

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**REVITALIZAÇÃO DE CENTROS URBANOS POR OBRAS  
SUBTERRÂNEAS: CASO ESTUDO DO TÚNEL MARCELLO  
ALENCAR NO RIO DE JANEIRO**

**JOSÉ MAYCON DE ARAUJO ESTANISLAU**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
CIVIL NA ÁREA DE GEOTECNIA**

**BRASÍLIA / DF: JULHO/2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**REVITALIZAÇÃO DE CENTROS URBANOS POR OBRAS  
SUBTERRÂNEAS: CASO ESTUDO DO TÚNEL MARCELLO  
ALENCAR NO RIO DE JANEIRO**

**JOSÉ MAYCON DE ARAUJO ESTANISLAU**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)**

**(ORIENTADOR)**

---

**MICHELLE ANDRADE, DSc (UnB)**

**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**LAIS KODAMA CORREA DE MORAES, Engenheira Civil**

**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 11 DE JULHO DE 2017.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ESTANISLAU, JOSÉ MAYCON DE ARAUJO

Revitalização de centros urbanos por obras subterrâneas: caso estudo do Túnel Marcello Alencar no Rio de Janeiro [Distrito Federal] 2017.

xii, 76 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Túneis

2. Mobilidade Urbana

3. Marcello Alencar

4. Soluções Subterrâneas

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ESTANISLAU, J.M.A. (2017). Revitalização de centros urbanos por obras subterrâneas: caso estudo do Túnel Marcello Alencar no Rio de Janeiro. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: José Maycon de Araujo Estanislau

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Revitalização de centros urbanos por obras subterrâneas: caso estudo do Túnel Marcello Alencar no Rio de Janeiro

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

José Maycon de Araujo Estanislau

SHCGN 711 Bloco H apt 201

70.750-768 - Brasília/DF - Brasil

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, José Carlos Estanislau e Miriam Estanislau, a minha irmã Stephanie Estanislau e ao meu cunhado Felipe Mury.

Dedico também aos meus grandes amigos e engenheiros Arthur Nobre, Bianca Fonseca, Bráulio Marques, Jéssica Tavares, Laís Campos, Lucas Pitta, Marcelo Matias, Mariane Oliveira, Pâmella Brenda, Pedro Ivo, Raíssa Arvellos, Suellen Souza, Vinícius Manfrini e Vinícius Vaz.

Dedico também ao meu amigo Lúcio Willian.

Dedico também aos meus grandes apoiadores Antônio Carlos Ferrerira e Valéria Godlesky.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, aos meus pais e a minha irmã pelo apoio incondicional;

Agradeço também ao Professor André Assis pela orientação e palavras de estímulos quando necessárias;

Agradeço aos meus colegas que muito me ajudaram no decorrer do projeto, principalmente Alice Pacheco e Felipe Nisiyama.

# **REVITALIZAÇÃO DE CENTROS URBANOS POR OBRAS SUBTERRÂNEAS: CASO ESTUDO DO TÚNEL MARCELLO ALENCAR NO RIO DE JANEIRO**

**ESTANISLAU, J. M. A.**

## **RESUMO**

Soluções subterrâneas para obras de infraestrutura de transportes estão cada vez mais sendo utilizadas ao redor do mundo, tais como túneis rodoviários e ferroviários. Elas apresentam diversas vantagens sobre as construções convencionais e contornam muitos problemas advindos de obras em superfície, que em geral segregam a cidade. Este estudo discorre sobre obras subterrâneas que tiveram grande impacto na mobilidade local, abordando as dificuldades econômicas e políticas de sua construção. Apresenta também três métodos construtivos de túneis, versando sobre suas especificidades, pontos negativos e positivos. Então, faz-se o dimensionamento do túnel Marcello Alencar em duas seções distintas, a partir do software PLAXIS 2D e em seguida a análise dos possíveis recalques causados pela escavação do túnel pelo método convencional – NATM.

