



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE TÚNEIS VIÁRIOS EM OBRAS DE
INFRAESTRUTURA**

ROBERTO MENDES PEREIRA FRANÇA DE MENDONÇA

João Pessoa - PB
Junho de 2017

ROBERTO MENDES PEREIRA FRANÇA DE MENDONÇA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE TÚNEIS VIÁRIOS EM OBRAS DE
INFRAESTRUTURA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado para a banca
examinadora do curso de Engenharia
Civil para obtenção de nota como
requisito parcial para obtenção de
grau Superior em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Fabio Lopes Soares

João Pessoa – PB
Junho de 2017

M539e Mendonça, Roberto Mendes Pereira França de

Estudo da viabilidade de túneis viários em obras de infraestrutura./ Roberto Mendes Pereira França de Mendonça. – João Pessoa, 2017.

57f. il.:

Orientador: Prof. Fabio Lopes Soares.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil)
Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Túnel 2. Infraestrutura 3. Engenharia de Túneis 4. Geotecnia
I. Título.

BS/CT/UFPB

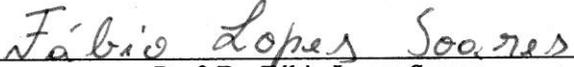
CDU: 2.ed. 693.5 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ROBERTO MENDES PEREIRA FRANÇA DE MENDONÇA

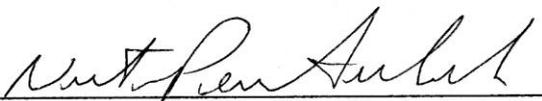
ESTUDO DA VIABILIDADE DE TÚNEIS EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Trabalho de Conclusão de Curso em 01/06/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:



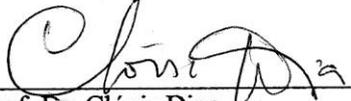
Prof. Dr. Fábio Lopes Soares
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



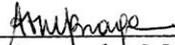
Prof. Dr. Nilton Pereira de Andrade
Universidade Federal da Paraíba

APROVADO



Prof. Dr. Clóvis Dias
Universidade Federal da Paraíba

APROVADO



Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Matrícula Siape: 1668619
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico esse trabalho a todos que incentivaram minha educação até o dia de hoje. Minha mãe, Rachel, que nunca mediu esforços para me dar a melhor educação, meu Padrasto, Manuel, que sempre alimentou meu interesse pelas ciências exatas, além de muitos outros familiares e amigos que tiveram suas contribuições.

Agradeço a todos os professores marcantes que passaram por minha vida, e em especial ao meu professor orientador nesse trabalho, Fabio Lopes Soares, que teve papel importante para que eu visse a mecânica dos solos e a geotecnia com bons olhos, além de me dar todo o apoio e orientação necessária para a realização desse Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

MENDONÇA, Roberto Mendes Pereira França de. Estudo de viabilidade de túneis viários em obras de infra-estrutura. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.

A construção de túneis costuma trazer muitas vantagens em áreas urbanas, como um melhor aproveitamento do espaço em áreas limitadas, menores impactos ambientais e estruturas menos suscetíveis a agentes externos. Essas vantagens vêm sendo cada vez mais valorizadas à medida que os índices de urbanização das cidades e conscientização ambiental vão aumentando. Nas últimas décadas ocorreram significantes avanços na tecnologia de tunelamento, o que levou a um aumento significativo no número de túneis pelo Brasil e pelo resto do mundo.

Esse trabalho recapitula alguns dos primeiros túneis no Brasil e no Mundo e faz uma revisão dos principais métodos de construção de túneis atuais: Valas a Céu Aberto, túnel imerso, tuneladoras de couraça, novo método Austríaco de tunelamento, pórticos de tubos cravados justapostos e pórticos de colunas horizontais de *Jet Grouting*.

Essa revisão é utilizada como base para entender a escolha do método construtivo de dois túneis da cidade de João Pessoa localizados no centro da cidade: os túneis da Rua Guedes Pereira e Av. Miguel Couto. Esses túneis tiveram origem em 1970 e foram construídos com técnicas destrutivas de Vala à Céu Aberto. A destruição de parte do patrimônio cultural causada pelas obras é criticada por muitos autores.

O trabalho faz uma análise da adequação do método construtivo adotado em relação às seguintes características: finalidade, características do solo, cobertura do maciço sobre o túnel, ocupação da superfície, seção transversal dos túneis e extensão dos túneis.

A Vala à Céu aberto se adéqua bem a maioria das características avaliadas. No entanto ela requer desconstrução e construção de parte da superfície, que nesses casos era composta por uma área urbanizada e de grande importância cultural.

Palavras-chave: Túnel. Infraestrutura. Engenharia de Túneis. Geotecnia. Viabilidade.

ABSTRACT

MENDONÇA, Roberto Mendes Pereira França de. Viability study of road tunnel construction in infrastructure works. 2017. Bachelor's Degree Conclusion Work. B.Sc. Program in Civil Engineering of Federal University of Paraíba. João Pessoa, 2017.

Tunnel construction usually brings many advantages in urban areas, it improves the use of limited spaces, has less ecological impact and its structure is less susceptible to external agents. These advantages have been receiving more attention due to an increase on urbanization and environmental awareness. In the last decades significant advances on tunnel technology have occurred, which led to an increase on tunnel construction numbers in Brazil and in the rest of the world.

This work make a recap on some of the first tunnels in Brazil and World's history and review the main tunnel construction methods applied nowadays; cut and cover techniques, immersed tunnels, shield tunneling, New Austrian Tunneling Method, porticos made with spiked pipes and porticos made with jet grouting columns.

This review is used as basis to understand the tunneling method chosen for two tunnels located in João Pessoa city's center: the Rua Guedes Pereira Tunnel and the Av. Miguel Couto tunnel. They were both initially constructed in 1970 with Cut and Cover techniques. These tunnels construction resulted in partial destruction a cultural heritage located in the area, which caused many critics.

This work analyze how suitable the Cut and Cover method adopted in this work was, considering the following characteristics: tunnel function, soil type, cover dimension, surface occupation, tunnel cross-section and tunnel extension.

The Cut and Cover technique is suitable for most characteristics studied. However, this technique requires destruction and reconstruction of the surface, which in this case is an urban area of cultural significance.

Keywords: Tunnel. Infrastructure. Tunnel Engineering. Geotechnics. Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gruta de <i>Font de Gaume</i> , um dos sítios arqueológicos com pinturas rupestres	2
Figura 2 – Esquema do túnel de couraça utilizado por Brunel na escavação sob o Rio Tamisa	4
Figura 3 – Extensão total dos túneis construídos ao longo dos anos (km)	7
Figura 4 – Volume total dos túneis construídos ao longo dos anos (10^6 m ³).....	7
Figura 5 – Imagem das obras no túnel da lagoa	8
Figura 6 – Seqüência de construção <i>Bottom-Up</i>	10
Figura 7 – Seqüência da construção <i>Top-Down</i>	11
Figura 8 – Diferentes etapas da construção de um túnel imerso	12
Figura 9 – Túnel Heinenoord, Holanda.....	13
Figura 10 – Comparação das distancias totais entre um túnel imerso, um túnel subterrâneo e uma ponte.	13
Figura 11 – Vista de satélite do trecho Santos-Guarujá.....	14
Figura 12 – Escudos do tipo aberto	15
Figura 13 – Escudo do tipo parcialmente fechado.....	16
Figura 14 – Escudo do tipo fechado	16
Figura 15 – Esquema de tuneladora EPB.....	18
Figura 16 – Esquema de uma tuneladora estabilizada com lama	19
Figura 17 – Tuneladora utilizada na Linha 1 do metrô de São Paulo.....	20
Figura 18 – Esquema do antigo método Austríaco de construção de túneis.....	21
Figura 19 – Esquema de ataque do método Belga.....	21
Figura 20 – Perfuratriz realizando furos para a enfilagem.....	22
Figura 21 – Esquema de enfilagens e cambotas	22
Figura 22 – Sequências de avanço parcializadas	23
Figura 23 – Concreto projetado aplicado em parede de túnel NATM.....	23
Figura 24 - Arcos invertidos provisório e definitivo	24
Figura 25 – Pórticos de tubos justapostos	26
Figura 26 – Cravação dos tubos do túnel sob Av. Herculano Bandeira	26
Figura 27 – Fotografia da entrada do túnel sob a Av. Herculano Bandeira.....	27
Figura 28 – Seção transversal de túnel feito com pórticos de colunas de <i>Jet Grouting</i>	28
Figura 29 – Comparativo entre TBM e NATM.....	30
Figura 30 – Túneis da Rua Guedes Pereira e Av. Miguel Couto	32

Figura 31 – Túnel Damásio Franca e Ponto dos Cem Réis, do lado esquerdo após a obra de 1970 e do lado direito imagem recente já depois da reforma de 2009	33
Figura 32 – Túnel da Av. Miguel Couto	33
Figura 33 – Medição da extensão do túnel Damásio Franca.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

EPB – *Earth Pressure Balanced* (Tuneladoras balanceadas pelo solo escavado)

NATM – *New Austrian Tunneling Method* (Novo Método Austíaco de Tunelamento)

VCA – Vala a Céu Aberto

TBM – *Tunnel Boring Machine* (tuneladora)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1. Breve história dos túneis.....	2
2.2. Primeiros túneis do Brasil	4
2.3. Túneis em João Pessoa.....	7
2.4. Tipos de túneis	8
2.4.1. Vala a Céu Aberto – VCA	9
2.4.2. Túnel imerso	12
2.4.3. Tuneladoras de Couraça (Shield Tunneling).....	14
2.4.4. NATM – New Austrian Tunneling Method	20
2.4.5. Pórticos de tubos justapostos cravados	25
2.4.6. Pórticos compostos de colunas horizontais de <i>Jet Grouting</i>	27
2.5. Comportamento do solo.....	28
3. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	29
4. ESTUDO DE CASO.....	31
5. CONCLUSÕES	36
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

Os túneis são obras subterrâneas que permitem contornar diferentes tipos de obstáculos de forma prática. Esses obstáculos incluem não apenas diferenças significativas de nível no terreno, como também cursos d'água, edificações e infra-estruturas diversas presentes no terreno. Por isso, túneis são soluções construtivas muito úteis em contextos urbanos. Outras vantagens do emprego de túneis é o baixo impacto ambiental e a maior durabilidade das obras, características que vem sendo cada vez mais valorizadas no mundo moderno.

Nos últimos anos ocorreram grandes adventos nas tecnologias de tunelamento, muitos métodos construtivos foram criados ou aprimorados, como as técnicas de túnel imerso, as modernas tuneladoras de couraça, o Novo Método Austríaco de Tunelamento (NATM) e as técnicas que utilizam pórticos estabilizadores. Todas essas tecnologias contribuem para que o tunelamento seja cada vez mais empregado em grandes cidades.

Na cidade de João Pessoa e arredores, não existe uma grande tradição na construção de túneis. Isso se deve principalmente as características geográficas da região, que não possui grandes desníveis e que apresenta bastante espaço livre disponível nas redondezas. Em relação a túneis viários a cidade possui dois túneis em paralelo que foram inicialmente construídos na década de 1970, esses dois túneis são localizados no centro da cidade e tem a função de ligar a chamada Cidade Baixa a Lagoa do Parque Sólon de Lucena.

Esses dois túneis foram construídos utilizando métodos destrutivos de corte e aterro, as obras geraram grande discussão a cerca da real necessidade dos túneis na região e dos impactos gerados pela obra na infraestrutura local.

1.1. Objetivos

Os objetivos do trabalho são:

- Realizar uma revisão histórica dos primeiros túneis do Brasil e do Mundo
- Fazer uma revisão dos principais tipos de túneis, classificados em relação ao método construtivo, sendo eles: Valas a Céu Aberto – incluindo o método convencional e o de túnel invertido, o método de túnel imerso, as tuneladoras de couraça, o NATM, e os métodos que usam pórticos como estabilizadores.
- Avaliar o método construtivo utilizado na construção dos dois túneis viários da cidade de João Pessoa e compará-lo a métodos alternativos disponíveis, levando em consideração

características como: finalidade, características do solo, cobertura do maciço sobre o túnel, ocupação da superfície, seção transversal dos túneis e extensão dos túneis.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Breve história dos túneis

Desde a Pré-História podemos acompanhar a evolução das experiências geotécnicas do Homem. O *Homo Faber*, por exemplo, já possuía conhecimentos em relação à dureza e planos de fissura de diferentes rochas. Temos também indícios de que 200 mil anos atrás o homem já desfrutava da estabilidade de cavernas como abrigo, como evidenciam os desenhos rupestres mostrados na Figura 1 (Moreira, 2006).



Figura 1 – Gruta de *Font de Gaume*, um dos sítios arqueológicos com pinturas rupestres

Acredita-se que as primeiras construções de terra datam do Neolítico ou Paleolítico Superior, e tinham motivação religiosa. Em seguida começaram a surgir obras com finalidades de mineração ou agricultura (Moreira, 2006).

