Em outros países, existem iniciativas para formalizar e orientar esse trabalho. Nos Estados Unidos, a AACE desenvolveu uma classificação de estimativa de custos para diversos setores industriais. Na Áustria, a ÖGG (Sociedade Austríaca de Geotecnia) desenvolveu um manual de orientação para estimativa de custos e riscos para obras de infraestrutura. Esses dois materiais são usados por diversos países como modelo pela sua destacada qualidade.

Como ponto de partida, esses dois materiais definem que estimar custos pode ser usado para quantificar qualquer atividade de investimento, como um projeto de um prédio de escritórios ou um software para projetar anfiteatros e os passos da estimativa podem ser divididos em:

- compreender o escopo do projeto para quantificar os recursos necessários;
- levantamento do custo dos recursos;
- ajuste dos preços encontrados;
- organizar os resultados de uma forma que auxilie uma tomada de decisão.

A estimativa não só estabelece um orçamento de projeto, mas desempenha um papel igualmente importante no acompanhamento do orçamento durante a execução do projeto. É a relação entre a estimativa, programação e controle de custos, que normalmente é identificada pelo termo "engenharia de custos" (AACE, 2004).

Uma justificativa para a importância de se desenvolver a Engenharia de Custos e usá-la nos projetos de Engenharia Civil é que se a estimativa não estiver precisa, o retorno financeiro dos investidores pode não acontecer. Por isso, a fim de se otimizar o processo de gerenciamento de um empreendimento, encontra-se como possibilidade um desenvolvimento na área de custos.

5.1 Classificação da diretriz AACE (*Practice No. 17r-97*)

A AACE desenvolveu um manual intitulado "*Recommended Practice for Cost Estimate Classification - AACE 17R-97*" (Prática Recomendada para Classificação de Estimativa de Custo), o qual está, na versão original e em inglês, nos anexos deste trabalho. Ele foi criado para oferecer diretrizes genéricas para estimativa de custo que pudesse ser aplicada em diversos setores. Como objetivos, a associação listou:

- promover um entendimento geral sobre os conceitos envolvidos na estimativa de custos;
- definir e correlacionar as principais características utilizadas para a classificação;
- usar o nível de conhecimento do projeto como característica principal.

Nessa diretriz, a definição do projeto é tomada então, como característica primária, ou seja, a partir dela define-se qual a classe de estimativa será adotada. A classe 5 se refere a um projeto com o nível de conhecimento mais baixo, e a classe 1 com o mais alto.

As características secundárias trazem informações complementares, como a possível finalidade de uso da estimativa, uma margem de erro a se aplicar nos resultados, qual metodologia é melhor de ser usada (estocástica, determinística ou ambas) e o quanto de horas de dedicação deve ser despendidas para cada classe (AACE, 1997).

5.1.1 Definição das características

Como está descrito na tabela 2, cada característica possui informações que geram a estimativa de custo. Nesse modelo, encontra-se um mapeamento das fases e estágios da estimativa, relacionando a maturidade e qualidade das informações e promovendo uma referência

em comum para descrever diferentes estimativas para diferentes tipos de projeto. A seguir descreve-se cada característica do modelo.

Nível de detalhamento do projeto: informações como tipo de técnica de escavação, projetos e desenhos, sondagens e estudos geológicos, informações de projetos já realizados, cálculos dos carregamentos no solo/rocha, documentos em geral compõem o nível de detalhamento e são exemplos de informações relevantes na estimativa de custo para construção de túneis (AACE, 1997). Cada indústria terá uma variabilidade no tipo de informações. Quanto maior a quantidade de informações, melhor para se trabalhar com estimativa (AACE, 1997).

Finalidade: a estimativa de custo do empreendimento pode ser usado para diversas finalidades. Quanto maior o nível de detalhamento do projeto, o uso se torna possível para fins estratégicos e autorização de financiamentos (AACE, 1997).

Metodologia: existem dois grupos de metodologias principais, a estocástica e a determinística. No método determinístico, as variáveis de entrada formam um conjunto conhecido, o qual resultará em um conjunto de saídas (AACE, 1997). No método estocástico, as variáveis são baseadas em eventos aleatórios e que não são medidas direta do que se está medindo, portanto, sujeito a resultados baseados em informações incompletas (AACE, 1997). Com isso, o aumento da definição do projeto faz-se tender com que o uso da metodologia determinística seja preferido.

Intervalo de precisão: é o intervalo que o empreendimento poderá variar dentro do custo estimado (AACE, 1997). Geralmente usa-se porcentagem positiva ou negativa para representar. Com o aumento da definição de projeto, esse intervalo tende a ser mais preciso. Contudo, cada projeto terá condicionantes que poderão fazer esse intervalo variar (AACE, 1997). Na matriz apresentada na tabela 2, o intervalo é representado por um índice, o qual tem como função equalizar o intervalo para a mesma indústria. Por exemplo, se para a construção de um túnel o intervalo seja de 20% para mais ou para menos, o índice irá ajustar esse valor para diversas classes (AACE, 1997).

Esforço para estimar: com o aumento da definição do projeto, o esforço para determinar a estimativa de custo também aumenta, assim como seu custo para o custo final do projeto (AACE, 1997).

Tabela 2: Relação das características com as classes do método AACE

	Características primárias	Características secundárias			
	Nível de definição do projeto	Finalidade do uso	Metodologia	Faixa de precisão	Esforço para preparação
Classe estimada	Expressada em % da definição do projeto	Objetivo da estimação	Método típico de estimativa	Faixa de precisão +/- relativa à melhor faixa do índice 1 (a)	Grau de esforço relativo ao índice de custo 1 (b)
Classe 5	0% a 2%	Seleção e viabilidade	Estocástico ou "bom senso"	Abaixo: -20% to -50% Acima: +30% to +100%	1
Classe 4	1% a 5%	Estudo do escopo ou viabilidade	Essencialmente estocástico	Abaixo: -15% to -30% Acima: +20% to +50%	2 a 4
Classe 3	10% a 40%	Orçamento, autorização ou controle	Misto, mas predominantemente estocástico	Abaixo: -10% to -20% Acima: +10% to +30%	3 a 10
Classe 2	30% a 60%	Controle ou licitação	Essencialmente determinístico	Abaixo: -5% to -15% Acima: +5% to +20%	4 a 20
Classe 1	50% a 100%	Verificação da estimativa ou licitação	Determinístico	Abaixo: -3% to -10% Acima: +3% to +15%	5 a 100

Notas: (a) se o valor do índice "1" representa +10/-5%, então um valor de um índice "10" representa +100%-50%.
(b) se o índice de custo "1" representa 0,005%, então um índice de custo "100" representa 0,5%. O grau de esforço é altamente dependente do tamanho do projeto

Fonte: (AACE, 1997), adaptado pelo autor

5.1.2 Relação e variação das características

Existem diversas e complexas relações que podem ser feitas entre as características dentro das classificações de estimativas. Como mencionado anteriormente, o nível de definição do projeto é a característica principal e as outras variam de acordo com ela. Contudo, de indústria para indústria pode haver grandes diferenças no correlacionamento das características (AACE, 1997).

Na característica de definição do projeto existe uma possível variação de focos no âmbito de definição. Cada indústria terá uma configuração diferente, por exemplo, na montagem de uma tuneladora a definição do projeto está atrelada às configurações do seu uso, no caso as características da obra, como por exemplo o diâmetro do túnel. Ou seja, a definição do projeto pode ser atrelada às respostas já adquiridas para todas perguntas que podem surgir durante a execução do empreendimento (AACE, 2004).

Na finalidade da Estimativa de Custos, pode-se encontrar variações devido aos interessados envolvidos. Por exemplo, se os interessados são órgãos financiadores do projeto, provavelmente o nível de detalhamento das informações e justificativas deverá ser maior, mas se o uso é para orientação do próprio executor, como por exemplo,

empreiteiras, o foco será em veracidade de informações e previsões mais exatas.

Em relação à metodologia a se empregar, encontra-se uma variação grande. Como mencionado, existem dois grandes grupos de metodologias. A estocástica envolve simulação e modelagens simples ou complexas, com base em informações estatísticas e parâmetros técnicos. Já os métodos determinístico envolvem previsões quantitativas, geralmente calculadas pela informação unitária e quantidade (AACE, 1997). Contudo, dois tipos de determinação podem ser usados, pois cada uma trabalha melhor com um tipo de nível de informação.