# **REVITALIZAÇÃO DE CENTROS URBANOS POR OBRAS SUBTERRÂNEAS: CASO ESTUDO DO TÚNEL MARCELLO ALENCAR NO RIO DE JANEIRO**

**ESTANISLAU, J. M. A.**

## **ABSTRACT**

Underground solutions for transport infrastructure are increasingly being used around the world, such as road and rail tunnels. They have several advantages over conventional constructions and overcome many problems arising from surface works, which generally segregate the city. This study discuss about underground works that have been having great impact on local mobility, addressing the economic and political difficulties of its construction. It also presents three tunnels constructive methods, discussing on their specificities, negative and positive aspects. Thus, the Marcello Alencar's tunnel conception is made in two distinct sections applying the PLAXIS 2D software and after following with the analysis of the possible displacements caused by tunneling by the conventional method - NATM.

# **REVITALIZAÇÃO DE CENTROS URBANOS POR OBRAS SUBTERRÂNEAS: CASO ESTUDO DO TÚNEL MARCELLO ALENCAR NO RIO DE JANEIRO**

**ESTANISLAU, J. M. A.**

## **RESUMÉ**

Solutions souterraines pour les projets d'infrastructure de transport sont de plus en plus utilisés dans le monde entier, comme les tunnels routiers et ferroviaires. Ils apportent plusieurs avantages par rapport aux constructions conventionnelles et contournent de nombreux problèmes découlant des travaux sur la surface, qui isolent habituellement la ville. Cette étude traite de travaux souterrains qui ont eu un grand impact sur la mobilité locale en abordant les difficultés économiques et politiques de ses constructions. Il présente également trois méthodes de construction de tunnels, faire face à leurs spécificités, ses points positifs et négatifs. Ainsi, la conception du tunnel Marcello Alencar en deux sections distinctes, à partir du logiciel 2D Plaxis et ensuite l'analyse des possible déplacements causés par l'excavation du tunnel par la méthode NATM.



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESCOPO.....	2
<b>2. TÚNEIS E URBANISMO.....</b>	<b>4</b>
2.1 CENTRAL ARTERY/TUNNEL PROJECT (CA/T) – BIG DIG .....	6
2.2 SÃO GOTARDO.....	8
2.3 SMART TUNNEL.....	9
2.4 TÚNEL MARCELLO ALENCAR .....	10
2.5 NOVA SUBIDA DA SERRA.....	12
2.6 TÚNEIS DA RODOVIA DOS IMIGRANTES.....	13
<b>3. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS.....</b>	<b>14</b>
3.1 MÉTODO DE ESCAVAÇÃO CONVENCIONAL.....	15
3.2 MÉTODO DE ESCAVAÇÃO MECANIZADO.....	17
3.3 MÉTODO DE ESCAVAÇÃO COMBINADO.....	19
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
<b>5. SOFTWARE PLAXIS 2D.....</b>	<b>26</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS CAMADAS DE SOLO E ROCHA .....	27
5.2 PROPRIEDADES DAS CAMADAS DE SOLO E ROCHA.....	28
5.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO TÚNEL .....	29
5.4 PROPRIEDADES DO SUPORTE DO TÚNEL.....	31
5.5 CARACTERÍSTICAS DA MALHA .....	33
<b>6. RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>35</b>
6.1 TENSÕES NO SOLO.....	35
6.2 ESFORÇOS NO SUPORTE .....	36
6.3 DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	40
6.4 DESCOLAMENTOS VERTICAIS.....	41
6.3.1 Seção 1.....	43
6.3.2 Seção 2.....	46
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE II .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE III.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Minhocão em horário de pico (AAPM, 2016).....	5
Figura 2.2: Vista aérea do projeto vencedor do Prêmio Prestes Maia de Urbanismo, que transforma o Minhocão em um parque (ARTIGAS <i>et al.</i> , 2008) .....	5
Figura 2.3: Antes e depois da implosão da <i>Central Artery</i> e construção do <i>Big Dig</i> (MENINO, 2013).....	7
Figura 2.4: Perfil longitudinal do Túnel de Base de São Gotardo (EHRBAR, 2008) .....	8
Figura 2.5: Modos de funcionamento do SMART Tunnel (DARBY, 2007).....	10
Figura 2.6: Mapa da Zona Portuária após a construção do Túnel Marcello Alencar (BRASIL, 2015).....	11
Figura 2.7: Trajeto da Nova Subida da Serra (NSS, 2016) .....	12
Figura 2.8: Trecho da Rodovia dos Imigrantes (CBT, 2006).....	13
Figura 3.1: Sequência de Perfuração no Método Convencional (TRAVAGIN, 2012).....	16
Figura 3.2: Setores de uma seção transversal a ser escavada (TRAVAGIN, 2012) .....	16
Figura 3.3: Tuneladora em operação no porto de Dublin (SAUER et MERGELSBERG, 2004).....	17
Figura 3.4: <i>Single Shield</i> TMB - (1) couraça (2) cilindros hidráulicos de propulsão (3) segmento pré-moldado instalado (4) corte (5) cavidade para entrada de material escavado (6) transportador (HERRENKNECHT, 2011) .....	18
Figura 3.5: <i>Gripper</i> TBM – (1) gripper (2) instalador de cambotas (3) perfuradores para ancoragem (4) instalador de malha de arame (HERRENKNECHT, 2011).....	18
Figura 4.1: Exemplo de cálculo do Projeto de um túnel através do programa Plaxis (PLAXIS, 2016a).....	21
Figura 4.2: Antigo Elevado da Perimetral passando pelo antigo Terminal Rodoviário Mariano Procópio (LETICHEVSKY, 2012) .....	22