Com o passar do tempo as obras subterrâneas foram se desenvolvendo. Na civilização Persa, ainda no século IX AC, foram feitos túneis com ligeira inclinação em cadeias de montanhas, a fim de aproveitar as águas das nascentes dos rios, reduzindo as perdas por evaporação e mantendo a água mais fresca (Moreira, 2006).

Como narrado pelo historiador grego Heródoto, que viveu no século V AC, temos registros de notáveis túneis na civilização Grega. O sistema de abastecimento de água da cidade de Samos, construído no século VI AC, possuía um túnel de cerca de 1.000m de comprimento (Moreira, 2006).

A civilização Romana também é famosa por seu histórico de túneis importantes. Na Roma Antiga, chama a atenção a *Cloaca Massima*, que foi um colossal sistema de esgoto urbano construída no final do século VI AC, aonde seus túneis chegavam a ter seções com 3,2m de largura por 4,2m de altura (Moreira, 2006).

Com o passar dos anos a tecnologia de construção bem como a utilização dos túneis foram evoluindo. As técnicas mais antigas consistiam na escavação utilizando utensílios artesanais. Outra técnica antiga consistia em quebrar as rochas utilizando o auxílio de mudanças bruscas de temperatura, as paredes eram esquentadas com fogo e logo depois resfriadas com água, tornando a rocha mais frágil (Moreira, 2006).

Um grande avanço nas escavações ocorreu com a utilização de explosivos. Em 1679, a pólvora foi utilizada pela primeira vez na escavação de um túnel no Sul da França. Em 1867, a nitroglicerina foi usada pela primeira vez nos Estados Unidos. E também em 1867, Alfred Nobel criou a dinamite, que iria revolucionar as escavações devido a sua eficácia e segurança (Moreira, 2006).

Em 1818, *Marc Brunel* teve a idéia de utilizar durante a escavação uma couraça, ou escudo (do inglês *shield*), que daria estabilização provisória às paredes laterais enquanto o revestimento definitivo não é construído. Esta idéia foi posta em prática na obra do túnel do Rio Tamisa (1823), que foi o primeiro túnel sub fluvial construído (Beaver, 1972). O esquema construtivo empregado nessa obra é mostrado na Figura 2. O escudo de Brunel foi o precursor das tuneladoras modernas (*TBM - Tunnel Boring Machine* em Inglês), também conhecidas como tatuzões, que entraram em amplo desenvolvimento no final do século XX (Konda, 2001).

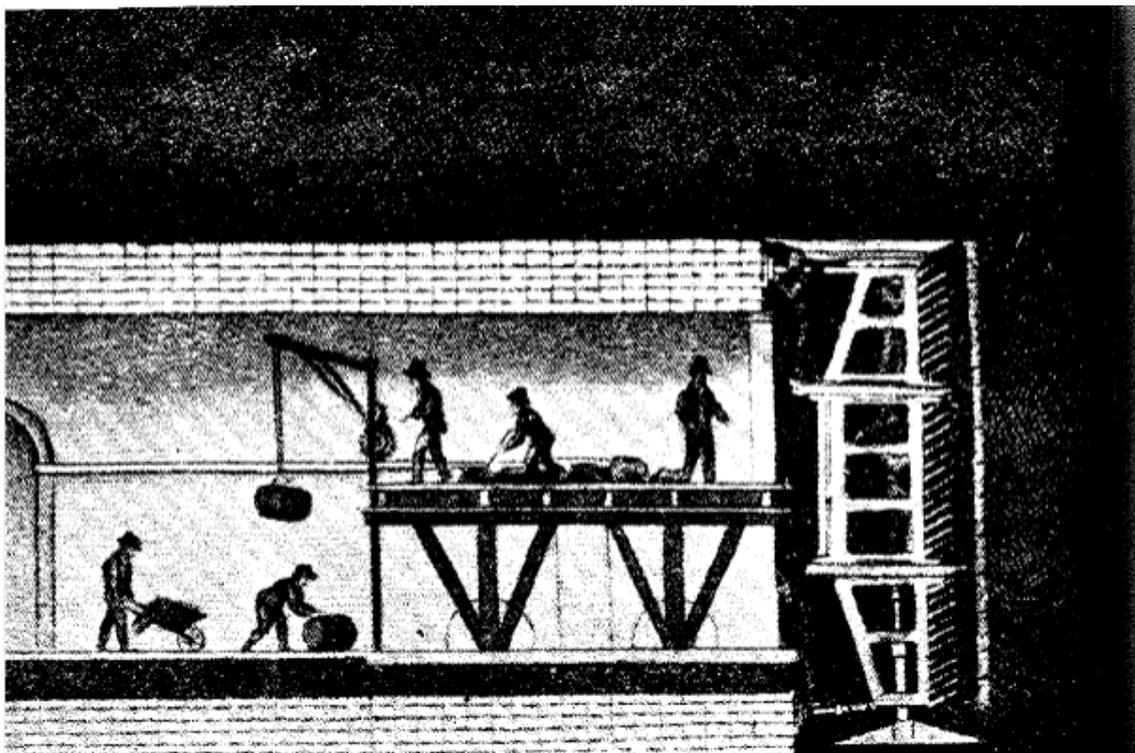


Figura 2 – Esquema do túnel de couraça utilizado por Brunel na escavação sob o Rio Tamisa

Outro método que é comumente utilizado hoje é o Novo Método de Tunelamento Austríaco (*NATM – New Austrian Tunneling Method* em Inglês). Que é um método de escavação seqüencial desenvolvido na Áustria, entre 1957 e 1965, por *Ladislaus Von Rabcewicz, Leopold Muller e Franz Pacher*.

2.2. Primeiros túneis do Brasil

Os primeiros túneis do Brasil foram construídos no Século XVII em Minas Gerais com o intuito de explorar o ouro da região. Já para o uso Civil, acredita-se que o primeiro túnel Brasileiro foi escavado no estado do Rio de Janeiro, próximo a cidade de 3 Rios, por volta de 1860. Era um túnel pequeno escavado em rocha e que durou apenas até a construção da linha ferroviária para Minas Gerais que ocorreu alguns anos depois. Não se sabe ao certo as dimensões deste túnel, acredita-se que tinha 7 m de largura, pois esta era a largura da rodovia União e Indústria. O túnel era um pequeno trecho desta rodovia que tinha 144 km de extensão e ligava Petrópolis (RJ) à Juiz de Fora (MG) (Telles, 2006).

No Século XIX, o Governo Imperial começou a construção da Estrada de Ferro Dom Pedro II – EF D. Pedro II, uma série de linhas ferroviárias que mais tarde se tornaria a Estrada de Ferro Central do Brasil. Nela foram construídos os primeiros túneis de grande importância

do Brasil. Entre eles está a série de 15 túneis construídos na segunda seção da EF D. Pedro II (seção da Serra do Mar, entre Japeri e Barra do Piraí, ambas no estado do Rio de Janeiro). Esta é considerada uma obra notável, pois se tratava de uma ferrovia de bitola larga, que deveria vencer um desnível de 400 m, com apenas a aderência e condições técnicas desfavoráveis. Essas condições levaram a perfuração de 15 túneis com comprimentos variando entre 25 e 2.238 m, somando um total de 5.220 m. Alguns túneis foram abertos em rocha decomposta ou terra e por isso possuíam uma abóbada revestida de alvenaria de pedra. Outros foram construídos em rocha extremamente dura. As dimensões eram de 4,2 m de largura e 5,8 m de altura máxima (Telles, 2006).

A obra começou em 1958 e foi concluída apenas em 1864, o longo período de construção ocorreu por conta da tecnologia da época. Os túneis em rocha eram perfurados com ponteiro, marreta e pólvora negra. Perfuratrizes mecânicas e dinamite ainda não existiam. Na escavação do Túnel Grande (o mais longo dos 15 túneis, de 2.238 m), foram perfurados 4 poços verticais para permitir várias frentes de trabalho. Cerca de 400 operários trabalharam na obra, revezando dia e noite (Telles, 2006).

Entre 1877 e 1879, na perfuração de dois túneis do ramal da Marítima, também da EF D. Pedro II, na cidade do Rio de Janeiro, utilizou-se pela primeira vez perfuratrizes de ar comprimido e dinamite. O próprio imperador realizou a primeira detonação com dinamites (Telles, 2006).

No início do Século XX, a linha da Serra do Mar (já mencionada acima), foi duplicada. A duplicação da série de 15 túneis merece destaque devido às técnicas de execução empregadas. Nos trechos mais delicados foram utilizadas técnicas de duplicação diferentes, variando de acordo com as peculiaridades do trecho. A maioria teve um lado da galeria alargada, conservando o outro lado. No túnel 5 utilizou-se pela primeira vez em túneis ferroviários um processo de envolvimento, onde os dois lados foram alargados simetricamente de forma que a nova galeria envolveu a antiga. Dessa forma a galeria antiga só foi retirada após a conclusão da nova, evitando assim possíveis desmoronamentos do solo arenoso. Já os túneis mais longos foram duplicados escavando uma nova galeria totalmente independente, distando da antiga galeria 11,2 m de centro a centro. A fim de facilitar a saída de material escavado e o emprego de maior número de frentes de ataque, abriram-se poços transversais ligando o túnel novo ao antigo e poços verticais para ventilação. Em todas as perfurações foram utilizadas perfuratrizes pneumáticas modernas. Para a iluminação e alimentação dos equipamentos foram instaladas 3 centrais de compressores e uma linha de

transmissão de energia de 90 Km de extensão, exclusiva para a obra. Com exceção dos túneis escavados em rocha viva, todos os túneis tiveram estrutura de concreto armado (Telles, 2006).

Na década de 1970, iniciou-se uma mudança no panorama da construção de túneis no país, os investimentos em metrô passaram a tomar o lugar dos investimentos em ferrovias tradicionais. Foi quando iniciaram a construção dos metrô de São Paulo e Rio de Janeiro. Esse investimento no transporte de massas foi acompanhado por outras capitais na década de 1990, muito embora nem sempre fossem usadas passagens subterrâneas nos projetos (Rocha, 2006).

No final da década de 1960 e início da década de 1970, foi utilizado pela primeira vez o Novo Método Austríaco de Tunelamento (NATM), no Brasil. Foi usado para a construção da pista ascendente da Rodovia dos Imigrantes (Carvalho, 2006).

O metrô de São Paulo foi pioneiro na utilização de tuneladoras de couraça no Brasil. As experiências no metrô de São Paulo mostraram que a construção de grandes trechos em vala a céu aberto causa muitos transtornos sócio econômicos, enquanto que a utilização de métodos de escavação subterrânea são mais indicados (Celestino, 2006).

Muitas tecnologias foram utilizadas nas escavações Brasileiras ao longo dos anos, como o uso de *Jet Grouting*, diversos tipos de chumbadores, rebaixamento do nível d'água por poços profundos, injeções químicas, congelamento do solo, entre outras (Rocha, 2006).

Aproximadamente 20 anos depois da construção da pista ascendente da Rodovia dos Imigrantes, foi construída a pista descendente. Dessa vez dois terços da pista foram compostos de túneis, enquanto que na pista ascendente essa fração era de apenas um terço. Isso ocorreu por que a área da construção é de preservação ambiental, o que fez com que o traçado original fosse alterado. (Carvalho, 2006).

As obras da rodovia imigrantes mostram bem que houve uma grande evolução na tecnologia de construção de túneis nas últimas décadas, bem como uma maior preocupação com sustentabilidade. Assim obras de túneis passam a ser mais valorizadas, pois agride menos o meio ambiente, possuem maior durabilidade e menores custos de manutenção.

A quantidade de túneis no Brasil aumentou bastante ao longo das décadas do século XX e XXI. As Figuras 3 e 4 abaixo possibilitam uma melhor visualização de como os túneis (não apenas viários) evoluíram no Brasil em extensão total e volume total escavado ao longo do tempo (Celestino, 2006).