A variação da estimativa depende do número de informações e do processo de estimativa (AACE, 1997). O estado da tecnologia usada pela indústria também contribua em muito. Esse estado se refere ao nível de conhecimento da indústria sobre o processo de estimativa de custos para seus trabalhos. Número de projetos já realizados anteriormente contribui de forma grandiosa quando a indústria é máquinas tuneladoras, justamente por não se ter um número grande de informações sobre os projetos realizados (confiabilidade por parte das empresas) e pela grande variabilidade de características de cada máquina. Contudo, a qualidade dessas informações sobre o processo e projetos realizados deve ser verificada para se haver uma menor variação na estimativa de custos. Pode-se ocorrer de uma mesma informação, como por exemplo o tipo de geologia, não ser aplicada para duas obras diferentes, pois critérios como diferença da geomorfologia pode ser visto como uma identidade.

Os esforços para estimar custos variam conforme a quantidade de informações disponíveis (AACE, 1997). Quanto mais complexo o projeto for, mais esforços serão demandados. Contudo, a finalidade da estimativa também contribui. No caso de tuneladoras, a estimativa de custos fará com que importantes decisões sejam tomadas, como por exemplo a viabilidade econômica, fazendo com que o máximo de informações detalhadas seja requerido.

6. MÉTODO

O objetivo do presente trabalho é detalhar o quantitativo dos componentes presentes na máquina e também se estimar o custo da compra deles. Para isso, o trabalho foi dividido em fases, as quais estão detalhadas a seguir. A estimativa foi classificada pelas diretrizes da AACE, a qual se baseia no nível de conhecimento do projeto.

Fase 1: como primeira etapa do trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os aspectos teóricos relevantes, dentre os quais pode-se destacar: Construção de túneis, tipos de tuneladoras existentes no mercado, projeto da tuneladora com sistema de corte por jato d'água, estimativa de custos para projetos de máquinas e métodos de estimativa de custos.

Fase 2: Em seguida e com posse de todas as informações do projeto da tuneladora inovadora, estudou-se o funcionamento de todas as partes e principalmente as diferenças propostas pelo projetista. Paralelamente, iniciou-se os trabalhos de orçamentação dos componentes vendidos a pronta entrega. Ao fim, sabendo-se quais componentes teriam que ser fabricados sob medida, orçou-se com empresas do ramo. Por fim, elaborou-se uma planilha com todos os dados obtidos.

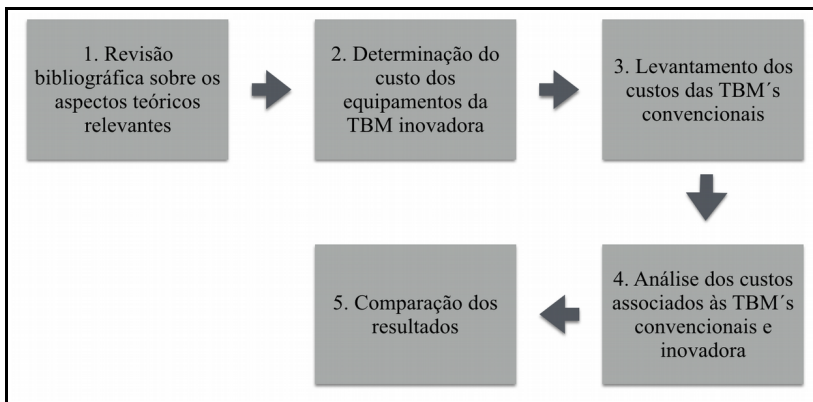
Fase 3: Após as informações da tuneladora inovadora serem obtidas, iniciou-se a busca por informações dos custos das tuneladoras convencionais. Contudo, para que as informações pudessem ser comparadas entre si, houve uma necessidade de parametrizar os valores afim de se obter uma unidade comparativa igual para as duas máquinas. Finalmente, foram esboçados gráficos com as informações obtidas.

Fase 4: Nessa etapa analisou-se as informações obtidas na fase 2 e 3. A análise dos dados dos custos relacionados com cada sistema de funcionamento da TBM BraBo informou qual sistema representa o maior custo da tuneladora. Em relação às tuneladoras convencionais, uma parametrização dos valores foi realizada para melhor comparação entre as informações obtidas. Com os dados das tuneladoras, iniciou-se o processo de aplicação da classificação AACE para conferir o nível de confiabilidade dos dados.

Fase 5: Por fim, com posse dos resultados corrigidos com as margens de erro sugeridas pelo método, fez-se uma análise com os dados e uma discussão sobre a viabilidade financeira em se executar o projeto da tuneladora.

Na Figura 28 é possível conferir a sequência das fases por meio de um fluxograma.

Figura 28: Fluxograma das fases do trabalho



Fonte: (AUTOR, 2015)

7. RESULTADOS

7.1 CUSTOS ESTIMADOS PARA TUNELADORA INOVADORA

Com base no projeto básico da tuneladora, foram orçados cada componente da máquina e estipulado, com base em experiências da equipe de trabalho, os itens que não foram encontrados no mercado brasileiro. Dessa forma, foi possível obter um custo para 100% dos componentes presentes no projeto.

Por questões de estudo e organização, dividiu-se a máquina em 5 partes: 1. Corte primário por jato d'água, 2. Corte secundário, 3. Cabeça de corte (Shield), 4. Extrusão e 5. Backup.

Os custos encontrados para cada parte estão detalhados na tabela a seguir:

Tabela 3: Valores de componentes da Tuneladora inovadora

SISTEMAS	SUB-SISTEMAS	CUSTO	CUSTO TOTAL	
1	Corte primário por jato d'água	Sistema de corte anular	R\$ 1.873.200,00	R\$ 1.873.200,00
		Sistema de corte transversal	R\$ 152.821,68	
2	Corte secundário	Sistema de corte longitudinal	R\$ 205.564,22	R\$ 358.385,90
3	Cabeça de corte (Shield)	Pressão hidráulica (movimentação, compactação, hidráulica e o-ring)	R\$ 232.800,60	R\$ 238.800,60
		Sistema de movimentação	R\$ 6.000,00	
4	Extrusão	Extrusão	R\$ 531.031,00	R\$ 1.086.431,00
		Circuito ácido oxálico	R\$ 550.400,00	
		Circuito O-ring inflável	R\$ 5.000,00	
		Backup	R\$ 241.056,00	
5	Backup	Estação de Potência Elétrica	R\$ 5.000,00	R\$ 266.056,00
		Sistema de resfriamento	R\$ 20.000,00	
		Estrutura TBM	R\$ 130.000,00	
6	Outros	Drenagem	R\$ 32.980,00	R\$ 636.147,40
		Sistema de Grouting	R\$ 68.000,00	
		Sistema de ventilação	R\$ 15.600,00	
		Sistema de remoção	R\$ 352.969,40	
		Sistema de demolição	R\$ 33.600,00	
		Sistema de lubrificação	R\$ 2.998,00	
TOTAL 1			R\$ 4.459.020,90	
7	BDI (Benefícios e despesas indiretas)	30% do custo dos componentes	30%	R\$ 1.337.706,27
TOTAL FINAL			R\$ 5.796.727,17	

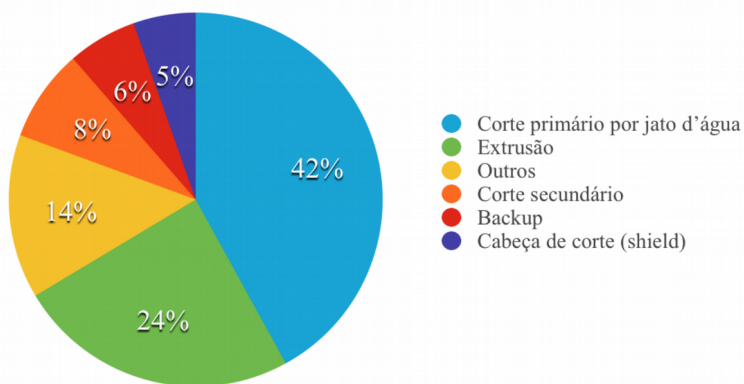
Fonte: (AUTOR, 2015)

O valor encontrado em “TOTAL 1” se refere ao conjunto de componentes constituintes da tuneladora, tanto os vendidos à pronta entrega, como os encomendados sob medida. Contudo, para que se possa comparar com valores de outras tuneladoras, fez-se necessário estabelecer um valor de venda, agregando o BDI (Benefícios e despesas indiretas) da Empresa BraBo, o qual representa custos com montagem, encargos gerais e o lucro. Por este motivo, acrescentou-se 30% do valor referente aos componentes, resultando em um valor final de R\$5.796.727,12.