Figura 4.3: Perfil Geológico e traçado altimétrico do Túnel Marcello Alencar .....	24
Figura 4.4: Impacto da perfuração de um túnel na fundação de um edifício (PLAXIS, 2016b) .....	25
Figura 5.1: Perfil geológico da Seção 1 .....	27
Figura 5.2: Perfil geológico da Seção 2 .....	28
Figura 5.3: Emboque do túnel Marcello Alencar em seção retangular (PORTO MARAVILHA, 2017) .....	30
Figura 5.4: Seção arco-retângulo do túnel Marcello Alencar (O DIA, 2016).....	30
Figura 5.5: Seção típica adotada para o túnel Marcello Alencar .....	31
Figura 5.6: Seção transversal e elemento infinitesimal do túnel.....	32
Figura 5.7: Malha não refinada na Seção 2 do túnel.....	33
Figura 5.8: Malha refinada na Seção 2 do túnel.....	34
Figura 6.1: Tensões efetivas verticais na seção 1.....	35
Figura 6.2: Tensões efetivas horizontais na seção 1 .....	35
Figura 6.3: Tensões efetivas verticais na seção 2.....	36
Figura 6.4: Tensões efetivas horizontais na seção 2 .....	36
Figura 6.5: Diagrama de momento Fletor da Seção 1.....	37
Figura 6.6: Diagrama de Momento Fletor da Seção 2 .....	37
Figura 6.7: Diagrama de Força Cortante da Seção 1.....	38
Figura 6.8: Diagrama de Força Cortante da Seção 2.....	38
Figura 6.9: Diagrama de Força Normal da Seção 1 .....	39
Figura 6.10: Diagrama de Força Normal da Seção 1 .....	39
Figura 6.11: Deslocamentos horizontais na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	40
Figura 6.12: Deslocamentos horizontais na seção 2 do túnel com escavação simultânea.....	41

Figura 6.13: Deslocamentos verticais na seção 1 do túnel com escavação simultânea .....	41
Figura 6.14: Deslocamentos verticais na seção 2 do túnel com escavação simultânea .....	42
Figura 6.15: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	42
Figura 6.16: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea.....	43
Figura 6.17: Recalques Distorcionais ao longo da superfície .....	44
Figura 6.18: Configuração geométrica dos elementos de fundação nas seções críticas .....	45
Figura 6.19: Recalques Distorcionais ao longo da superfície .....	46
Figura 6.20: Bacia de Recalques a 0m de profundidade na Seção 2 gerada pela escavação em etapas.....	48
Figura 6.21: Recalques Distorcionais ao longo da superfície .....	49
Figura AII.1: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	69
Figura AII.2: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	69
Figura AII.3: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	69
Figura AII.4: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	70
Figura AII.5: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	70
Figura AII.6: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea.....	70
Figura AII.7: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea.....	71