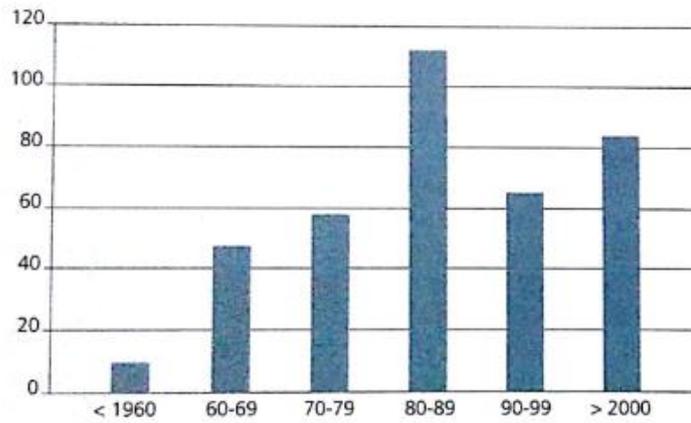


Figura 3 – Extensão total dos túneis construídos ao longo dos anos (km)

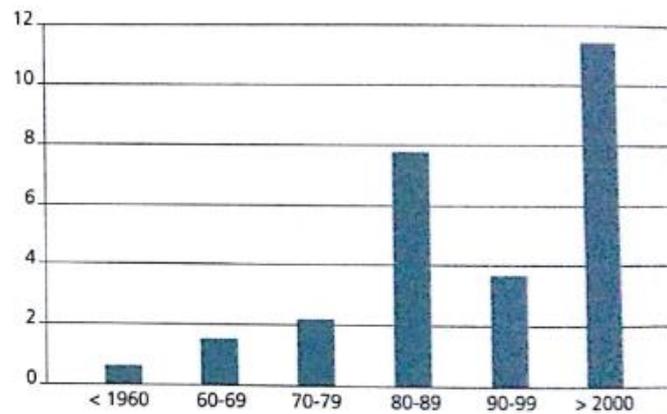


Figura 4 – Volume total dos túneis construídos ao longo dos anos (10⁶ m³)

2.3. Túneis em João Pessoa

Não existe uma grande tradição na construção de túneis em João Pessoa ou nas imediações. Isso se deve principalmente a topografia da região onde predominam relevos planos, além de possuir muita área para o crescimento da cidade ao redor, o que contribui para uma menor compactação da cidade.

A cidade possui dois túneis de destaque voltados para o transporte rodoviário, eles tiveram origem nas obras de viadutos realizadas nos anos 1970 em que foram construídas vias sob a Rua Visconde de Pelotas e a Av. Duque de Caxias. O impacto gerado pelos métodos destrutivos utilizados na construção foi alvo de polemias. Muitos autores alegam que as construções prejudicaram a infraestrutura local o que contribuiu para a marginalização da região (Silva, 2010; Chaves, 2014; Sarmiento, 2010).

Outros túneis notáveis foram os de saneamento feitos para drenar os excessos de água da Lagoa do Parque Solon de Lucena. O primeiro foi construído em 1925 e possuía um diâmetro de 1,90 (Melo, 2012). Já o mais recente foi concluído em 2015 e possui um diâmetro de 2m e uma extensão total de 640 m, a escavação foi realizada usando o método não destrutivo chamado de *Tunnel Liner* onde sua estrutura é formada por anéis metálicos (Figura 5). Essa obra sofreu três rupturas pouco tempo após sua conclusão.



Figura 5 – Imagem das obras no túnel da lagoa

2.4. Tipos de túneis

Os túneis são comumente classificados quanto a sua utilização ou quanto ao método de construção. Em relação à finalidade os tipos mais comuns são os túneis rodoviários, túneis ferroviários, túneis de saneamento, túneis de travessia e túneis de hidrelétrica. Já quando se trata de métodos construtivos existe uma enorme variedade de possibilidades para a execução de projetos. Podemos dividir os métodos em duas categorias básicas: os métodos destrutivos, quando a superfície do terreno precisa ser escavada e depois aterrada; e os túneis que são escavados de forma subterrânea, minimizando o impacto na superfície do terreno. Dentro do segundo grupo estão as tuneladoras de couraça e o NATM, que são os tipos de túneis mais populares atualmente.

Os métodos construtivos a serem revisados nesse trabalho são: o tipo convencional de vala a céu aberto (*Bottom-Up construction*), túnel invertido (*Top-Down construction*), túneis imersos, tuneladoras de couraça (*Shield tunneling*), o novo método Austríaco de tunelamento (NATM), pórticos de tubos justapostos cravados e pórticos compostos de colunas horizontais de *Jet Grouting*.

Também dentro dos métodos subterrâneos, existe o uso de pórticos de tubos justapostos cravados e os pórticos compostos de colunas horizontais de *Jet Grouting*. Esses

dois juntos com o NATM são métodos que se adéquam bem na construção de túneis de travessia (Domingues, 2016).

2.4.1. Vala a Céu Aberto – VCA

Vala a céu aberto, também chamado de falso túnel é a técnica de escavação de túneis mais simples. A técnica consiste em primeiro realizar o corte de uma vala onde será construída a estrutura do túnel e em seguida cobrir o topo da estrutura com solo até atingir o nível do terreno.

Essa técnica é vantajosa para projetos em que o túnel não é muito profundo e em que o terreno disponível é bem plano. Ela permite que sejam construídos túneis com variações na largura e com formatos diferentes. Porém, esse tipo de escavação pode causar muitos transtornos socioeconômicos em áreas urbanas, causando principalmente interferências no tráfego e na infra-estrutura de saneamento do local. VCAs são muito utilizadas na construção de estações subterrâneas.

As VCAs podem ser divididas em dois tipos diferentes: o mais convencional *Bottom-Up Construction* (construção de baixo para cima); e a *Top-Down Construction* (construção de cima para baixo, ou túnel invertido).

a) Bottom-Up Construction

No tipo de construção chamado em inglês de *Bottom-Up* a construção começa de baixo para cima, começando pela laje inferior. Após o término de toda a estrutura o material de aterro pode ser inserido. A Figura 6 mostra a seqüência de construção usual para este método.

Inicialmente são feitos os muros de contenção (1), que podem ser feitos de paredes diafragma de concreto, paredes de estacas de concreto, estacas prancha de aço, entre outros materiais. Após a construção das paredes de contenção pode ser iniciada a escavação e a instalação das escoras (2), o número de escoras irá depender da profundidade da vala (3). Depois que todo o material desejado foi escavado, pode-se então construir a laje inferior (4), à medida que a estrutura é construída, as escoras vão sendo retiradas (5). Após a conclusão da laje do teto, o solo começa a ser aterrado acima da laje, as escoras remanescentes são retiradas

quando o material aterrado chega a seu nível. Por fim, 2 m do muro de contenção são removidos da parte superior (6).

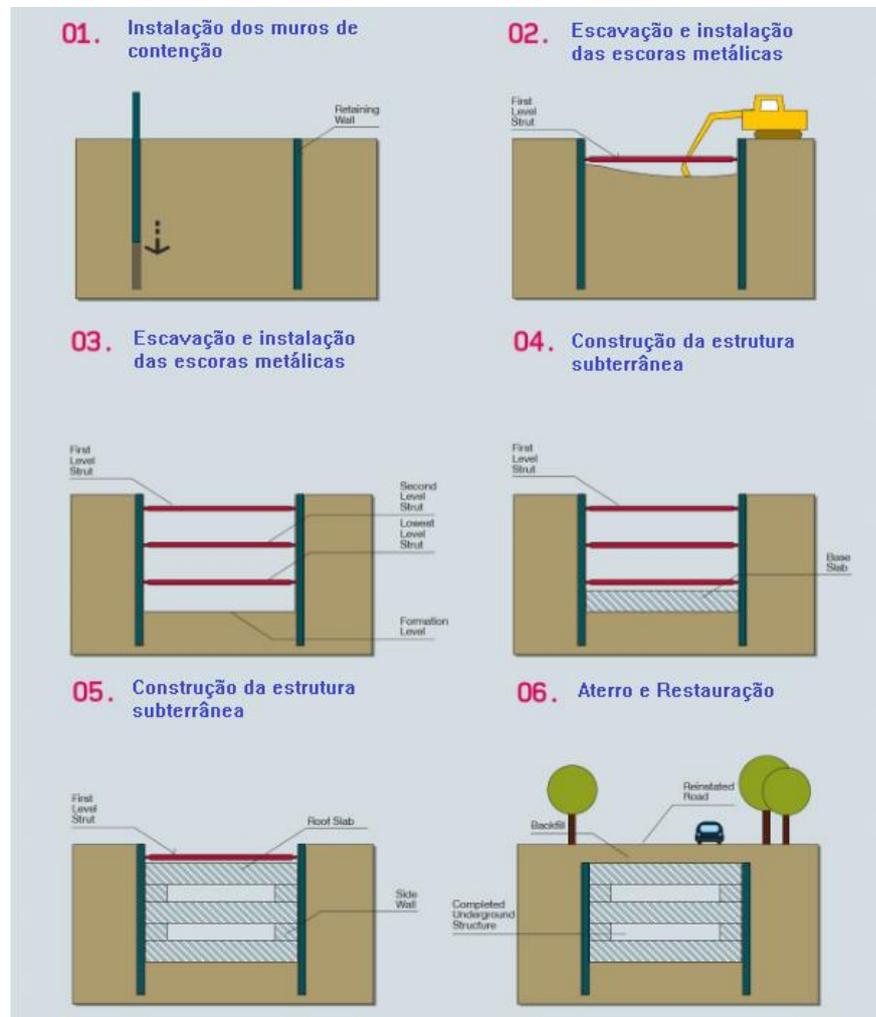


Figura 6 – Sequência de construção *Bottom-Up*

b) Top-Down Construction

Na construção Top-Down, ou túnel invertido, primeiro é construída a laje do teto, assim a superfície pode ser coberta antes da conclusão da construção do túnel. O resto da escavação é então realizado sob a laje do teto. No caso de túneis de grande largura, paredes de estacas temporárias são colocadas entre as paredes principais para oferecer melhor suporte a laje. A sequência da construção é mostrada na Figura 7.

Assim como no método convencional as paredes de contenção são feitas primeiro (1). A escavação e instalação das escoras é iniciada, até que seja atingido o nível da laje

superior do teto (2). A laje é então construída e uma cobertura é colocada na superfície (3), essa laje deve ter aberturas por onde passarão trabalhadores, equipamentos e materiais. Além de ter uma função estrutural esta laje também serve como isolante acústico. A escavação e construção das lajes é feita até que seja atingido o nível inferior (4), a partir daí podem ser construídas as paredes da estrutura que ficarão entre as lajes (5). Para finalizar, um processo de aterro semelhante ao do método convencional é realizado e a parte superior das paredes de contenção é removida (6).

Uma das primeiras utilizações do túnel invertido no Brasil foi a construção do Túnel do Leme, no Rio de Janeiro, em 1942. Outra obra notável que adotou essa técnica foi o túnel Onoyama de 1.200 m de extensão, ele foi concluído em 2005 e faz parte do metrô de Brasília.

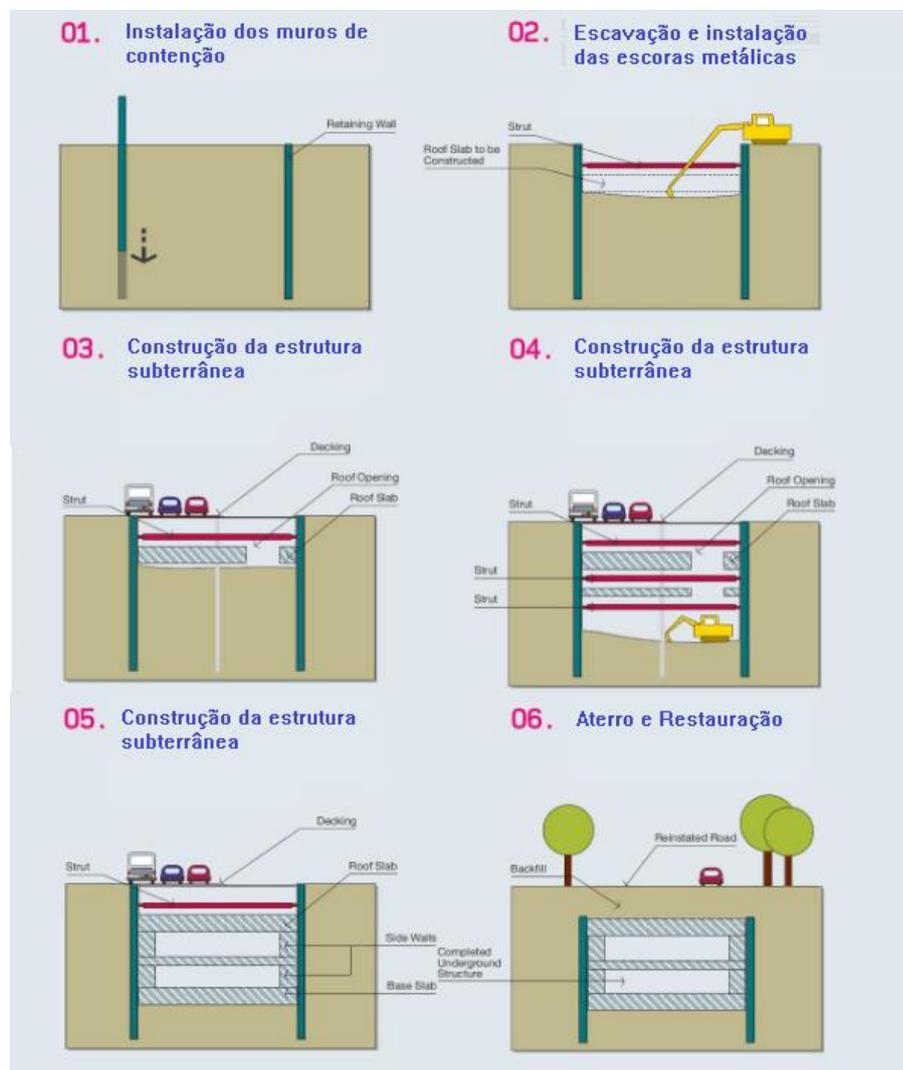


Figura 7 – Sequência da construção *Top-Down*

c) Comparativo entre os dois métodos

Para escolher qual dentre os dois métodos é mais apropriado deve-se analisar as vantagens e desvantagens de cada um, e qual se adéqua melhora as características do projeto. As principais vantagens da construção *Bottom-Up*, é que é um método construtivo de fácil assimilação e os equipamentos de construção tem fácil acesso a escavação. Porém esse método não permite que a superfície seja restaurada até o termino da construção, causando um transtorno maior.