7.2 DIVISÃO DOS CUSTOS ENTRE OS SISTEMAS

O gráfico da Figura 29 apresenta as porcentagens entre os custos para cada um dos seis sistemas:

Figura 29: Gráfico da divisão dos custos para cada sistema



Fonte: (AUTOR, 2015)

Como se pode observar, os sistemas mais caros foram os de corte primário por jato d'água e a extrusão de concreto. Esses sistemas são os diferenciais em relação às TBM's tradicionais e representam a maior parte do esforço em se construir um túnel, que é a escavação e revestimento.

Infelizmente não se encontrou uma relação de custos entre os sistemas para uma máquina tradicional, e também pelo motivo de se possuir diversos tipos e características individuais entre as tuneladoras, seria difícil fazer uma comparação entre tecnologias e obter resultados confiáveis.

7.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA AACE

Após se obter um valor final de venda da tuneladora inovadora, decidiu-se por conferir se os resultados estão coerentes. Para o presente trabalho, decidiu-se por usar a classificação da AACE, a qual propõe diretrizes para a elaboração de uma estimativa de custos que pode ser usada por diversos setores da indústria. Por ter sido desenvolvida por

uma organização com experiência na área e consolidada no setor, acredita-se que seja a melhor opção.

7.3.1 Nível de projeto - característica primária

O projeto da tuneladora BraBo possui entre 50% e 100% das variantes já definidas. Chegou-se nessa conclusão pelo fato de que todos os componentes já estavam dimensionados para o funcionamento do sistema como um todo. Algumas pequenas variações como a potência de algumas bombas podem ocorrer pelo fato de que até o encerramento desde trabalho não havia resultados dos testes com o protótipo do projeto, e também por ser um projeto básico, alterações são esperadas até se ter o projeto executivo. Portanto, define-se a classe de trabalho como a classe 1.

7.3.2 Finalidade do uso

Pela tabela 2, pode-se usar o resultado final da estimativa como verificação de estimativa, ou então como comprovação de custos para licitações financeiras e concursos diversos. Nesse trabalho, a finalidade se destina a um levantamento de informações para se concluir sobre a viabilidade da industrialização da tuneladora com base numa comparação com o valor de compra de outras tuneladoras.

7.3.3 Metodologia

O método sugerido pela AACE é o determinístico, a qual preza por informações quantitativas. Nesse caso, por ser objetivar uma estimativa de custos para um grupo de componentes, usou-se apenas o valor unitário de cada peça, considerando custos com impostos e transporte até o local de montagem da tuneladora. Custos com montagem, equipamentos de apoio para confecção e outros foram incluídos no valor final estimado da máquina por meio do BDI.

7.3.4 Faixa de precisão

A faixa de precisão varia de acordo com a classe em que se está trabalhando. Na Classe 1 tem-se que o valor final possa variar de 3% a 10% para baixo e 3% a 15% para cima (AACE, 1997). Na Tabela 4 encontra-se os valores finais com essas correções.

Tabela 4: Correção do valor de venda da tuneladora inovadora com base nas diretrizes da AACE

Valor sem correção	Margem de erro negativa	Valor com correção
R\$ 5.796.727,17	-10%	R\$ 5.217.054,45
	-3%	R\$ 5.622.825,35
	Margem de erro positiva	
	3%	R\$ 5.970.628,99
	15%	R\$ 6.666.236,25

Fonte: (AUTOR, 2015)

Com isso, encontra-se que o valor de venda da tuneladora inovadora está entre R\$ 5.217.054,45 e R\$ 6.666.236,25.

7.3.5 Esforço para preparação

O esforço a se desprender em uma estimativa de custos varia diretamente com o tamanho do projeto. Segundo a AACE, pode haver uma variação de 600 a 6000 horas para uma estimativa de um projeto que custa 20 milhões de dólares e que se trabalha na Classe 1. Nesse trabalho, foi dedicado aproximadamente 50 horas para o levantamento dos valores dos componentes. Chegou-se a esse resultado contabilizando as horas despendidas para o entendimento do projeto, definição dos componentes e orçamento de cada um.

A fim de se analisar se essas 50 horas foram suficientes para os resultados encontrados, comparou-as com o exemplo de referência da AACE. Considerando a cotação do dólar de R\$ 3,77 (cotação para o dia 03/11), temos que o valor equivale a U\$ 1.383.834,07 a U\$ 1.768.232,43. Esses valores representam 6,9% e 8,8% do valor de referência do método (U\$ 20.000.000,00).

Comparando a variação de 600 a 6000 horas com as respectivas variações dos valores, encontrou-se que as horas despendidas para a estimativa deste trabalho variaria entre 41,5 a 530,5 horas, como detalha a Tabela 5:

Tabela 5: Comparação de horas dedicadas segundo a AACE

Valor estimado do projeto (R\$)	Valor estimado do projeto (U\$)	Porcentagem representante	Variação de horas dedicadas	
R\$ 75.400.000,00	\$20.000.000,00	100,0%	600	6000
R\$ 5.217.054,45	\$1.383.834,07	6,9%	41,5	415,2
R\$ 6.666.236,25	\$1.768.232,43	8,8%	53,0	530,5

Fonte: (AUTOR, 2015)

Como mencionado anteriormente, o total de horas despendidas nesse trabalho foi de aproximadamente 50 horas. Com isso, concluiu-se que a estimativa se enquadra realmente na classe 1 e que as características secundárias então de acordo com o proposto pela metodologia da AACE.

7.3.6 Análise dos resultados do método aplicado

Resumindo-se os resultados obtidos com o método escolhido, tem-se que a classe de estimativa para esse projeto é a 1, a qual se refere ao nível máximo de estimação de custo. Nela tem-se mais da metade das informações relativas ao projeto.

A finalidade dessa estimativa é uma análise de viabilidade econômica em se produzir industrialmente. Para que esse ponto seja alcançado, faz-se necessário comparar a margem dos valores obtidos com valores reais de mercado de outras tuneladoras.

A metodologia usada para o levantamento foi a determinística, que usa variáveis de entrada que formam um conjunto conhecido, o qual resultará em um conjunto de saídas como resultado. Nesse trabalhou, multiplicou-se a quantidade de componentes pelo preço unitário de cada um.

Na faixa de precisão aplicaram-se as porcentagens sugeridas pela AACE e encontrou-se uma margem de erro do valor de venda da tuneladora.

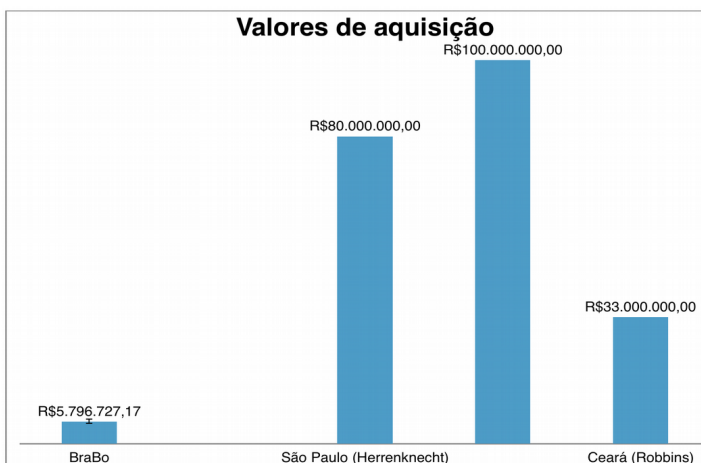
Por fim, para o esforço de preparação encontrou-se um valor de 50 horas que está dentro dos limites esperados (41,5 a 530,5 horas). Esse valor está próximo do limite inferior (41,5 horas), pois se refere a um projeto de valor baixo, se comparado com o referencial de \$ 20.000.000,00 da AACE.

7.4 COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DE TUNELADORAS

Após o levantamento dos custos para a tuneladora inovadora e a aplicação da metodologia da AACE para estimativa de custos, encontrou-se uma margem para o valor final da máquina. Para que fosse atingido o objetivo do trabalho, buscou-se os valores pagos pelas tuneladoras usadas nas construções dos metros de São Paulo (Linha 4-Amarela), Rio de Janeiro (Barra da Tijuca – Ipanema) e Fortaleza (Linha Leste) para que fosse possível gerar um comparativo entre os valores de compra das máquinas.