Figura AII.8: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea.....	71
Figura AII.9: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea.....	71
Figura AII.10: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea.....	72
Figura AIII.1: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas.....	73
Figura AIII.2: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas.....	73
Figura AIII.3: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas.....	74
Figura AII.4: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas.....	74
Figura AIII.5: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas.....	74
Figura AIII.6: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas.....	75
Figura AIII.7: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas.....	75
Figura AIII.8: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas.....	75
Figura AIII.9: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas.....	76
Figura AIII.10: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Parâmetros de entrada no PLAXIS 2D .....	29
Tabela 5.2: Valores de K0 para cada camada .....	29
Tabela 6.1: Recalques distorcionais críticos na Seção 1 .....	44
Tabela 6.2: Recalques distorcionais críticos na Seção 2 – Escavação Simultânea .....	47
Tabela 6.3: Deslocamentos verticais máximos na Seção 2 .....	48
Tabela 6.4: Recalques distorcionais críticos na Seção 2 – Escavação em Etapas.....	49
Tabela AI.1: Esforços Atuantes na Seção 1 do Suporte Túnel .....	56
Tabela AI.2: Esforços Atuantes na Seção 1 do Suporte Túnel .....	62

## LISTA DE ABREVIações

AAPM - Associação Amigos Parque Minhocão

ABNT- Associação

aC - Antes de Cristo

CA/T - *Central Artery/Tunnel Project*

c – Coesão

E – Módulo de Young

fck - Resistência característica do concreto à compressão

IPHAN - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

k - coeficiente de permeabilidade

k<sub>0</sub> - coeficiente de empuxo no repouso

m - metro

MAR - Museu de Arte do Rio

MEF- Método dos Elementos Finitos

MPa - MegaPascoal

NATM - *New Austrian Tunneling Method*

NFTA - Nova Transversal Ferroviária Alpina

NSS - Nova Subida da Serra

SMART Tunnel - *Stormwater Management And Road Tunnel*

SMRT – Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro

TBM - *Tunneling Boring Machine*

VLT - Veículo leve sobre trilhos



$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\gamma$  –Peso Específico

$\gamma_{\text{sat}}$  – Peso Específico Saturado

$\phi$  – Ângulo de Atrito

# 1. INTRODUÇÃO

O primeiro túnel urbano construído que se tem conhecimento remonta de 4000 anos atrás na Babilônia sob o leito do rio Eufrates, servindo como ligação subterrânea ao palácio real. Na sociedade Persa, por volta do século IX aC, túneis foram escavados em uma cadeia montanhosa próximo a nascentes de rios como solução para manter a temperatura da água utilizada e diminuir as perdas por evaporação. Os gregos também construíram túneis com a finalidade de abastecimento de água por volta de 500 aC, como o Aqueduto Eupalinos, um túnel de 1036 m na cidade de Samos. Os Romanos exploraram também tais soluções em um sistema de saneamento, como A Cloaca Máxima, o monumental sistema de coleta de esgoto urbano de Roma (MOREIRA, 2006).

Na idade Média o planejamento e construção de túneis teve finalidades militares. Na era moderna, o grande estímulo para a construção foi a proliferação dos canais de navegação. No século XIX, já na idade contemporânea, devido ao enorme desenvolvimento que as estradas de ferro obtiveram, registrou-se um novo estímulo para a construção de túneis. Atualmente tais obras subterrâneas são empregadas em transportes rodoviário e ferroviário, mineração, obras de saneamento, como distribuição de água e coleta de esgoto, entre outros (MOREIRA, 2006).