Já na construção *Top-Down*, é possível que a superfície seja restaurada antes do termino da obra, além do que a laje também atua como suporte das paredes, requerendo menos escoras. A construção das lajes também é facilitada, pois são sempre construídas sobre o solo. As maiores desvantagens desse método é que ele é mais suscetível a vazamentos, as conexões dos elementos estruturais são mais complicadas e o acesso dos equipamentos é feito por aberturas ou *shafts* na laje.

2.4.2. Túnel imerso

Essa também é uma técnica destrutiva de corte e aterro, porém se diferencia dos métodos tradicionais por ser realizada de forma submersa. Nessa técnica, componentes da estrutura são pré-fabricados. Esses componentes são geralmente fabricados em uma doca seca, após a construção eles recebem uma vedação e a doca é inundada. A partir daí, os elementos estruturais podem ser transportados por barcos até o local de instalação. Eles são então imersos (daí vem o nome da técnica) em uma trincheira, escavada por dragagem. Após realizada uma vedação entre as diferentes peças, o material de aterro pode ser inserido, cobrindo assim o túnel.

A Figura 8 mostra três etapas do processo construtivo, a dragagem (1), a imersão dos componentes estruturais (2) e o aterramento (3)

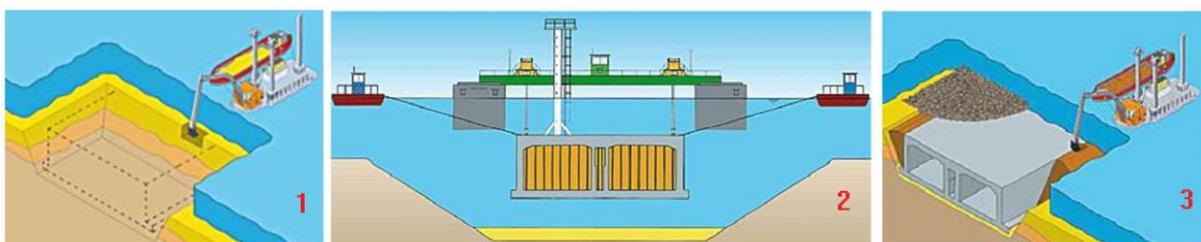


Figura 8 – Diferentes etapas da construção de um túnel imerso

Existem mais de 100 aplicações dessa técnica construtiva pelo mundo. Ela é economicamente vantajosa em obras de curta distancia e permite que os túneis sejam construídos imediatamente sob o rio, reduzindo assim a extensão total do túnel.

A Figura 9 exemplifica bem como os túneis imersos podem ser construídos em pequenas profundidades e a Figura 10 mostra como isso afeta na distancia total construída, comparando as distancias totais de um túnel imerso (1), de um túnel convencional, construído de forma subterrânea (2), e de uma ponte (3).



Figura 9 – Túnel Heinenoord, Holanda

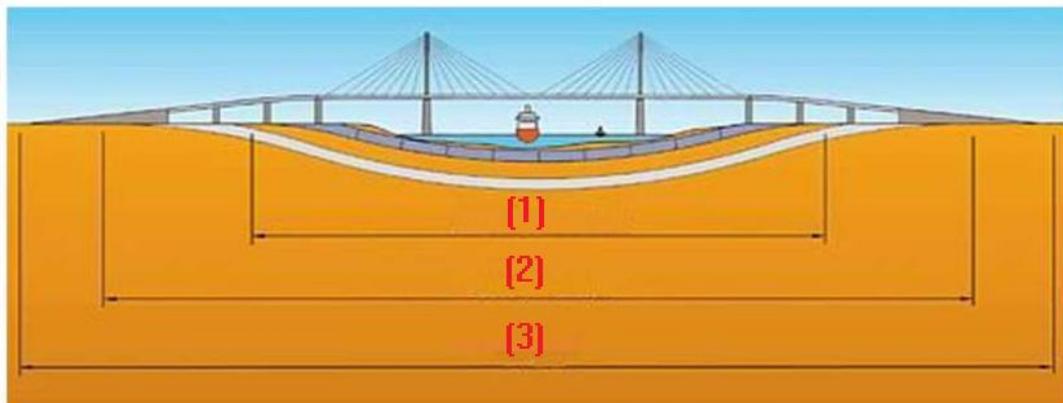


Figura 10 – Comparação das distancias totais entre um túnel imerso, um túnel subterrâneo e uma ponte.

Um projeto de túnel imerso foi elaborado para resolver o problema de superlotação das balsas do trajeto Santos-Guarujá. A obra seria realizada com tecnologia Brasileira, teria extensão de aproximadamente 900 m e profundidade de 21 m. Cobrindo o trecho mostrado na Figura 11. Porém devido a problemas de ordem econômica, as obras que deveriam ser iniciadas ainda em 2015 foram suspensas.

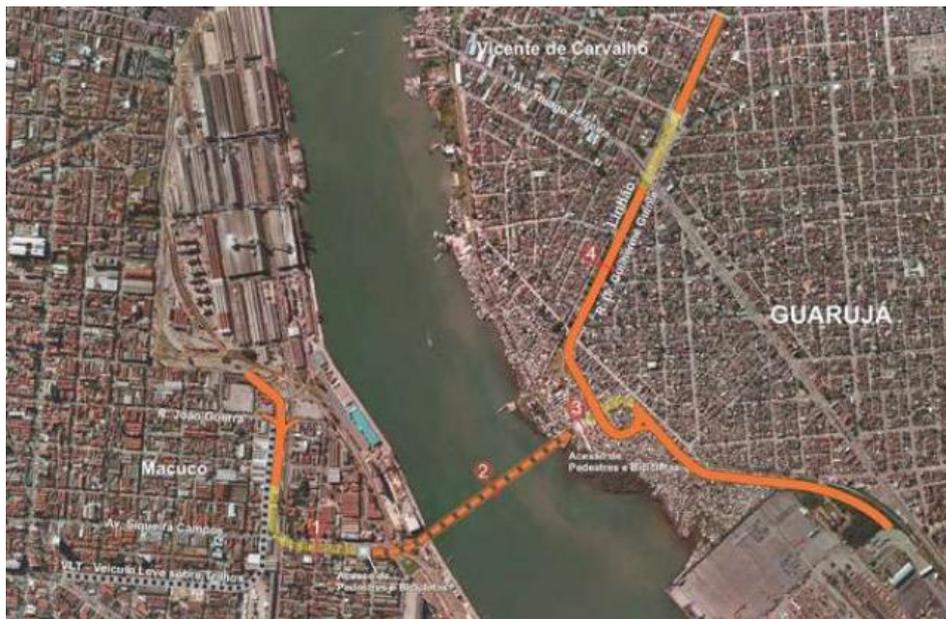


Figura 11 – Vista de satélite do trecho Santos-Guarujá.

2.4.3. Tuneladoras de Couraça (Shield Tunneling)

A construção de túneis pode ser dividida em três processos básicos: escavação, construção da estrutura e transporte do material escavado. As tuneladoras de couraça possuem uma estrutura rígida, geralmente cilíndrica, que garante estabilidade e segurança durante os processos de escavação e construção do revestimento estrutural definitivo. A couraça, ou escudo, deve ser capaz de resistir as pressões do solo e conter as águas subterrâneas. As máquinas modernas de couraça (também chamadas de *TBM – Tunnel Boring Machines*) permitem que todas as etapas da construção de túneis sejam realizadas de forma simultânea e automatizada, tornando o processo mais rápido e eficiente (Yoshihiro, 1996; Maidl 2012).

Essas máquinas permitem construções tanto em grandes profundidades quanto em pequenas, além de servirem para diferentes tipos de solos. Solos de rocha frágil com pouca

capacidade de sustentação podem ser escavados, como também zonas abaixo da linha do lençol freático. Outras vantagens desse método são a precisão dos cortes realizados, os mínimos impactos em edifícios e na superfície em geral, a segurança, qualidade e economia da estrutura, além do baixo impacto ambiental (Maidl, 2012).

Entretanto, este método também possui aspectos negativos. É necessário muito tempo para desenvolver e construir as TBMs. Os engenheiros também precisam de tempo e treinamento para se adaptarem as máquinas. As instalações do canteiro de obras são mais complexas e caras. O desempenho das máquinas pode ficar comprometido em regiões com mudanças abruptas do tipo de solo. A geometria da seção transversal é bem limitada e mudanças futuras no design são muito caras (Maidl, 2012).

a) Classificação das tuneladoras

Existem três tipos básicos de escavações com couraça: de escudo aberto, parcialmente fechado e fechado. Os tipos abertos e parcialmente fechados são mais antigos, enquanto que o tipo fechado é a categoria na qual a maioria das máquinas modernas se encontram (Yoshihiro, 1996).

Escudo aberto

No tipo aberto não existe nenhum tipo de divisória que isole a face de escavação do resto da couraça. A escavação pode ser feita de forma manual, parcialmente mecanizada ou mecanizada. Pode ser utilizado em solos de areia densa, cascalho, sílto duro ou argila dura. A Figura 12 apresenta dois escudos abertos (Yoshihiro, 1996).

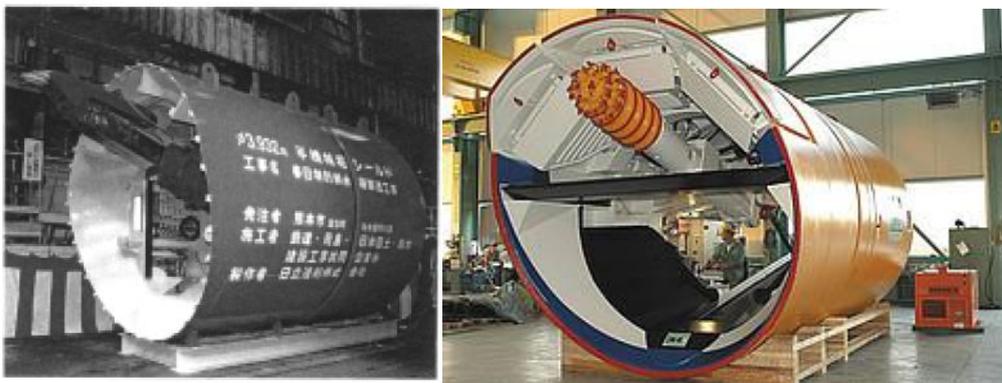


Figura 12 – Escudos do tipo aberto

Escudo parcialmente fechado

Nesse tipo de escudo existe uma divisória que dá suporte a face do túnel, este anteparo possui aberturas pelas quais o material escavado é retirado. Esse método permite escavar em síltes macios e argilas macias, no entanto não é recomendado para materiais não plásticos. A Figura 13 mostra do lado esquerdo uma foto de um escudo parcialmente fechado, e do lado direito o esquema de uma máquina deste tipo (Yoshihiro, 2006).

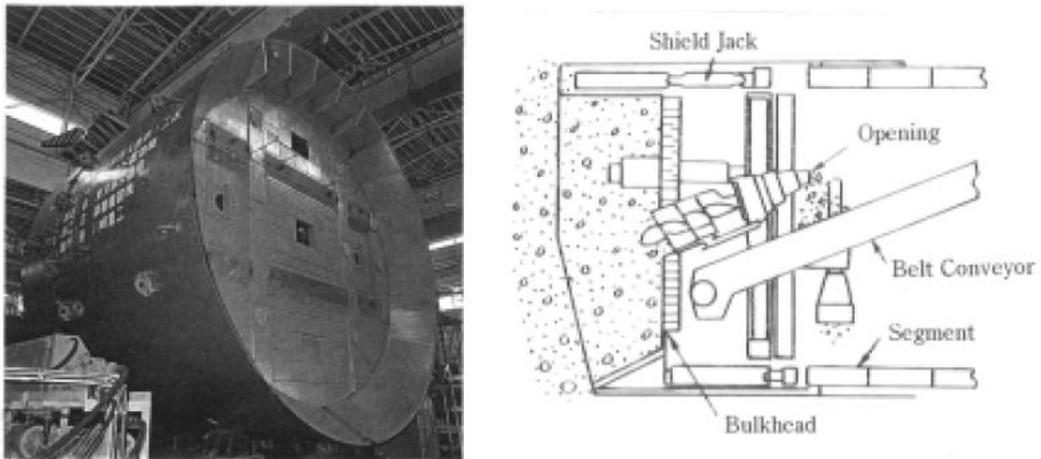


Figura 13 – Escudo do tipo parcialmente fechado

Escudo Fechado

Nos escudos fechados, além do anteparo existe também uma cortadora na região frontal. As tuneladoras modernas (TBM) se enquadram nessa categoria. Areia, síltes e argilas de qualquer tipo podem ser escavados. A Figura 14 mostra uma máquina de escudo fechado (Yoshihiro, 1996).