Na Figura 30 é possível observar os valores pagos pela aquisição das tuneladoras. Optou-se por comparar com essas máquinas pois são equipamentos comprados para o uso no Brasil, facilitando a análise por não se adentrar em custos de importação. A tuneladora usada no Rio de Janeiro custou R\$ 100.000.000,00 (ALMEIDA, 2013), a de São Paulo R\$ 80.000.000,00 (PINTO, 2014) e a de Ceará R\$ 33.000.000,00 (COLAÇO, 2015).

Figura 30: Gráfico dos valores de aquisição das tuneladoras



Fonte: (AUTOR, 2015)

Além disso, um ponto importante a se destacar é a grande diferença entre os valores apresentados acima, o qual se relaciona com o diâmetro de cada caso. Na Tabela 6 é possível conferir os dados de cada tuneladora usada na comparação.

Tabela 6: Informações de cada tuneladora

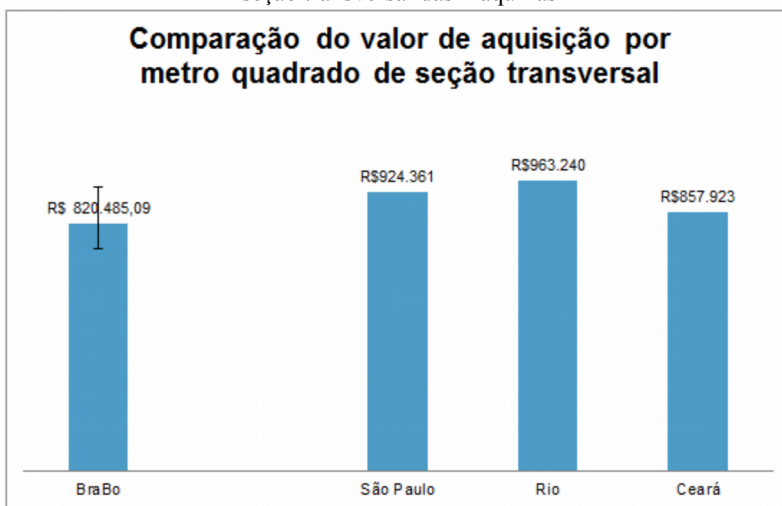
TBM	Valor	Diâmetro (m)	Área (m ²)
BraBo	R\$ 5.796.727,17	3	7,1
São Paulo	R\$ 80.000.000,00	10,5	86,5
Rio	R\$ 100.000.000,00	11,5	103,8
Ceará	R\$ 33.000.000,00	7	38,5

Fonte: (AUTOR, 2015)

Para que fosse viável uma comparação, usou-se um artifício de parametrização dos valores. Acredita-se que o diâmetro das tuneladoras fosse a variável mais influenciadora em um valor final de máquina. Com isso, obteve-se uma unidade de comparação de R\$/m² (reais por metro quadrado da seção transversal da tuneladora).

Na Figura 31 é possível observar o gráfico que representa a comparação entre as tuneladoras com valores parametrizados.

Figura 31: Gráfico da comparação do valor das tuneladoras em relação à área da seção transversal das máquinas

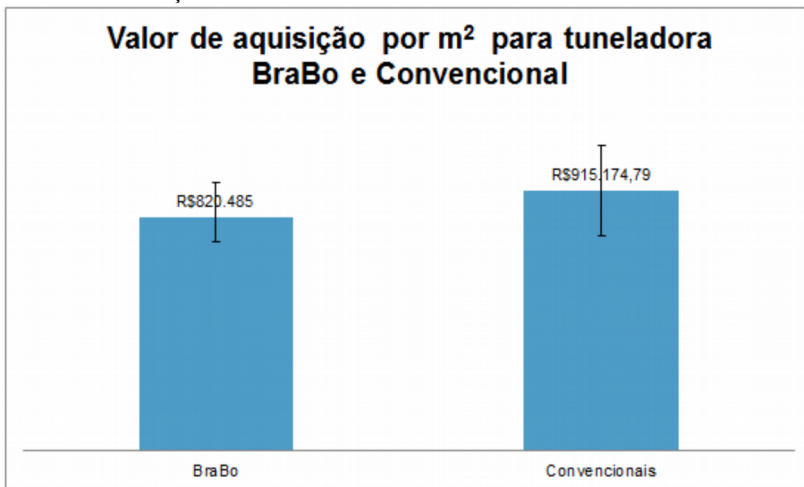


Fonte: (AUTOR, 2015)

Na barra referente à BraBo encontra-se uma margem de erro referente à faixa de precisão da classificação AACE (-10% e +15%)

Para que fosse possível comparar mais clara e diretamente, optou-se por fazer uma média entre os valores das tuneladoras convencionais e comparar com o valor da tuneladora inovadora. O gráfico da Figura 32 engloba essas informações.

Figura 32: Gráfico da comparação custo da tuneladora inovadora em relação à área da seção transversal das média das tuneladoras convencionais



Fonte: (AUTOR, 2015)

Para o valor da BraBo, utilizou-se o valor final encontrado na seção 7.1 (R\$5.796.727,12) após a parametrização (R\$ 820.485,00), e a margem de erro encontrada com a aplicação da metodologia da AACE. Para o valor da média das tuneladoras convencionais, calculou-se o desvio padrão em relação às 3 tuneladoras (R\$53.229,74) e aplicou-se uma margem negativa e positiva com o valor de 3 vezes o valor do desvio padrão. Essa regra é conhecida por 99,7 e afirma que com essa multiplicação, 99,7% dos possíveis valores encontrados no mercado estariam dentro da faixa estabelecida (MOORE, 2011).

7.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os valores obtidos para a tuneladora inovadora possui uma diferença de custo como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Comparação dos valores finais

Tuneladoras	Limite inferior	Valor estimado	Limite superior
Brabo	R\$ 738.436,58	R\$ 820.485,09	R\$ 943.557,85
Convencionais	R\$ 755.405,71	R\$ 915.174,79	R\$ 1.074.943,87
Diferença	2,30%	11,54%	13,92%

Fonte: (AUTOR, 2015)

Esses dados garantem que com as condicionantes descritas ao longo do trabalho, como horas de trabalho dedicadas, seria possível executar o projeto da tuneladora com segurança. A margem de erro encontrada para a tuneladora inovadora está dentro dos valores prováveis das tuneladoras convencionais, ou seja, economicamente, a tuneladora inovadora custaria no pior caso o mesmo preço das tuneladoras convencionais.

Refazendo os orçamentos com um maior detalhamento e buscando outros fornecedores, os resultados tenderiam a se aproximar de valor, que se acredita ser ainda mais baixo, se comparado com os modelos convencionais.

Além disso, o funcionamento dessa proposta de tuneladora promete ser mais rápido, impactando em muito nos valores finais da execução de um túnel. Com isso, pode-se concluir que mesmo alcançando valores próximos dos valores das tuneladoras convencionais, essa tuneladora teria um impacto positivo no cenário atual de construção de túneis no Brasil.

8. CONCLUSÃO

Com um notável avanço no ramo da tecnologia nas últimas décadas, as pesquisas e desenvolvimento de inovações tomaram proporções tão grandes que podemos nos surpreender com as novas descobertas. Uma prova disso é o estudo de Corte de Rochas com Jato d'água. No passado, muitos poderiam ser julgados como loucos por acreditar que é possível destruir um material resistente como solo ou rocha usando água.

Contudo, por ser um estudo revolucionário, o contexto em que se enquadra esse tema é abrangente. Várias frentes de pesquisa devem ser assumidas a fim de alcançar a aplicabilidade, desde a parte financeira, passando por impactos ambientais e chegando âmbito técnico da eficiência e viabilidade.

Como o objetivo deste trabalho é levantar custos e informações ligadas a isso, um estudo sobre estimativa de custos foi necessária. Devido às dificuldades apresentadas ao longo do trabalho, optou-se por detalhar os componentes da máquina, bem como seu funcionamento. Com os resultados em mão, desenvolveu-se uma análise da inter-relação de cada custo, seu impacto no preço final, o custo para executar o projeto da tuneladora e um comparativo com os valores de mercado de tuneladoras de outros modelos.