O espaço subterrâneo tem ganhado importância em todo o mundo e este fato é impulsionado pela crescente relevância que a humanidade vem atribuindo ao meio ambiente. A dita Era Ambiental é marcada pela substituição de elementos segregadores, como por exemplo, estradas e viadutos, por estruturas subterrâneas. A tendência de revitalizar os grandes centros remete a utilização da superfície, em grande maioria, para trabalho e moradia. No caso das atividades cotidianas que não se atribuem estes conceitos, com ênfase no tráfego, devem ocorrer na maior parte dos casos em estruturas subterrâneas. Esta nova concepção ambiental e de uso do espaço subterrâneo acarreta na revitalização dos grandes centros e consequente melhoria na qualidade de vida da população (DOMINGUES, 2006).

A questão ambiental deve ser prioridade, uma vez que os impactos que o desenvolvimento sem preocupação com a sustentabilidade proporciona são dantescos. Os túneis rodoviários surgem como uma solução para redução dos impactos ambientais trazidos pela construção de rodovias em superfícies, em especial em áreas de preservação ambiental, dado que a construção dessas estradas gera desmatamento e grande impacto na fauna local, o que por

diversas vezes impossibilita a implementação do projeto, pela dificuldade em obter licenciamentos ambientais em obras de grande porte que causem tais impactos.

O desenvolvimento sócio-econômico está relacionado com a demanda por transporte, pois a medida que um país se desenvolve ocorre um aumento da solicitação por transportes, tanto de pessoas quanto de cargas. Porém obstáculos naturais ou artificiais podem dificultar e até inviabilizar este transporte por meios convencionais. Obras subterrâneas são soluções eficazes que tem se mostrado ótimas alternativas para essa necessidade. Pode-se citar como exemplo a construção de túneis em regiões montanhosas a fim de minimizar significativamente as distâncias a serem percorridas por vias de transporte. Atualmente a utilização de túneis é ampla, e engloba não somente os transportes, mas também adução de água, esgoto, passagem de cabos, mineração, entre outros (ASSIS, 2016).

## **1.1. Motivação**

Nos tempos atuais há uma alta demanda por mobilidade urbana eficiente e as soluções subterrâneas constituem ótimas opções para essa solicitação. As construções de túneis para transporte urbano trazem diversos desafios agregados, tais como o próprio projeto, a escolha da metodologia de construção mais viável financeiramente e que gere menor transtorno na malha viária local durante a construção, o impacto dos possíveis recalques causados nas edificações em superfície, dentre outros. Nesse contexto esse estudo visa aprofundar não somente a visão geotécnica da construção de túneis, mas também sua importância econômica e ambiental, dentro do contexto de revitalização de centros urbanos por meio de obras subterrâneas.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é a realização de um projeto simplificado de túnel, bem como a análise dos possíveis deslocamentos que a escavação pode trazer nas edificações vizinhas. Também será levantado um panorama mundial e nacional de como as soluções subterrâneas podem impactar a configuração urbana local.

## **1.3. Escopo**

O Capítulo 2 dessa monografia tem como objetivo apresentar projetos de grande reconhecimento, que evidenciam como soluções subterrâneas foram utilizadas para melhorar a estrutura urbanística no Brasil e no mundo.

NoCapítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica, apresentando três métodos construtivos de túneis, bem como suas vantagens e desvantagens.

O Capítulo 4 é composto pela metodologia utilizada para se alcançar o objetivo do trabalho.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos, bem como as análises feitas.

Por fim, o capítulo 6 é a conclusão do trabalho.

## 2. TÚNEIS E URBANISMO

O debate sobre mobilidade urbana vem avançando cada vez mais no cenário mundial, uma vez que, as grandes cidades perceberam que as condições em que são realizados os deslocamentos de pessoas e de cargas no espaço urbano influenciam diretamente a economia local e o bem estar social(CAMPOS, 2006).