Figura 14 – Escudo do tipo fechado

b) TBM – Tunnel Boring Machines

O tunelamento com escudo ganhou popularidade com o advento das TBMs. Elas permitiram que todo o processo de construção fosse automatizado. Em geral as máquinas possuem uma cortadora circular, que por sua vez possui outras cortadoras menores de moagem e de discos. A cortadora gira enquanto é pressionada contra o solo, dessa forma a escavação é realizada. O que impulsiona a máquina é um conjunto de macacos hidráulicos. Enquanto a escavação avança segmentos de concreto são fixados dando forma a estrutura do túnel. As máquinas contam também com um sistema que injeta argamassa nos vazios formados entre a estrutura de concreto e o solo. O material escavado é transferido através de esteiras até a traseira da máquina onde é remanejado para um sistema que o transportará para fora do túnel.

Um dos maiores desafios no desenvolvimento das TBMs foi encontrar uma forma de fazer com que a cortadora suportasse as pressões as quais é submetida. A solução encontrada foi preencher o espaço entre a cortadora e o anteparo com um material que balanceie as pressões. Esse material pode ser o próprio solo escavado ou uma lama pressurizada.

EPB – Earth Pressure Balanced Shield

Earth Pressure Balanced Shield é a denominação em inglês dada as máquinas que balanceiam as pressões na face do túnel usando os resíduos do próprio solo escavado. Nesse modelo o solo que acabou de ser escavado é armazenado em uma câmara localizada atrás da cortadora, criando uma pressão que balanceia as pressões do solo e da água que atuam contra a cortadora. Essa pressão é regulada controlando o ritmo em que a máquina avança na escavação e o ritmo no qual o material escavado é despejado pelas esteiras (Maidl, 2012).

As EPBs são recomendadas para solos com mais de 30% de finos. Para que o material preencha a câmara de forma adequada, ele precisa ser plástico, como nos siltes macios e argilas macias. Para que essas máquinas possam ser utilizadas em solos pouco fluidos, elas precisam ser equipadas com injeções de líquidos, para injetar água, bentonita ou espuma (Yoshihiro, 1996; Maidl, 2012).

Nos casos de solos estáveis, não há a necessidade de pressurização, podendo operar com a câmara parcialmente preenchida (Yoshihiro, 1996). A Figura 15 mostra a representação de uma máquina de couraça do tipo EPB.

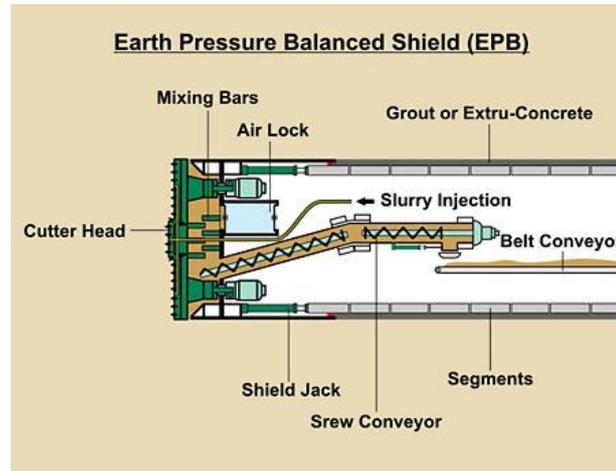


Figura 15 – Esquema de tuneladora EPB

Slurry Shields

Os *Slurry Shields* (escudos de lama em inglês), como o próprio nome sugere, utilizam uma lama fluida como material estabilizador. O tipo específico de lama vai variar de acordo com a permeabilidade do solo escavado, geralmente é utilizado bentonita em suspensão. É importante que a viscosidade e densidade da lama possam ser controladas. A pressão deve ser regulada precisamente de modo que ela seja sempre ligeiramente maior que a pressão do solo e da água na face do túnel (Yoshihiro, 1996; Maidl, 2012).

A lama bombeada vem de uma estação de tratamento. O solo escavado se mistura com essa lama e elevado em direção a estação de tratamento, lá serão separados os resíduos que serão descartados. O material remanescente tem suas características de massa específica, percentual de areia e viscosidade monitoradas, e é levado novamente até a câmara estabilizadora (Maidl, 2012). A Figura 16 mostra o esquema de um escudo de lama.

Essas máquinas podem ser usadas em solos macios e em passagens abaixo do lençol freáticos. São comumente recomendadas para casos com solos grosseiros. Nos casos em que a permeabilidade é elevada, maior que 5×10^3 , a bentonita pode fluir de forma descontrolada em direção ao solo. Nessas situações é necessária a adição de aditivos. Em solos com muitos finos a qualidade da lama pode piorar, pois não existe uma tecnologia capaz de separar a bentonita de outros materiais argilosos (Yoshihiro, 1996; Maidl, 2012).

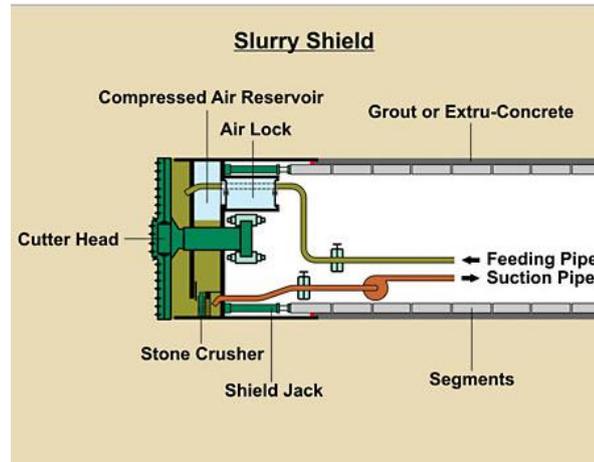


Figura 16 – Esquema de uma tuneladora estabilizada com lama

Assim como nas máquinas EPB, se o solo for estável, não é necessária a pressurização. Dessa forma, apenas água pode ser utilizada para remover o material escavado (Yoshihiro, 1996).

c) Utilização de tuneladoras de couraça no Brasil

A primeira utilização de tuneladoras de couraça no Brasil aconteceu na construção do trecho central da linha Norte-Sul (linha 1 - azul) de São Paulo (1969). Nesse projeto foram utilizadas quatro máquinas tuneladoras, sendo duas com escavação mecanizada e frente fechada e duas manuais com frente aberta (Rocha, 2006). Nessa época EPB e *Slurry Shields* ainda não haviam sido criadas, assim a estabilização por ar comprimido foi utilizada nessas máquinas. A figura 17 mostra uma das tuneladoras utilizadas no projeto. Essas tuneladoras foram utilizadas novamente nas obras de outras linhas do metro de São Paulo.

Os avanços na tecnologia das tuneladoras fizeram elas se popularizarem também em obras de saneamento. A escavação com *Mini-Shield*, versão com um diâmetro menor, é uma das melhores alternativas para escavações de saneamento em trechos urbanos.

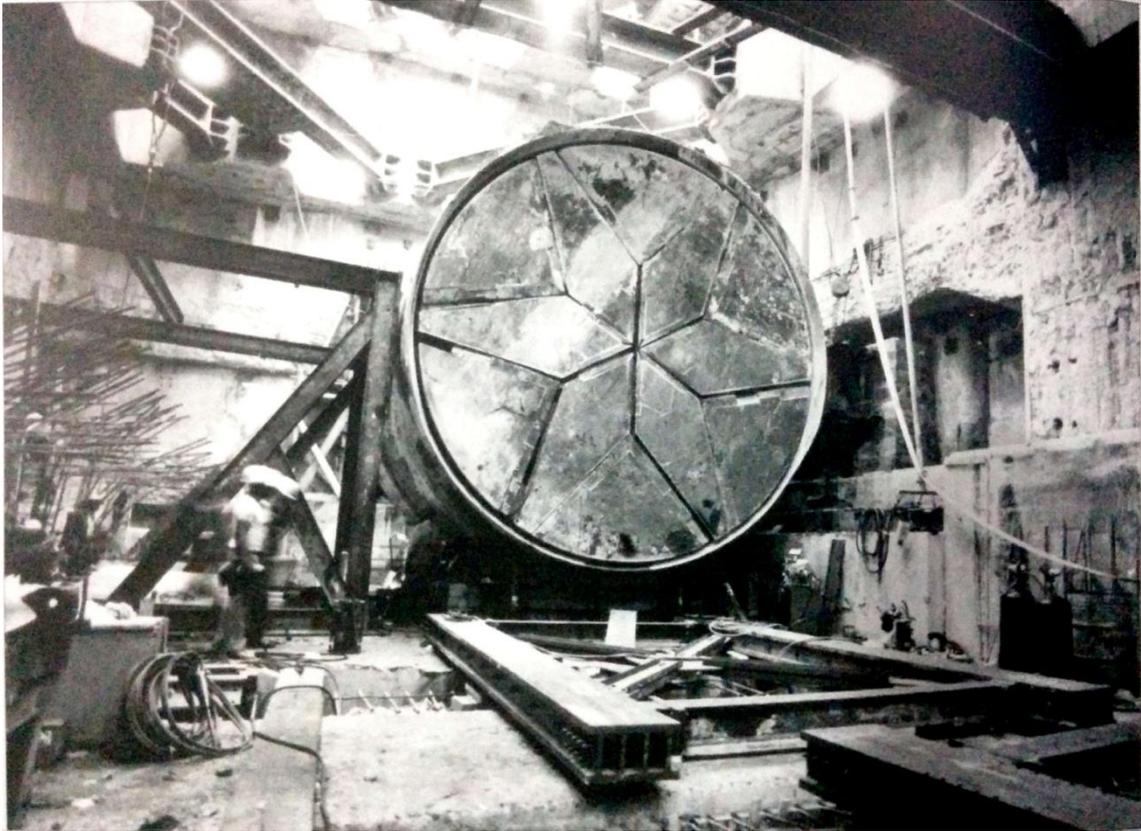


Figura 17 – Tuneladora utilizada na Linha 1 do metrô de São Paulo

2.4.4. NATM – New Austrian Tunneling Method

NATM – New Austrian Tunneling Method (novo método de tunelamento Austríaco em Inglês) é um método de escavação seqüencial que ganhou visibilidade nos anos 1960 e hoje é um dos métodos mais populares de escavação. Esse método foi desenvolvido entre os anos de 1957 e 1965 pelos especialistas Von Rabcewics, Pacher e Muller-Salzburg.

Os métodos antigos de escavação seqüencial em rocha frágil requeriam um complexo sistema de parcialização e de escoramento. O escoramento era muitas vezes garantido por peças de madeira. As Figuras 18 e 19 mostram os métodos Austríaco e Belga, respectivamente.

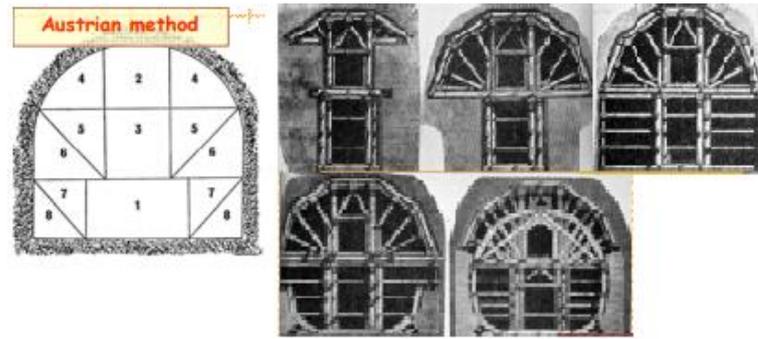


Figura 18 – Esquema do antigo método Austríaco de construção de túneis

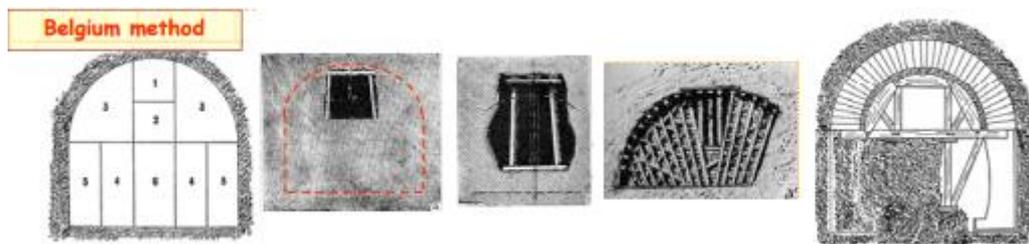


Figura 19 – Esquema de ataque do método Belga

No NATM tem como princípio se aproveitar da capacidade de suporte do próprio solo. As escavações são realizadas de forma convencional e um elemento de suporte é aplicado nas paredes (usualmente concreto projetado). Após a escavação, a estrutura definitiva pode ser colocada, até então a estabilidade do túnel é garantida principalmente pela capacidade de sustentação do próprio solo (Rocha, 2014).