Isso mostrou que as duas inovações principais (extrusão de concreto e jato d'água) representam dois terços (66%) dos custos com os componentes para construção de uma Tuneladora BraBo. Contudo, outra forma de analisar esses resultados é que esse custo de dois terços é responsável por atingir os resultados de produtividade, demonstrando que o investimento maior nessa tecnologia se aplica diretamente ao que ela se propõe: maiores avanços em menores espaços de tempo.

Outro ponto resultante desse trabalho é uma estimativa sobre o montante final do custo dos equipamentos empregados nessa Tuneladora BraBo. Sabendo um valor final é possível desenvolver outros trabalhos para continuar esse avanço tecnológico na construção de túneis.

Foi considerado como nível de conhecimento do projeto a Classe 1 do método AACE. Com isso pode-se garantir que com as informações resultantes do trabalho poderia ser usada para uma viabilidade financeira da execução do projeto e até mesmo como justificativa de custos para uma licitação. Como metodologia de levantamento utilizou a determinística, multiplicando a quantidade de cada componente pelo

preço orçado. Por último, foi possível se certificar que as horas despendidas para o levantamento dos custos estava dentro de uma margem sugerida pela AACE (após a conversão e adequação dos valores devido a diferença de valores, chegou-se a um limite de 41,5 a 530,5 horas, estando as 50 horas despendidas a esse trabalho dentro do esperado).

Após chegar ao valor final de R\$ 5.796.727,17 para executar o projeto da tuneladora inovadora com os todos os encargos já inclusos, foi possível averiguar uma viabilidade financeira na fabricação da máquina. Comparando o valor parametrizado dos valores finais da tuneladora em questão e mais outras três, concluiu-se que o valor final das tuneladoras convencionais pode ser de 2,3% a 13,90% mais caras. Isso significa que é viável economicamente a implantação, já que seu preço final será no máximo praticamente igual aos preços de tuneladoras convencionais.

Contudo, outro fator que garante a tuneladora inovadora ser viável, é a produtividade dela. As taxas de avanço da máquina BraBo se demonstraram ser três vezes maiores do que a tecnologia de corte convencional (PAULO, 2014). Dessa foram, pode-se concluir que com uma taxa de avanço maior na escavação, o tempo de execução será menor e conseqüentemente o custo final da obra será menor. Portanto, usando-se uma tuneladora inovadora para se escavação um túnel, a economia será identificada não só na aquisição da tuneladora, mas principalmente ao longo da construção.

8.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se uma continuação desse trabalho, dedicando mais horas na elaboração dos orçamentos. Isso poderia aproximar os limites da faixa de precisão e garantir resultados mais precisos.

Outro possível ponto a ser desenvolvido nesse trabalho é a parametrização usada. Pode-se existir outras relações entre custo e dimensões físicas das tuneladoras. Como por exemplo, o perímetro da tuneladora inovadora, já que os componentes mais caros (bocais do jato d'água) estão distribuídos ao longo do perímetro.

Além disso, um ponto complementar a da viabilidade financeira da fabricação da máquina, é o custos de operação da tuneladora. Por ela

ser composta por sistemas de inovadores de funcionamento, não se sabe sobre a eficiência energética da máquina.

Por fim, uma quarta sugestão é um estudo e análise de risco do funcionamento da tecnologia inovadora. Investigar os possíveis gargalos no funcionamento dos sistemas poderia classificar a tuneladora em uma escala de produtividade, facilitando a comparação de indicadores, como taxa de avanço, dentre as tuneladoras convencionais e a inovadora.

REFERÊNCIAS

AACE. Skills & Knowledge of Cost Engineering: A Special Publication of AACE International – the Association for the Advancement of Cost Engineering. 5 ed. 2004. 471p.

ALMEIDA, K. Informe linha 4 do metrô, Edição 13 ano 2013, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.metrolinha4.com.br/wp-content/uploads/2013/05/informe13.pdf>>. Acessado em 20 out. 2015.

AMORIN, B; ALEIRA, R, Vizinhos da obra da linha 4 reclama de danos em prédios e problemas na rede de esgoto, Rio de Janeiro, 14 jan. 2015. Disponível em: <www.oglobo.globo.com/rio/vizinhos-da-obra-da-linha-4-reclamam-de-danos-em-predios-problemas-na-rede-de-esgoto-15047477>. Acessado em 21 out. 2015.

BASTOS, M. J. N. A Geotecnia na Concepção, Projeto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Dissertação de Mestrado, 1998, p. 1-166

CASTRO, A. O. Métodos para seleção de tuneladoras e análise numérica de diferentes alinhamentos de túneis sujeitos a altas pressões hidráulicas. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, 2013, 389 p.

CHAPMAN, D. N. M. a. A. S. Introduction to Tunnel to Construction. Volume 3, 2010, 471p.

COLAÇO, J. Dois 'tatuções' chegam até o fim deste mês, 14 mai. 2015, Fortaleza. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/dois-tatucoes-chegam-ate-o-fim-deste-mes-1.1015139>> Acessado em 20 out. 2015.

EFRON, N.; READ, M. “Analysing International Tunnel Costs - An Interactive Qualifying Project” Worcester Polytechnic Institute, 2012. p. 1-108

GLATZ, W. *Multi Mode – TBM*, Herrenknecht , Alemanha. Disponível em: <www.herrenknecht.com/en/innovation/research-

development/machines-components/multi-mode-tbm.html (acessado 21/10/2015)>. Acessado em 21 out. 2015.

GOUDARD, J. P. Why go underground p. 1-24, 2014

HARRIS, W. How tunnels work. Retrieved November 10, 2011, from <http://science.howstuffworks.com/engineering/structural/tunnel.htm>

HM TREASURY. Infrastructure cost review: Measuring and Improving Delivery. HM Treasury, Infrastructure UK, (2014)

KOLYMBAS, D. (2005). Tunneling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunneling. Germany. Springer. p. 89

LEGGEN (2006). 'Tunnel lining design – hard ground'. Course Notes. British Tunnelling Society, Course on Tunnel Design and Construction, University of Surrey, Guildford, UK.

LEYBOLD, I. Gigantesco túnel ferroviário cortando o Gottardo, Zurique, 15 set. 2010. Disponível em: <www.swissinfo.ch/por/gigantesco-tunel-ferroviario-cortando-o-gottardo/28336912>. Acessado em 01 out. 2015.

MAIDL, B.; L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht, Hardrock tunnel boring machines p. 1-350, 2008

MARAGON, P. M. "Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra" p 1-26, 2006

MOORE, David S. A estatística básica e sua prática (Tradução). Rio de Janeiro: LTC, 2011

MOSER, S. R. (2013). Inovações tecnológicas na escavação mecanizada de túneis – tecnologia brabo. Universidade Federal de Santa Catarina – Trabalho de conclusão de curso 152p.

NORONHA, M.; FARIA, P. Modernização na Construção de Túneis Rodoviários Através do Uso de uma Nova Máquina Tuneladora. 5º Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias, 2008. p. 1–12.

NORONHA, M.; FARIA, P.; PIERRI, L.; SANTOS, R.; PACHECO, L. Conception and Design of a Rock TBM. BraBo Tecnologia Inc., Florianopolis, Brasil, 2013, 10 p.

NYGAARDSVOLL, E. "Application of water jet cutting for tunnel boring." p. 1-84, 2014

OLIVEIRA, P. G. C. Execução de túneis com recurso ao método cut and cover. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa p. 1-135, 2012 p. 1-417, 2010

PARKER, H. W. Geotechnical Investigations, Chapter 4 of Tunnel Engineering Handbook, 2nd Edition, edited by Kuesel & King, Chapman & Hall, New York, 1996.

PAULO, I Análise de produtividade de máquinas tuneladoras em rochas duras. Universidade Federal de Santa Catarina, 2014 Trabalho de Conclusão de Curos. 93 p.

PEREIRA, V. M. (2014) Métodos de Execução de túneis – Engenharia Civil – Disciplina de Estruturas de Pontes II – Notas de Aula

PINTO, M. V. Tatução, Rio de Janeiro, 12 mai. 2014. Disponível em: <www.noticias.terra.com.br/brasil/tatucao>. Acessado em 20 out. 2015.

PRITCHARD, J.B. (1974) Ancient Near Eastern Texts, p. 321

SANTOS, S. P. Inovações em túneis rodoviários realizados com a técnica TBM. 2012 p. 10.