No Brasil, a Lei 12.587 de 2012 estabelece a política nacional de mobilidade urbana, instaurando as seguintes diretrizes:

I - Integração com a política de desenvolvimento urbano e respectivas políticas de habitação, saneamento básico, planejamento e gestão do uso do solo no âmbito dos entes federativos;

II - Prioridade dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados e dos serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado;

III - Integração entre os modos de serviços de transporte urbano;

IV - Mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas na cidade;

V - Incentivo ao desenvolvimento científico-tecnológico e ao uso de energias renováveis e menos poluentes;

VI - Priorização de projetos de transporte público coletivo estruturadores de território e indutores do desenvolvimento urbano integrado; e

VII - Integração entre as cidades gêmeas localizadas na faixa de fronteira com outros países sobre a linha divisória internacional (BRASIL, 2012).

Para alcançar uma mobilidade urbana eficiente e seguindo tais diretrizes, que valorizam o ambiente urbano enaltecendo o espaço em superfície, há uma tendência de abandono das vias expressas suspensas, que segregam o ambiente urbano e criam faixas de isolamento e desvalorizando a região (ABRAHÃO, 2011).

Segundo a Associação Amigos Parque Minhocão (2016), aqui denominada AAPM, através do Programa Parque Minhocão, este é o caso do Elevado João Goulart, conhecido popularmente como Minhocão na cidade de São Paulo. Se trata de uma via expressa concebida com o intuito de aliviar o trânsito de ruas que cortam a região central da cidade. Foi criada uma via elevada paralelamente às originais, duplicando a capacidade de tráfego. De fato o Minhocão trouxe grandes impactos urbanísticos na região por onde ele corta, porém essas mudanças foram pouco positivas.

Devido à grande vontade política, o projeto foi construído em 11 meses, tomando contado espaço da Praça Roosevelt até o Largo Padre Péricles. Com o passar do tempo, a região foi sofrendo desvalorizações por conta dos problemas de poluição do ar, sonora e visual causadas pela implementação do elevador. Com a desvalorização veio a deterioração e a partir de 1976, o Minhocão passou a ser interditado durante a noite, a fim de evitar acidentes noturnos e cessar os ruídos causados pelos automóveis que incomodavam os moradores da região. Atualmente o elevador fica interditado diariamente de 21h30 às 06h30 e aos domingos durante todo o dia, porém, durante o seu período em que fica aberto, ele passa por longos congestionamentos, como pode ser visto na Figura 2.1(AAPM, 2016).

Em 2006 a Prefeitura de São Paulo lançou o Prêmio Prestes Maia de Urbanismo para encontrar soluções para o Elevado João Goulart. Como indica a Figura 2.2, o projeto vencedor propõe a criação de um parque elevado, porém não há previsão de implementação.(ARTIGAS *et al.*, 2008).



Figura 2.1: Minhocão em horário de pico (AAPM, 2016)



Figura 2.2: Vista aérea do projeto vencedor do Prêmio Prestes Maia de Urbanismo, que transforma o Minhocão em um parque (ARTIGAS *et al.*, 2008)

Segundo o urbanista e professor José Sales, as soluções subterrâneas são excelentes alternativas para o transporte dentro das cidades e poderiam ter sido uma excelente escolha para os problemas de congestionamento na cidade de São Paulo. Ao redor do mundo infraestruturas de mobilidade eficientes estão buscando levar vias para um local menos valorizado, deixando a superfície livre para a circulação de pedestres, lazer e shopping centers, por exemplo (ALBUQUERQUE, 2013).

A seguir serão apresentados três casos internacionais e três casos brasileiros nos quais foram empregadas tais soluções, utilizando túneis para revitalizar e reurbanizar.

## **2.1 Central Artery/Tunnel Project (CA/T) – Big Dig**

A Artéria Central de Boston, localizada no estado de Massachusetts, Estados Unidos, foi inicialmente planejada nos anos 20 e construída na década de 50 como uma via expressa com segmentos elevados que cortavam o coração da cidade. A obra foi dividida em dois trechos principais. O primeiro foi construído entre 1951 e 1954, porém logo os moradores começaram a reclamar da nova estrutura da via e da forma com que ela se elevou, separando a vizinhança e segregando bairros. Devido a oposição popular o projeto foi reformulado e então o outro trecho foi construído por meio de obras subterrâneas, nasceu então o túnel Dewey Square (BROWN-WEST, 2007).