Nem todo solo é capaz de se manter estável durante as escavações, por conta disso medidas auxiliares como a utilização de enfilagem, combotas e concreto projetado são utilizadas. Essas medidas aumentam a resistência e redistribuem as tensões no maciço.

A enfilagem se dá da seguinte maneira. Antes da escavação, uma perfuratriz faz furos, geralmente acima da coroa do túnel (Figura 20). A quantidade e angulação dos furos dependerão das especificações do projeto. Após a perfuração os furos são limpos e é feita uma injeção de calda de cimento. Em seguida são inseridos tubos de aço, o que conclui o processo. A enfilagem é repetida em cada nova seção de escavação.



Figura 20 – Perfuratriz realizando furos para a enfilagem

Já as cambotas são estruturas metálicas montadas em formato de arco, que circundam a seção. O espaçamento entre as cambotas, bem como suas dimensões, vão variar de acordo com as condições do maciço. A Figura 21 mostra um esquema de enfilagem e cambotas em um trecho de túnel.

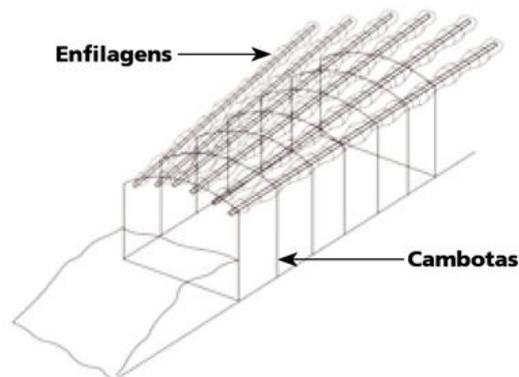


Figura 21 – Esquema de enfilagens e cambotas

Parcializar a escavação também é uma ferramenta utilizada para garantir a sustentação do maciço, na Figura 22 estão esquematizadas algumas seqüências de escavação comumente empregadas (Domingues, 2016)

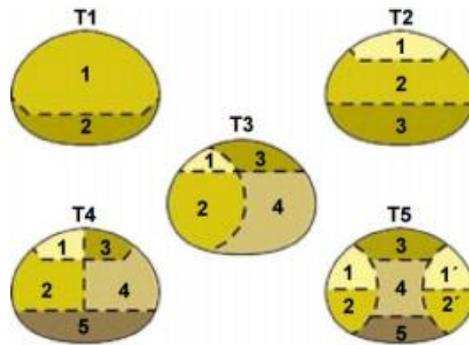


Figura 22 – Sequências de avanço parcializadas

O concreto projetado é a medida mais comum e está presente em quase todas as obras que utilizam NATM, costuma ser a ultima medida estabilizadora, marcando o final da escavação de um determinado trecho da seção (Figura 23).



Figura 23 – Concreto projetado aplicado em parede de túnel NATM

É possível que ao escavar parte da seção, seja necessária uma concretagem provisória, que será removida posteriormente para dar continuidade à escavação. Isso ocorre na técnica de arco invertido provisório, onde primeiro é concretado um arco menos profundo, que depois será demolido e abaixo dele será feito um arco definitivo (Figura 24)

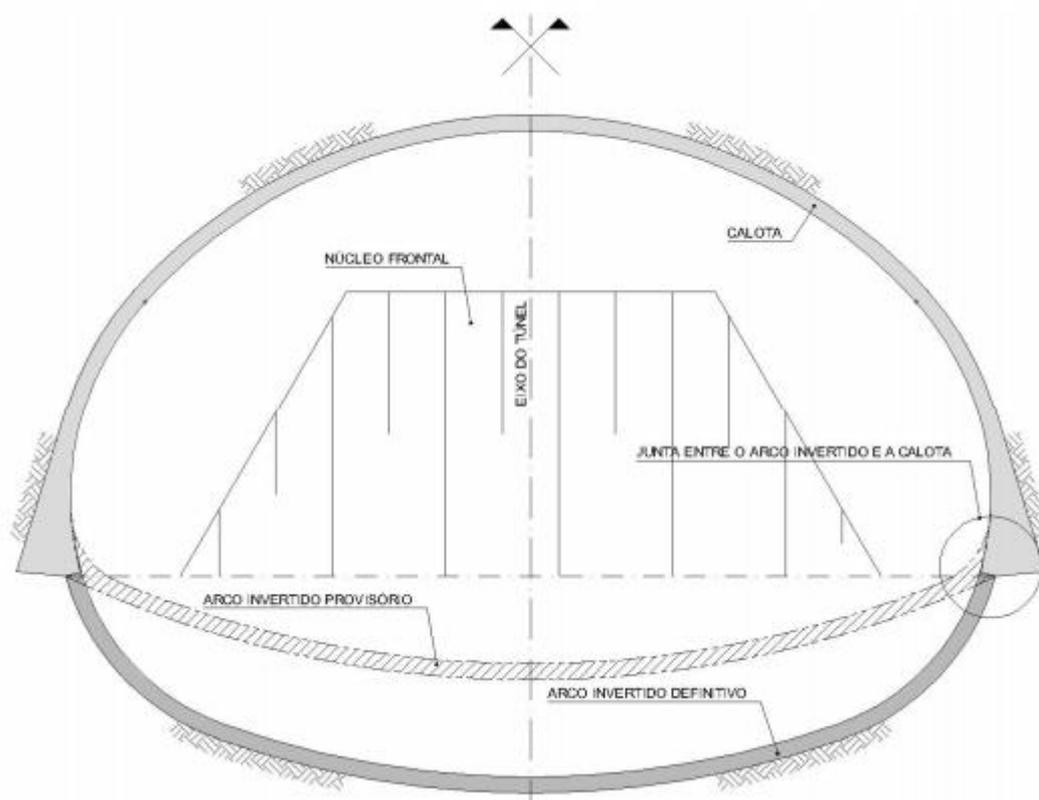


Figura 24 - Arcos invertidos provisório e definitivo

Em casos de escavações abaixo do nível da água, métodos de rebaiamento do lençol freático ou de bloqueio do fluxo d'água são necessários.

Existem inúmeras medidas de estabilização que podem ser adaptadas conforme o avanço da escavação. Assim, é importante que o maciço de solo seja monitorado de forma constante através de observações instrumentadas da convergência da seção, dos recalques superficiais e dos níveis piezométricos nas proximidades (Travagin, 2012)

O NATM é uma técnica que usualmente representa menores investimentos, permite escavar de forma mais flexível, com diferentes formas de seção e pode ser adaptado à diferentes solos. A sua maior desvantagem é a necessidade de monitoramento constante, nos casos de túneis urbanos esse monitoramento deve ser ainda mais rigoroso, tendo em vista que deslocamentos do solo podem danificar estruturas já existentes na região (Domingues, 2016).

No Brasil NATM é o método de tunelamento subterrâneo mais popular e foi adotada pela primeira vez no final da década de 1960 e início da década de 1970, na pista ascendente da Rodovia dos Imigrantes. (Carvalho, 2006).

Essa técnica foi empregada também na linha (Norte-Sul) do Metrô de São Paulo em 1979. Nos anos seguintes essa técnica se popularizou pelo Brasil, o metrô de Brasília, por exemplo, tem um trecho inteiro construído com essa técnica (Rocha, 2006).

Na década de 1990, aproximadamente 20 anos depois da construção da pista ascendente, foi construída a pista descendente da Rodovia dos Imigrantes, por se tratar de uma área de preservação ambiental o traçado original foi alterado, priorizando áreas de túneis a viadutos. Nela também foi utilizado o NATM, porém nesse caso dois terços da pista é composta por túneis, enquanto a ascendente essa fração é de apenas um terço (Carvalho, 2006). Esse foi um marco que mostra bem como o método teve grande aceitação ao longo dos anos. Mostra também uma diferença de mentalidade, em que impactos ambientais passam a ser mais considerados.

2.4.5. Pórticos de tubos justapostos cravados

Pórticos de tubos justapostos são uma boa alternativa para túneis de travessias nos quais uma pequena passagem subterrânea precisa ser construída em meio urbano. A vantagem dessa técnica é a possibilidade de escavar a uma distância pequena da superfície e com recalques mínimos (Domingues, 2016).

A etapa construtiva funciona da seguinte forma. Trincheiras são escavadas nas duas extremidades do futuro túnel. Uma fundação será construída e servirá de suporte para pórticos nos dois extremos. Sobre a fundação são construídas as colunas, vigas e lajes que darão suporte aos tubos que serão cravados justapostos ao longo do trecho do túnel. O solo presente no interior de cada tubo é retirado e o vazio é preenchido com concreto. Essa estrutura atuará como uma cobertura, dando sustentação ao maciço enquanto o túnel é construído abaixo. A Figura 25 identifica os componentes estruturais do método (Domingues, 2016).

Em Recife um túnel utilizando essa técnica foi construído por debaixo da Av. Herculano Bandeira para facilitar o acesso ao RioMar Shopping. Esse túnel possui aproximadamente 5,0 m de altura, comporta quatro faixas de rolagem, o túnel em si possui cerca de 78,0 m de extensão, se contarmos do início ao fim das rampas totaliza cerca de 230 m de extensão. As Figuras 26 e 27, mostram respectivamente, o processo de cravação dos tubos durante a obra e a entrada do túnel já concluído.



Figura 25 – Pórticos de tubos justapostos



Figura 26 – Cravação dos tubos do túnel sob Av. Herculano Bandeira

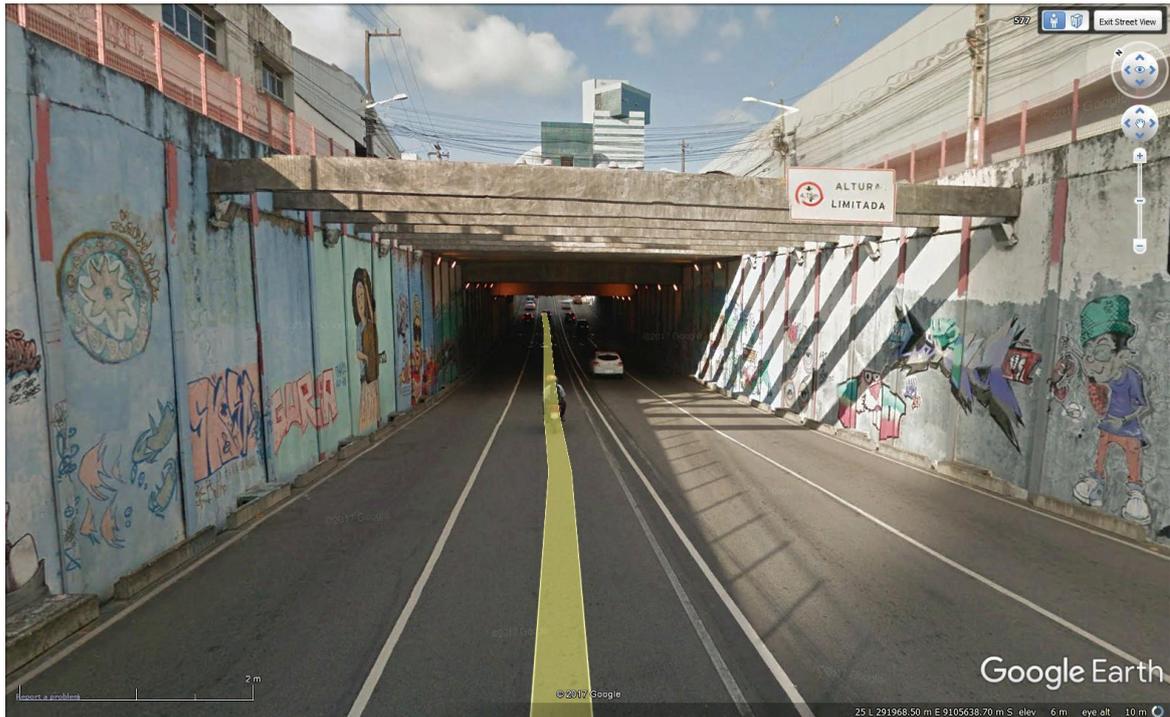


Figura 27 – Fotografia da entrada do túnel sob a Av. Herculano Bandeira

2.4.6. Pórticos compostos de colunas horizontais de *Jet Grouting*

Esse tipo de pórtico possui conceito e execução muito parecidos com os dos pórticos de tubos, a diferença é apenas que no lugar de tubos, as vigas superiores são formadas por colunas de *Jet Grouting*. Essa técnica permite que as colunas sejam posicionadas de maneira que formam um arco, o que permite que as tensões sejam mais bem distribuídas. O formato de arco é mais comum quando a escavação ocorre muito próxima da superfície. A Figura 28 apresenta o esquema da seção transversal de um túnel escavado por esse método (Domingues, 2016).