SCHUBERT, W. (1999). 'Perspektiven der NÖT. Neue Entwicklungen in der Geotech- nik'. 4. *Stuttgarter Geotechnik Symposium*, Stuttgart, Germany, October, pp. 35–45

SHAFY, S. *The Alpine Mega-Tunnel: Elevator to the Underworld*, 31 dez. 2006, Alemanha. Disponível em: <<http://www.spiegel.de/international/spiegel/the-alpine-mega-tunnel-elevator-to-the-underworld-a-454843.html>> Acessado em 25 out. 2015.

VIEIRA, F. A. M. Execução De Túneis Em NATM (New Austrian Tunneling Method) para obras de saneamento. Universidade Anhembi Morumbi, 2013. 86 p.

WISNIEWSKI, J.; MUNFAH, N. Cut-and-Cover Tunnels, In: National Highway Institute (Org.). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels: Civil Elements. Washington, D.C.: 2009. Publication n. FHWA-NHI-10-034. p. 5/1-5/30

ANEXOS

AACE International Recommended Practice No. 18R-97

**COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM – AS APPLIED IN
ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR
THE PROCESS INDUSTRIES**

TCM Framework: 7.3 – Cost Estimating and Budgeting

Acknowledgments:

Peter Christensen, CCE (Author)
Larry R. Dysert, CCC (Author)
Jennifer Bates, CCE
Dorothy J. Burton
Robert C. Creese, PE CCE
John K. Hollmann, PE CCE

Kenneth K. Humphreys, PE CCE
Donald F. McDonald, Jr. PE CCE
C. Arthur Miller
Bernard A. Pietlock, CCC
Wesley R. Querns, CCE
Don L. Short, II

COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM – AS APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES

TCM Framework: 7.3 – Cost Estimating and Budgeting



February 2, 2005

PURPOSE

As a recommended practice of AACE International, the Cost Estimate Classification System provides guidelines for applying the general principles of estimate classification to project cost estimates (i.e., cost estimates that are used to evaluate, approve, and/or fund projects). The Cost Estimate Classification System maps the phases and stages of project cost estimating together with a generic maturity and quality matrix, which can be applied across a wide variety of industries.

This addendum to the generic recommended practice provides guidelines for applying the principles of estimate classification specifically to project estimates for engineering, procurement, and construction (EPC) work for the process industries. This addendum supplements the generic recommended practice (17R-97) by providing:

- a section that further defines classification concepts as they apply to the process industries;
- charts that compare existing estimate classification practices in the process industry; and
- a chart that maps the extent and maturity of estimate input information (project definition deliverables) against the class of estimate.

As with the generic standard, an intent of this addendum is to improve communications among all of the stakeholders involved with preparing, evaluating, and using project cost estimates specifically for the process industries.

It is understood that each enterprise may have its own project and estimating processes and terminology, and may classify estimates in particular ways. This guideline provides a generic and generally acceptable classification system for process industries that can be used as a basis to compare against. It is hoped that this addendum will allow each user to better assess, define, and communicate their own processes and standards in the light of generally-accepted cost engineering practice.

INTRODUCTION

For the purposes of this addendum, the term process industries is assumed to include firms involved with the manufacturing and production of chemicals, petrochemicals, and hydrocarbon processing. The common thread among these industries (for the purpose of estimate classification) is their reliance on process flow diagrams (PFDs) and piping and instrument diagrams (P&IDs) as primary scope defining documents. These documents are key deliverables in determining the level of project definition, and thus the extent and maturity of estimate input information.

Estimates for process facilities center on mechanical and chemical process equipment, and they have significant amounts of piping, instrumentation, and process controls involved. As such, this addendum may apply to portions of other industries, such as pharmaceutical, utility, metallurgical, converting, and similar industries. Specific addendums addressing these industries may be developed over time.

This addendum specifically does not address cost estimate classification in nonprocess industries such as commercial building construction, environmental remediation, transportation infrastructure, “dry” processes such as assembly and manufacturing, “soft asset” production such as software development, and similar industries. It also does not specifically address estimates for the exploration, production, or transportation of mining or hydrocarbon materials, although it may apply to some of the intermediate processing steps in these systems.

The cost estimates covered by this addendum are for engineering, procurement, and construction (EPC) work only. It does not cover estimates for the products manufactured by the process facilities, or for research and development work in support of the process industries. This guideline does not cover the

significant building construction that may be a part of process plants. Building construction will be covered in a separate addendum.

This guideline reflects generally-accepted cost engineering practices. This addendum was based upon the practices of a wide range of companies in the process industries from around the world, as well as published references and standards. Company and public standards were solicited and reviewed by the AACE International Cost Estimating Committee. The practices were found to have significant commonalities that are conveyed in this addendum.

COST ESTIMATE CLASSIFICATION MATRIX FOR THE PROCESS INDUSTRIES

The five estimate classes are presented in figure 1 in relationship to the identified characteristics. Only the level of project definition determines the estimate class. The other four characteristics are secondary characteristics that are generally correlated with the level of project definition, as discussed in the generic standard. The characteristics are typical for the process industries but may vary from application to application.

This matrix and guideline provide an estimate classification system that is specific to the process industries. Refer to the generic standard for a general matrix that is non-industry specific, or to other addendums for guidelines that will provide more detailed information for application in other specific industries. These will typically provide additional information, such as input deliverable checklists to allow meaningful categorization in those particular industries.

ESTIMATE CLASS	Primary Characteristic	Secondary Characteristic			
	LEVEL OF PROJECT DEFINITION Expressed as % of complete definition	END USAGE Typical purpose of estimate	METHODOLOGY Typical estimating method	EXPECTED ACCURACY RANGE Typical variation in low and high ranges [a]	PREPARATION EFFORT Typical degree of effort relative to least cost index of 1 [b]
Class 5	0% to 2%	Concept Screening	Capacity Factored, Parametric Models, Judgment, or Analogy	L: -20% to -50% H: +30% to +100%	1
Class 4	1% to 15%	Study or Feasibility	Equipment Factored or Parametric Models	L: -15% to -30% H: +20% to +50%	2 to 4
Class 3	10% to 40%	Budget, Authorization, or Control	Semi-Detailed Unit Costs with Assembly Level Line Items	L: -10% to -20% H: +10% to +30%	3 to 10
Class 2	30% to 70%	Control or Bid/Tender	Detailed Unit Cost with Forced Detailed Take-Off	L: -5% to -15% H: +5% to +20%	4 to 20
Class 1	50% to 100%	Check Estimate or Bid/Tender	Detailed Unit Cost with Detailed Take-Off	L: -3% to -10% H: +3% to +15%	5 to 100

- Notes:
- [a] The state of process technology and availability of applicable reference cost data affect the range markedly. The +/- value represents typical percentage variation of actual costs from the cost estimate after application of contingency (typically at a 50% level of confidence) for given scope.
 - [b] If the range index value of "1" represents 0.005% of project costs, then an index value of 100 represents 0.5%. Estimate preparation effort is highly dependent upon the size of the project and the quality of estimating data and tools.

Figure 1. – Cost Estimate Classification Matrix for Process Industries

CHARACTERISTICS OF THE ESTIMATE CLASSES

The following charts (figures 2a through 2e) provide detailed descriptions of the five estimate classifications as applied in the process industries. They are presented in the order of least-defined estimates to the most-defined estimates. These descriptions include brief discussions of each of the estimate characteristics that define an estimate class.

For each chart, the following information is provided:

- **Description:** a short description of the class of estimate, including a brief listing of the expected estimate inputs based on the level of project definition.
- **Level of Project Definition Required:** expressed as a percent of full definition. For the process industries, this correlates with the percent of engineering and design complete.
- **End Usage:** a short discussion of the possible end usage of this class of estimate.
- **Estimating Methods Used:** a listing of the possible estimating methods that may be employed to develop an estimate of this class.
- **Expected Accuracy Range:** typical variation in low and high ranges after the application of contingency (determined at a 50% level of confidence). Typically, this results in a 90% confidence that the actual cost will fall within the bounds of the low and high ranges.
- **Effort to Prepare:** this section provides a typical level of effort (in hours) to produce a complete estimate for a US\$20,000,000 plant. Estimate preparation effort is highly dependent on project size, project complexity, estimator skills and knowledge, and on the availability of appropriate estimating cost data and tools.
- **ANSI Standard Reference (1989) Name:** this is a reference to the equivalent estimate class in the existing ANSI standards.
- **Alternate Estimate Names, Terms, Expressions, Synonyms:** this section provides other commonly used names that an estimate of this class might be known by. These alternate names are not endorsed by this Recommended Practice. The user is cautioned that an alternative name may not always be correlated with the class of estimate as identified in the chart.

CLASS 5 ESTIMATE	
<p>Description: Class 5 estimates are generally prepared based on very limited information, and subsequently have wide accuracy ranges. As such, some companies and organizations have elected to determine that due to the inherent inaccuracies, such estimates cannot be classified in a conventional and systemic manner. Class 5 estimates, due to the requirements of end use, may be prepared within a very limited amount of time and with little effort expended—sometimes requiring less than an hour to prepare. Often, little more than proposed plant type, location, and capacity are known at the time of estimate preparation.</p> <p>Level of Project Definition Required: 0% to 2% of full project definition.</p> <p>End Usage: Class 5 estimates are prepared for any number of strategic business planning purposes, such as but not limited to market studies, assessment of initial viability, evaluation of alternate schemes, project screening, project location studies, evaluation of resource needs and budgeting, long-range capital planning, etc.</p>	<p>Estimating Methods Used: Class 5 estimates virtually always use stochastic estimating methods such as cost/capacity curves and factors, scale of operations factors, Lang factors, Hand factors, Chilton factors, Peters-Timmerhaus factors, Guthrie factors, and other parametric and modeling techniques.</p> <p>Expected Accuracy Range: Typical accuracy ranges for Class 5 estimates are - 20% to -50% on the low side, and +30% to +100% on the high side, depending on the technological complexity of the project, appropriate reference information, and the inclusion of an appropriate contingency determination. Ranges could exceed those shown in unusual circumstances.</p> <p>Effort to Prepare (for US\$20MM project): As little as 1 hour or less to perhaps more than 200 hours, depending on the project and the estimating methodology used.</p> <p>ANSI Standard Reference Z94.2-1989 Name: Order of magnitude estimate (typically -30% to +50%).</p> <p>Alternate Estimate Names, Terms, Expressions, Synonyms: Ratio, ballpark, blue sky, seat-of-pants, ROM, idea study, prospect estimate, concession license estimate, guesstimate, rule-of-thumb.</p>

Figure 2a. – Class 5 Estimate

CLASS 4 ESTIMATE	
<p>Description: Class 4 estimates are generally prepared based on limited information and subsequently have fairly wide accuracy ranges. They are typically used for project screening, determination of feasibility, concept evaluation, and preliminary budget approval. Typically, engineering is from 1% to 15% complete, and would comprise at a minimum the following: plant capacity, block schematics, indicated layout, process flow diagrams (PFDs) for main process systems, and preliminary engineered process and utility equipment lists.</p> <p>Level of Project Definition Required: 1% to 15% of full project definition.</p> <p>End Usage: Class 4 estimates are prepared for a number of purposes, such as but not limited to, detailed strategic planning, business development, project screening at more developed stages, alternative scheme analysis, confirmation of economic and/or technical feasibility, and preliminary budget approval or approval to proceed to next stage.</p>	<p>Estimating Methods Used: Class 4 estimates virtually always use stochastic estimating methods such as equipment factors, Lang factors, Hand factors, Chilton factors, Peters-Timmerhaus factors, Guthrie factors, the Miller method, gross unit costs/ratios, and other parametric and modeling techniques.</p> <p>Expected Accuracy Range: Typical accuracy ranges for Class 4 estimates are -15% to -30% on the low side, and +20% to +50% on the high side, depending on the technological complexity of the project, appropriate reference information, and the inclusion of an appropriate contingency determination. Ranges could exceed those shown in unusual circumstances.</p> <p>Effort to Prepare (for US\$20MM project): Typically, as little as 20 hours or less to perhaps more than 300 hours, depending on the project and the estimating methodology used.</p> <p>ANSI Standard Reference Z94.2-1989 Name: Budget estimate (typically -15% to + 30%).</p> <p>Alternate Estimate Names, Terms, Expressions, Synonyms: Screening, top-down, feasibility, authorization, factored, pre-design, pre-study.</p>

Figure 2b. – Class 4 Estimate

CLASS 3 ESTIMATE	
<p>Description: Class 3 estimates are generally prepared to form the basis for budget authorization, appropriation, and/or funding. As such, they typically form the initial control estimate against which all actual costs and resources will be monitored. Typically, engineering is from 10% to 40% complete, and would comprise at a minimum the following: process flow diagrams, utility flow diagrams, preliminary piping and instrument diagrams, plot plan, developed layout drawings, and essentially complete engineered process and utility equipment lists.</p> <p>Level of Project Definition Required: 10% to 40% of full project definition.</p> <p>End Usage: Class 3 estimates are typically prepared to support full project funding requests, and become the first of the project phase "control estimates" against which all actual costs and resources will be monitored for variations to the budget. They are used as the project budget until replaced by more detailed estimates. In many owner organizations, a Class 3 estimate may be the last estimate required and could well form the only basis for cost/schedule control.</p>	<p>Estimating Methods Used: Class 3 estimates usually involve more deterministic estimating methods than stochastic methods. They usually involve a high degree of unit cost line items, although these may be at an assembly level of detail rather than individual components. Factoring and other stochastic methods may be used to estimate less-significant areas of the project.</p> <p>Expected Accuracy Range: Typical accuracy ranges for Class 3 estimates are -10% to -20% on the low side, and +10% to +30% on the high side, depending on the technological complexity of the project, appropriate reference information, and the inclusion of an appropriate contingency determination. Ranges could exceed those shown in unusual circumstances.</p> <p>Effort to Prepare (for US\$20MM project): Typically, as little as 150 hours or less to perhaps more than 1,500 hours, depending on the project and the estimating methodology used.</p> <p>ANSI Standard Reference Z94.2-1989 Name: Budget estimate (typically -15% to + 30%).</p> <p>Alternate Estimate Names, Terms, Expressions, Synonyms: Budget, scope, sanction, semi-detailed, authorization, preliminary control, concept study, development, basic engineering phase estimate, target estimate.</p>

Figure 2c. – Class 3 Estimate

CLASS 2 ESTIMATE	
<p>Description: Class 2 estimates are generally prepared to form a detailed control baseline against which all project work is monitored in terms of cost and progress control. For contractors, this class of estimate is often used as the “bid” estimate to establish contract value. Typically, engineering is from 30% to 70% complete, and would comprise at a minimum the following: process flow diagrams, utility flow diagrams, piping and instrument diagrams, heat and material balances, final plot plan, final layout drawings, complete engineered process and utility equipment lists, single line diagrams for electrical, electrical equipment and motor schedules, vendor quotations, detailed project execution plans, resourcing and work force plans, etc.</p> <p>Level of Project Definition Required: 30% to 70% of full project definition.</p> <p>End Usage: Class 2 estimates are typically prepared as the detailed control baseline against which all actual costs and resources will now be monitored for variations to the budget, and form a part of the change/variation control program.</p>	<p>Estimating Methods Used: Class 2 estimates always involve a high degree of deterministic estimating methods. Class 2 estimates are prepared in great detail, and often involve tens of thousands of unit cost line items. For those areas of the project still undefined, an assumed level of detail takeoff (forced detail) may be developed to use as line items in the estimate instead of relying on factoring methods.</p> <p>Expected Accuracy Range: Typical accuracy ranges for Class 2 estimates are -5% to -15% on the low side, and +5% to +20% on the high side, depending on the technological complexity of the project, appropriate reference information, and the inclusion of an appropriate contingency determination. Ranges could exceed those shown in unusual circumstances.</p> <p>Effort to Prepare (for US\$20MM project): Typically, as little as 300 hours or less to perhaps more than 3,000 hours, depending on the project and the estimating methodology used. Bid estimates typically require more effort than estimates used for funding or control purposes.</p> <p>ANSI Standard Reference Z94.2-1989 Name: Definitive estimate (typically -5% to + 15%).</p> <p>Alternate Estimate Names, Terms, Expressions, Synonyms: Detailed control, forced detail, execution phase, master control, engineering, bid, tender, change order estimate.</p>