Figura 28 – Seção transversal de túnel feito com pórticos de colunas de *Jet Grouting*

2.5. Comportamento do solo

a) Deformações

Os processos executivos de escavação, retirada de material e construção de estrutura que envolve a criação de um túnel interferem no solo que o rodeia, provocando deformações. O efeito mais comum é o recalque que ocorre no maciço acima do túnel. É possível também que durante alguns estágios da escavação de métodos como TBM ocorra uma leve elevação do solo na superfície.

TBM, pórticos de tubos e pórticos de colunas de *Jet Grouting* são métodos que minimizam as deformações na superfície.

b) Mudanças de tensões

Antes das escavações o solo se encontra em estágio de equilíbrio. Após as escavações esse estado é alterado, provocando mudanças nas tensões do solo que circunda o túnel. Como essas tensões vão se distribuir vai variar de caso para caso. É comum o emprego de *softwares* que utilizam métodos dos elementos finitos para determinar as mudanças de tensões ao redor do túnel, bem como as deformações que ocorrem no solo.

c) Mudança na pressão da água

As escavações provocam mudanças também no lençol freático. É comum em escavações abaixo da lamina d'água a ocorrência de infiltrações, fazendo com que o túnel

atue como um dreno, baixando o nível da lamina d'água. Caso as infiltrações sejam muito intensas é possível que o andamento da escavação seja comprometido.

A permeabilidade do solo e a velocidade de escoamento da água subterrânea são fatores que influenciam em efeitos de mudança de pressão e deformação em um prazo mais longo. Além disso, a pressão da água tem influencia em um efeito de compressão em rochas (Anagnostou, 2006)

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

Existem muitas variáveis que devem ser consideradas no processo decisório do método construtivo. Deve-se conhecer as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos disponíveis, bem como características físicas, econômicas e sociais da região onde se deseja implementar a estrutura.

Travagin (2012) apresenta oito parâmetros que devem ser estudados a fim de decidir qual método construtivo é mais adequado. São eles: finalidade, características do solo, cobertura do maciço sobre o túnel, ocupação da superfície, seção transversal dos túneis, extensão do túnel, taxa de avanço requerida e a modalidade contratual da obra.

A finalidade do túnel é um primeiro filtro que permite tomar as primeiras diretrizes. Em casos de túneis rodoviários já sabemos, por exemplo, o que o túnel irá abrigar, qual área deverá ter a seção e os métodos construtivos já começam a se limitar (Travagin, 2012).

As características do solo são também cruciais no processo decisório. Solos mistos, onde existem variações grandes no tipo de solo no trecho escavado, podem inviabilizar o uso de TBM. O *stand up time* do solo pode ser um limitador ao uso do NATM (Travagin, 2016). Em técnicas como *Cut and Cover*, o tipo de solo determinará os tipos de suporte, e a quantidade de escoras.

O arqueamento das tensões provoca deformações no solo que impactam a superfície. Quanto menor a cobertura do maciço, maiores serão as deformações na superfície. O próprio solo acima do túnel atua como elemento resistente, o que faz com que túneis mais profundos apresentem um menor impacto na superfície. Dependendo da profundidade do maciço técnicas de *Cut and Cover* se tornam inviáveis (Travagin, 2012).

A ocupação da superfície determinará a viabilidade de utilizar métodos a céu aberto, ou se é necessária a utilização de métodos subterrâneos. Esse parâmetro também é necessário para o conhecimento das deformações admissíveis (Travagin, 2016).

A seção transversal é outro fator limitante na escolha dos métodos. As TBMs, por exemplo, escavam apenas seções uniformes e com curvas suaves. A grande maioria dessas tuneladoras apresenta seção circular.

A extensão do túnel é outro fator determinante na utilização de métodos mecanizados como as TBMs. São necessárias grandes distâncias para justificar a utilização de máquinas que requerem um investimento inicial elevado. O gráfico da Figura 29 busca mostrar as situações em que o uso de TBM é viável quando comparado ao NATM (Travagin apud Sauer, 2004)

Outra fonte (Travagin apud Nord, 2006) sugere que para túneis escavados com TBMs em que o diâmetro da seção equivale a 3,5 m e onde a resistência da rocha escavada equivale a 150 MPa, o túnel se torna viável a partir de 3 km de extensão. Caso o diâmetro seja 7 m, a distancia requerida é de 6 km.

O prazo de conclusão da obra determinará a taxa de avanço requerida. A taxa de avanço é influenciada pelo tipo do solo e método construtivo. Métodos mecanizados como TBM, permitem uma taxa de avanço bem elevada, podendo ser 3 a 10 vezes mais rápida que técnicas não mecanizadas (Travagin, 2006).

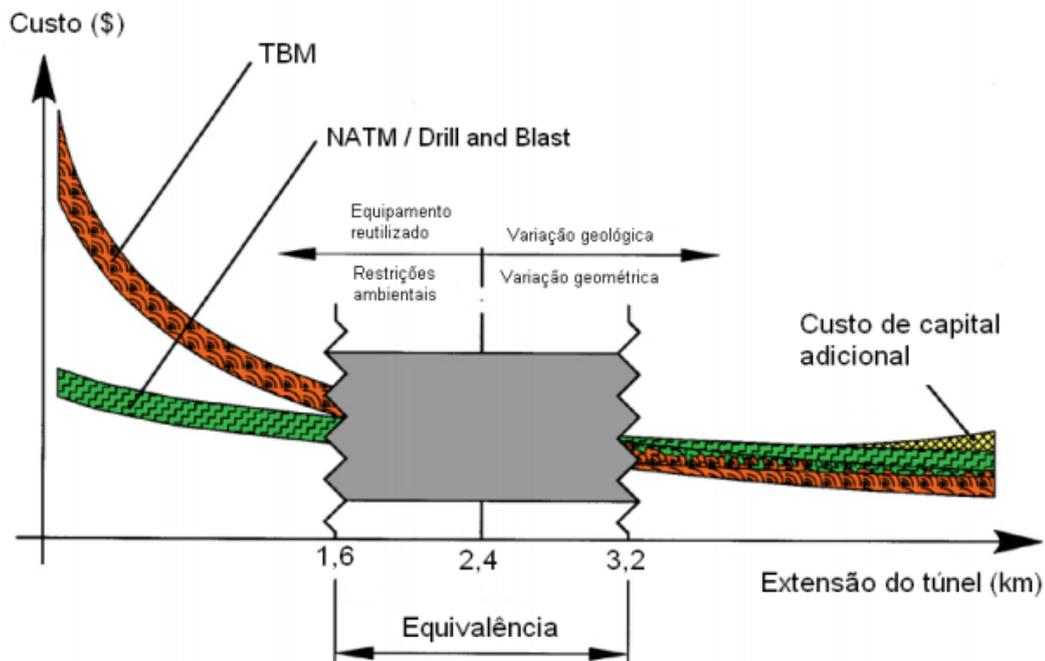


Figura 29 – Comparativo entre TBM e NATM

Por se tratar de obra de infra-estrutura, a construção de túneis tem iniciativa pública. Os tipos de contrato mais comuns são a empreitada por preço fechado e a empreitada por

preços unitários, sendo fator decisivo aqui os níveis de incerteza do projeto. Nos casos em que envolvem a realização de serviços posteriores, é comum a utilização de parcerias público-privadas (Travagin, 2006).

Esse trabalho faz um estudo de caso dos dois principais túneis rodoviários da cidade e leva em consideração os seis primeiros parâmetros mencionados acima, que são: finalidade, características do solo, cobertura do maciço sobre o túnel, ocupação da superfície, seção transversal dos túneis e extensão dos túneis.

4. ESTUDO DE CASO

Aqui são estudados os túneis em paralelo da Rua Guedes Pereira (Túnel Damásio Franca) e Av. Miguel Couto. Esses dois túneis tiveram origem com a construção dos viadutos sob a Rua Visconde de Pelotas e Av. Duque de Caxias nos anos 1970. Essas obras foram construídas utilizando métodos destrutivos de Vala à Céu Aberto, tipo convencional (*Bottom-Up construction*). Essas obras foram alvos de grande polemicas, muitos autores questionam a necessidade de construção dos viadutos e criticam a destruição das estruturas que pertencem ao patrimônio cultural do local para a construção dos túneis (Silva, 2010; Chaves, 2014; Sarmiento, 2010).

Como mencionado na revisão literária, métodos de Vala à Céu Aberto costumam representar menores custos e praticidade construtiva. No entanto esses métodos requerem a destruição e reconstrução de parte da infraestrutura local.

As obras da Rua Guedes Pereira foram as que mais geraram críticas, grande parte do Ponto dos Cem Réis foi desconstruído para a construção dos dois viadutos nos anos 1970. Em 2009 foi então realizada uma reforma no Ponto de Cem Reis que restaurou suas dimensões antigas, cobrindo parte da Rua Guedes Pereira.

A Figura 30 mostra imagem de satélite dos dois túneis, do lado esquerdo o túnel da Rua Guedes Pereira e lado direito o túnel da Av. Miguel Couto. A Figura 31 mostra o túnel da Rua Guedes Pereira e o Ponto de Cem Réis, antes e depois da reforma de 2009. E a Figura 32 mostra o túnel da Av. Miguel Couto por outro ângulo.

A seguir serão analisadas as características dos túneis, o que permite entender a escolha do método construtivo adotado e refletir sobre outras possibilidades.

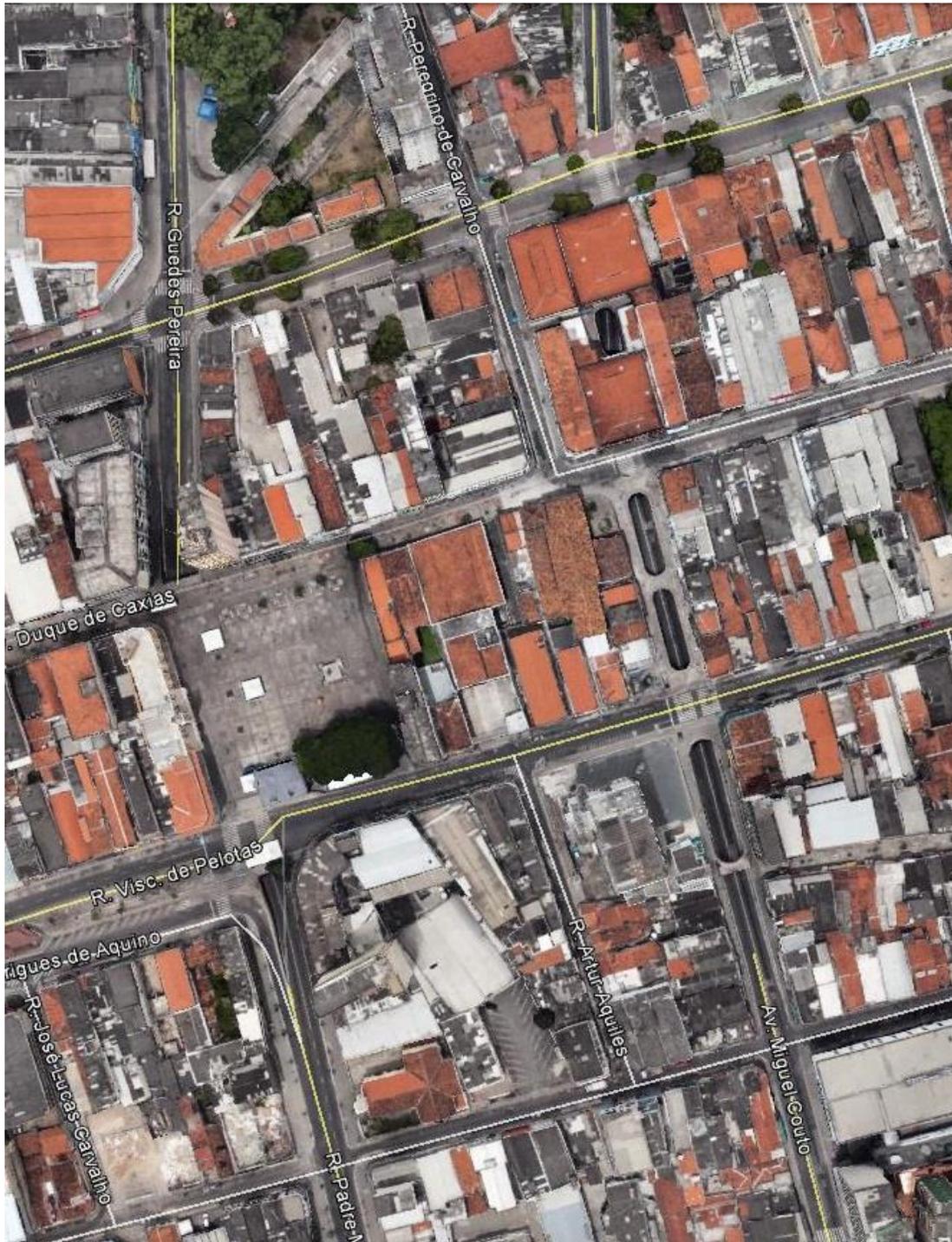


Figura 30 – Túneis da Rua Guedes Pereira e Av. Miguel Couto



Figura 31 – Túnel Damásio Franca e Ponto de Cem Réis, do lado esquerdo após a obra de 1970 e do lado direito imagem recente já depois da reforma de 2009



Figura 32 – Túnel da Av. Miguel Couto

a) Finalidade

Os túneis em questão foram criados com o objetivo de melhorar o transporte rodoviário entre a Cidade Baixa e a Lagoa do Parque Sólon de Lucena. Ambos comportam duas faixas de rolagem, o túnel da Rua Guedes Pereira atende os veículos que trafegam em direção a Lagoa e o túnel da Av. Miguel Couto atendem os veículos que se destinam a Cidade Baixa.

b) Características do solo

A região onde foram construídos os túneis apresenta um solo bastante coesivo e sem presença de água. Essas características são comuns as partes mais altas da cidade de João Pessoa e são bem favoráveis ao método construtivo empregado de Vala à Céu Aberto, faz com que seja mais simples o escoramento das paredes durante a construção e evita a necessidade de controle da água do subsolo.