Figure 2d. – Class 2 Estimate

CLASS 1 ESTIMATE	
<p>Description: Class 1 estimates are generally prepared for discrete parts or sections of the total project rather than generating this level of detail for the entire project. The parts of the project estimated at this level of detail will typically be used by subcontractors for bids, or by owners for check estimates. The updated estimate is often referred to as the current control estimate and becomes the new baseline for cost/schedule control of the project. Class 1 estimates may be prepared for parts of the project to comprise a fair price estimate or bid check estimate to compare against a contractor’s bid estimate, or to evaluate/dispute claims. Typically, engineering is from 50% to 100% complete, and would comprise virtually all engineering and design documentation of the project, and complete project execution and commissioning plans.</p> <p>Level of Project Definition Required: 50% to 100% of full project definition.</p> <p>End Usage: Class 1 estimates are typically prepared to form a current control estimate to be used as the final control baseline against which all actual costs and resources will now be monitored for variations to the budget, and form a part of the change/variation control program. They may be used to evaluate bid checking, to support vendor/contractor negotiations, or for claim evaluations and dispute resolution.</p>	<p>Estimating Methods Used: Class 1 estimates involve the highest degree of deterministic estimating methods, and require a great amount of effort. Class 1 estimates are prepared in great detail, and thus are usually performed on only the most important or critical areas of the project. All items in the estimate are usually unit cost line items based on actual design quantities.</p> <p>Expected Accuracy Range: Typical accuracy ranges for Class 1 estimates are -3% to -10% on the low side, and +3% to +15% on the high side, depending on the technological complexity of the project, appropriate reference information, and the inclusion of an appropriate contingency determination. Ranges could exceed those shown in unusual circumstances.</p> <p>Effort to Prepare (for US\$20MM project): Class 1 estimates require the most effort to create, and as such are generally developed for only selected areas of the project, or for bidding purposes. A complete Class 1 estimate may involve as little as 600 hours or less, to perhaps more than 6,000 hours, depending on the project and the estimating methodology used. Bid estimates typically require more effort than estimates used for funding or control purposes.</p> <p>ANSI Standard Reference Z94.2 Name: Definitive estimate (typically -5% to + 15%).</p> <p>Alternate Estimate Names, Terms, Expressions, Synonyms: Full detail, release, fall-out, tender, firm price, bottoms-up, final, detailed control, forced detail, execution phase, master control, fair price, definitive, change order estimate.</p>

Figure 2e. – Class 1 Estimate

COMPARISON OF CLASSIFICATION PRACTICES

Figures 3a through 3c provide a comparison of the estimate classification practices of various firms, organizations, and published sources against one another and against the guideline classifications. These tables permits users to benchmark their own classification practices.

AAACE Classification Standard	ANSI Standard Z94.0	AAACE Pre-1972	Association of Cost Engineers (UK) ACostE	Norwegian Project Management Association (NFP)	American Society of Professional Estimators (ASPE)
Class 5	Order of Magnitude Estimate -30/+50	Order of Magnitude Estimate	Order of Magnitude Estimate Class IV -30/+30	Concession Estimate	Level 1
				Exploration Estimate	
				Feasibility Estimate	
Class 4	Budget Estimate -15/+30	Study Estimate	Study Estimate Class III -20/+20	Authorization Estimate	Level 2
Class 3		Preliminary Estimate	Budget Estimate Class II -10/+10	Master Control Estimate	Level 3
Class 2	Definitive Estimate -5/+15	Definitive Estimate	Definitive Estimate Class I -5/+5	Current Control Estimate	Level 4
Class 1		Detailed Estimate			Level 5

Figure 3a. – Comparison of Classification Practices

AACE Classification Standard	Major Consumer Products Company (Confidential)	Major Oil Company (Confidential)	Major Oil Company (Confidential)	Major Oil Company (Confidential)
Class 5	Class S Strategic Estimate	Class V Order of Magnitude Estimate	Class A Prospect Estimate	Class V
			Class B Evaluation Estimate	
Class 4	Class 1 Conceptual Estimate	Class IV Screening Estimate	Class C Feasibility Estimate	Class IV
			Class D Development Estimate	
Class 3	Class 2 Semi-Detailed Estimate	Class III Primary Control Estimate	Class E Preliminary Estimate	Class III
Class 2	Class 3 Detailed Estimate	Class II Master Control Estimate	Class F Master Control Estimate	Class II
Class 1		Class I Current Control Estimate	Current Control Estimate	Class I

Figure 3b. – Comparison of Classification Practices

AACE Classification Standard	J.R. Heizelman, 1988 AACE Transactions [1]	K.T. Yeo, The Cost Engineer, 1989 [2]	Stevens & Davis, 1988 AACE Transactions [3]	P. Behrenbruck, Journal of Petroleum Technology, 1993 [4]
Class 5	Class V	Class V Order of Magnitude	Class III*	Order of Magnitude
Class 4	Class IV	Class IV Factor Estimate	Class II	Study Estimate
Class 3	Class III	Class III Office Estimate		Budget Estimate
Class 2	Class II	Class II Definitive Estimate	Class I	Control Estimate
Class 1	Class I	Class I Final Estimate		

[1] John R. Heizelman, ARCO Oil & Gas Co., 1988 AACE Transactions, Paper V3.7
 [2] K.T. Yeo, The Cost Engineer, Vol. 27, No. 6, 1989
 [3] Stevens & Davis, BP International Ltd., 1988 AACE Transactions, Paper B4.1 (* Class III is inferred)
 [4] Peter Behrenbruck, BHP Petroleum Pty., Ltd., article in Petroleum Technology, August 1993

Figure 3c. – Comparison of Classification Practices

ESTIMATE INPUT CHECKLIST AND MATURITY MATRIX

Figure 4 maps the extent and maturity of estimate input information (deliverables) against the five estimate classification levels. This is a checklist of basic deliverables found in common practice in the process industries. The maturity level is an approximation of the degree of completion of the deliverable. The degree of completion is indicated by the following letters.

- None (blank): development of the deliverable has not begun.
- Started (S): work on the deliverable has begun. Development is typically limited to sketches, rough outlines, or similar levels of early completion.
- Preliminary (P): work on the deliverable is advanced. Interim, cross-functional reviews have usually been conducted. Development may be near completion except for final reviews and approvals.
- Complete (C): the deliverable has been reviewed and approved as appropriate.

General Project Data:	ESTIMATE CLASSIFICATION				
	CLASS 5	CLASS 4	CLASS 3	CLASS 2	CLASS 1
Project Scope Description	General	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Plant Production/Facility Capacity	Assumed	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Plant Location	General	Approximate	Specific	Specific	Specific
Soils & Hydrology	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Integrated Project Plan	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Project Master Schedule	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Escalation Strategy	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Work Breakdown Structure	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Project Code of Accounts	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Contracting Strategy	Assumed	Assumed	Preliminary	Defined	Defined
Engineering Deliverables:					
Block Flow Diagrams	S/P	P/C	C	C	C
Plot Plans		S	P/C	C	C
Process Flow Diagrams (PFDs)		S/P	P/C	C	C
Utility Flow Diagrams (UFDs)		S/P	P/C	C	C
Piping & Instrument Diagrams (P&IDs)		S	P/C	C	C
Heat & Material Balances		S	P/C	C	C
Process Equipment List		S/P	P/C	C	C
Utility Equipment List		S/P	P/C	C	C
Electrical One-Line Drawings		S/P	P/C	C	C
Specifications & Datasheets		S	P/C	C	C
General Equipment Arrangement Drawings		S	P/C	C	C
Spare Parts Listings			S/P	P	C
Mechanical Discipline Drawings			S	P	P/C
Electrical Discipline Drawings			S	P	P/C
Instrumentation/Control System Discipline Drawings			S	P	P/C
Civil/Structural/Site Discipline Drawings			S	P	P/C

Figure 4. – Estimate Input Checklist and Maturity Matrix

REFERENCES

ANSI Standard Z94.2-1989. **Industrial Engineering Terminology: Cost Engineering.**
AACE International Recommended Practice No.17R-97, **Cost Estimate Classification System.**

CONTRIBUTORS

Peter Christensen, CCE (Author)
Larry R. Dysert, CCC (Author)
Jennifer Bates, CCE

Dorothy J. Burton
Robert C. Creese, PE CCE
John K. Hollmann, PE CCE
Kenneth K. Humphreys, PE CCE
Donald F. McDonald, Jr. PE CCE
C. Arthur Miller
Bernard A. Pietlock, CCC
Wesley R. Querns, CCE
Don L. Short, II