Esse solo também é propício para o uso de outros métodos construtivos como o NATM ou o Shield Tunneling.

c) Cobertura do maciço sobre o túnel

Métodos de Vala à Céu Aberto permitem que os túneis possuam cobrimentos mínimos. Os dois túneis possuem uma cobertura de cerca de 1m.

d) Ocupação da superfície

Esse é o parâmetro que mais gerou polemica em relação a construção dessas estruturas. A área sob a qual as vias construídas passam era de grande movimentação, sobretudo no Ponto de Cem Réis, que era uma praça que concentrava todas as manifestações públicas da cidade, além de ser um centro de serviços diversos, como transportes, lanches, cafés e cinema (Chaves, 2014).

De acordo com Chaves (2014):

O ‘viaduto de Damásio’, como ficou conhecido, foi concebido em uma área densamente construída, não respeitou as características do local de reconhecido valor histórico, apresentava-se como inovador, enquanto que era prioritariamente e propositadamente desagregador. (...). O projeto não possuía qualquer estudo sobre o impacto socioambiental, a questão do transporte que circulava por aquela área, e sobretudo uma intervenção desse porte, em uma área histórica

Outros autores como Silva (2010) e Sarmiento (2010) também suportam a idéia de que os viadutos construídos causaram impactos negativos na região que fora antes de grande

movimentação e de importância histórica. Os autores sugerem que essas obras aceleraram o processo de marginalização desse centro urbano.

Embora parte desse problema se deva ao acesso a praça que se tornou mais difícil, parte da desvalorização do Ponto dos Cem Réis se deve a sua destruição parcial. O que levou a prefeitura a realizar uma reforma em 2009 que cobriu parte da via estendendo novamente a praça.

Os problemas gerados nessas obras poderiam ter sido minimizados caso tivesse sido adotado um método não destrutivo como o NATM. No entanto na década de 1970 a utilização do NATM estava apenas começando no Brasil como foi mostrado na revisão literária.

e) Seção transversal do túnel

Ambos os túneis possuem seção retangular com largura em torno de 8,70 m. No caso do túnel da Rua Guedes Pereira, a altura da seção é de pouco mais de 3 m. Já o túnel da Av. Miguel Couto possui altura de cerca de 4,4 m.

f) Extensão do túnel

A via Guedes Pereira passa por um trecho subterrâneo único que passa sob o Ponto dos Cem Réis e a Rua Visconde de Pelotas, o que representa um trecho de aproximadamente 100 m. Esse valor foi obtido através da ferramenta de medição do Google Earth, como Mostrado na Figura 33.

O túnel da Av. Miguel Couto é composto de uma série de viadutos, os mais longos possuindo 57 m e 46 m de extensão. As medições dessas passagens foram obtidas também através do software Google Earth.

As extensões e o formato do túnel não favorecem métodos de pórticos, ou seja, mesmo que a tecnologia estivesse disponível na época da construção das obras, ela não seria uma alternativa viável.

O método não destrutivo adequado para essas distancias é o NATM.

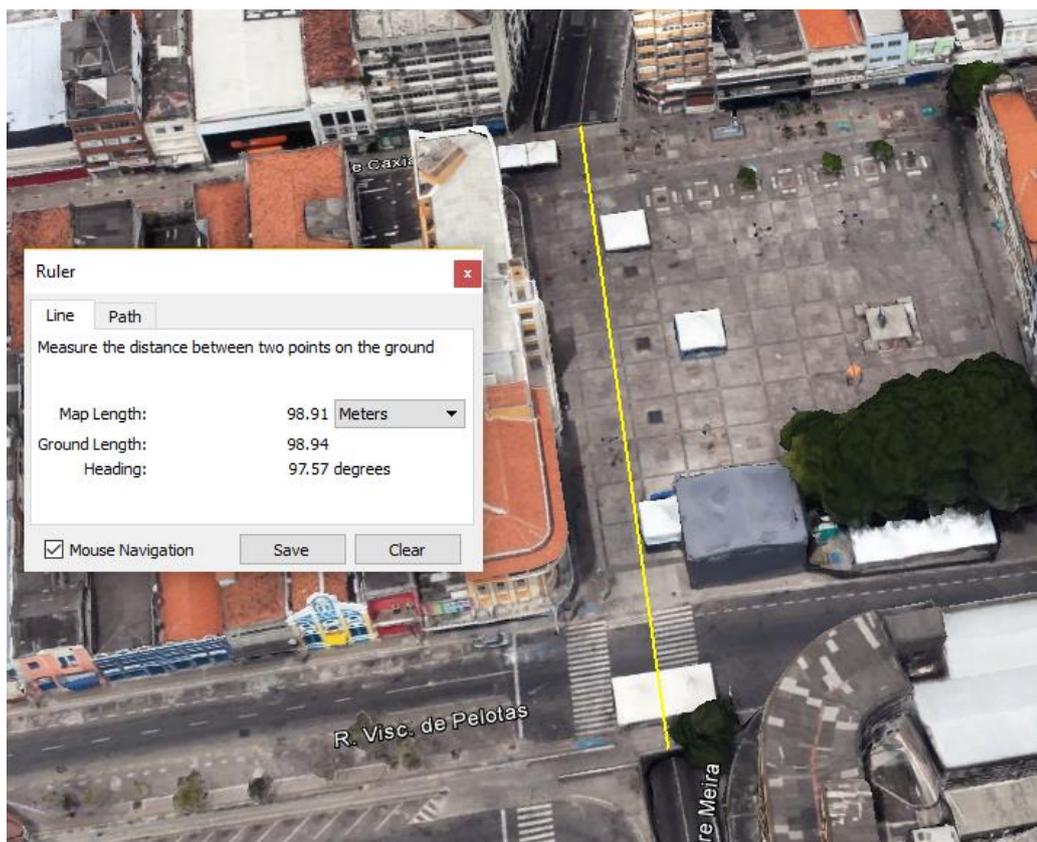


Figura 33 – Medição da extensão do túnel Damásio Franca

5. CONCLUSÕES

O trabalho fez uma análise histórica e revisou os principais tipos de túneis, classificados de acordo com o método construtivo. Foram também apresentados os principais fatores considerados na escolha de um método de construção de túneis.

Baseado na revisão literária foi analisado a escolha do método construtivo dos túneis da Rua Guedes Pereira e da Av. Miguel Couto. O método de Vala à Céu Aberto adotado na obra se adequa bem às características do solo, a extensão e ao formato do túnel. No entanto autores apontam que a construção dessas passagens subterrâneas prejudicou a infraestrutura pré-existente que possuía elevado valor cultural e histórico.

Métodos não destrutivos poderiam contornar ou reduzir esse problema, o NATM é a tecnologia mais indicada para a construção de túneis com essas características. Porém essa tecnologia na década de 1970 ainda não havia sido bem difundida no Brasil.

Esse trabalho não busca ponderar a importância dos túneis no sistema viário. O que podemos concluir aqui, é que dentro do contexto da época os métodos de Vala à Céu Aberto

se mostram mais indicados para as obras realizadas. A crítica que pode ser feita aqui é em relação ao espaço de quase três décadas para a realização da reforma do Ponto de Cem Réis, que aconteceu apenas em 2009.

É interessante mencionar também que partes elevadas da cidade de João Pessoa, como as dos casos estudados, possuem solos coesivos e sem presença de água, que são características que facilitam a utilização de VCA ou NATM. Essas características podem ser aproveitadas em obras futuras de infraestrutura subterrânea.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEAVER, Patrick. **A History of Tunnels**. The Citadel Press. Nova Jersey, Estados Unidos. 1972.
- CARVALHO, Newton. **Túneis do Brasil – Túneis Rodoviários**. Comitê Brasileiro de Túneis. DBA Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.
- CELESTINO, Tarcísio B. **Túneis do Brasil – Apresentação**. Comitê Brasileiro de Túneis. DBA Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.
- CHAVES, Liana M. **Revitalização do ‘Ponto de Cem Réis’: Usos e Contra Usos**. 23º encontro da ANPAP – “Ecosystemas Artísticos”. Minas Gerais, Brasil. 2014
- DETRAN-PB. **Evolução da Frota em 11 Anos**. Disponível em: <
http://www.detran.pb.gov.br/index.php/estatisticas/cat_view/317-estatisticas.html>. Acesso em 15 abr 2017.
- DOMINGUES, Vinícius Resende. **Técnicas Construtivas de Túneis de Travessia**. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 2016.
- DURAZZO, Flávio. **Túneis do Brasil – Obras Subterrâneas para Saneamento da Grande São Paulo**. Comitê Brasileiro de Túneis. DBA Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Infográficos: Evolução Populacional**. IBGE, Cidades, Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <
<http://cidades.ibge.gov.br/painel/populacao.php?lang=&codmun=250750&search=paraiba|joao-pessoa|infogr%E1ficos:-evolu%E7%E3o-populacional-e-pir%E2mide-et%E1ria>>. Acesso em 15 abr 2017.
- KONDA, Toru. **Shield Tunneling Methods**. Tokyo Metropolitan University. Toquio, Japão. 2001.
- MAIDL, Bernhard, Martin Herenknecht, Ulrich Maidl, Gerhard Wehrmeyer, and David S Sturge. **Mechanized Shield Tunneling**. Verlag C.H. Beck. Alemanha. 2012.
- MELO, José Reynolds Cardoso de, Gilson Barbosa Athayde Junior, Orlando de Cavalcanti Villar Filho. **A Contribuição de Saturnino de Srito para o Urbanismo e Saneamento de João Pessoa-PB**. Centros Morte e Vida dos Centros Urbanos. Bahia, Brasil. 2016.
- MOREIRA, Carlos Manuel da Cruz. **Túneis, Uma Herança Ancestral Rumo ao Futuro**. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, Portugal. 2006.

MOTA, Igor Moreira. **Análise dos Critérios de Projeto e Comportamento de Túneis de Pressão**. Instituto de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 2009.

ROCHA, Hugo Cássio, Kenzo Hori. **Túneis do Brasil – Túneis Metroferroviários**. Comitê Brasileiro de Túneis. DBA Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

ROCHA, Matheus de Oliveira. **Estudo da Estabilidade da Frente de Escavação em Túneis Rasos em Solo**. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, Brasil. 2014

SARMENTO, Bruna Ramalho, Iara Batista da Cunha, Maria Berthilde Moura Filha, Maria Helena de Andrade Azevedo. **As Construções e Desconstruções do Ponto de Cem Réis na Cidade de João Pessoa – PB**. I Seminário internacional urbicentros. Paraíba, Brasil. 2010

SILVA, Ivonaldo Lacerda da. **Representação Iconográfica em dois Momentos: Século XX e XI em João Pessoa**. Universidade Federal da Paraíba. Paraíba, Brasil. 2010

SOUZA, Jean Carlo Trevizolo. **Proposta de diretrizes gerais para projeto de túneis rodoviários**. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 2012.

TELLES, Pedro C. da Silva. **Túneis do Brasil – Túneis Antigos no Brasil**. Comitê Brasileiro de Túneis. DBA Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

TRAVAGIN, Vinicius Bernardino. **Subsídios para Escolha do Método Construtivo de Túneis**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, Brasil. 2012.

VAZ, Luiz F. **Túneis do Brasil – As Obras Subterrâneas em Aproveitamento Hidrelétrico**. Comitê Brasileiro de Túneis. DBA Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

YOSHIHIRO, Takano. **State of the Art on Shield Tunnelling in Japan- Automation of Shield Tunnelling**. Modern Engineering and Technology. Japão. 1996