A via foi gradativamente tornando-se cada vez mais congestionada, a população enfrentava longos congestionamentos e o trecho elevado começou a ser popularmente chamado de “*The Distressway*” e “*the largest parking lot in the world*”, em tradução livre “a via da aflição” e “o maior estacionamento do mundo”. Com o fracasso da Central Artery, em 1972 foi publicado o “*Boston Transportation Planning Review*”, que é o programa de planejamento metropolitano para a cidade de Boston, responsável por analisar e reprojeter todo o sistema de vias expressas da região. Uma série de estudos foi feita sobre a concepção urbana, qualidade do ar e sonora, impactos ambientais e os níveis de serviço do trânsito, bem como consultas públicas aos cidadãos no tangente ao desenvolvimento de alternativas para o transporte, concebendo então o projeto inicial do *Big Dig*(SALVUCCI, 2003).

O *Big Dig* foi como ficou conhecido popularmente a *Central Artery/Tunnel Project (CA/T)*, um projeto que estipulava que a Artéria Central seria substituída por um sistema de túneis, com a demolição do viaduto que a concebia. O projeto contemplava também a criação de um túnel que ligava a cidade ao seu aeroporto, que fica em uma ilha, a partir da ampliação da

rodovia Interestadual 90, trazendo assim grandes benefícios para a cidade e transformando o tráfego local. O novo projeto permitiu que a capacidade da via passasse de 80 mil veículos por dia para 250 mil veículos por dia e a redução dos congestionamentos de 16 h por dia para apenas 2 h por dia . (SALVUCCI, 2003).

O *Big Dig*, inclusive nos dias de hoje, é uma grande referência de como soluções subterrâneas são excelentes alternativas para reurbanizar e alterar a realidade de cidades que estão afogadas em congestionamento.

No espaço em superfície por onde passava originalmente a *Central Artery* foi criado o *Rose Fitzgerald Kennedy Greenway*, um parque linear que corta diversos bairros da zona central de Boston. Ele é composto por jardins, passeios, praças, fontes e monumentos, priorizando a circulação de pedestres e ciclistas e abrindo o espaço central da cidade para lazer e cultura, devolvendo o espaço da cidade às pessoas e priorizando as relações sociais, deixando o transporte no meio subterrâneo. Na Figura 2.3 observa-se o antes e depois de um trecho da Artéria Central, que foi transformada em um parque(TAJIMA, 2003).



Figura 2.3: Antes e depois da imploração da *Central Artery* e construção do *Big Dig* (MENINO, 2013)



## 2.2 São Gotardo

Em razão de sua localização central na Europa, a Suíça suporta um número crescente de veículos que cruzam o país a fim de escoamento de produção, bem como transporte de passageiros. Como consequência, as rodovias que cruzam o meio urbano estavam cada vez mais congestionadas, o que trazia transtornos dantescos à população. Os trens de cargas e de passageiros são uma alternativa às rodovias, porém o país é composto por uma região de relevo muito montanhoso, os famosos Alpes Suíços, o que impossibilita a utilização desse modal de transporte por superfície (ASSIS, 2016).

Os engenheiros suíços começaram a idealizar soluções subterrâneas em 1947, porém apenas em 1963 uma comissão começou a considerar tais opções. Em 1992 os eleitores suíços decidiram através de um referendo que estavam cansados da poluição e dos engarrafamentos e autorizaram a construção de uma malha ferroviária de alta velocidade através dos íngremes Alpes. Os trabalhos de engenharia começaram então em 1995, porém as perfurações só se iniciaram em 2002 (EHRBAR, 2008).

A Nova Transversal Ferroviária Alpina (NTFA) é o projeto suíço para a travessia ferroviária dos Alpes e sua principal obra é o Túnel da Base de São Gotardo. O trajeto do subterrâneo é uma linha reta através da base da montanha permitindo o transporte de cargas pesadas a velocidades muito maiores, e em um tempo muito inferior, visto que, por rodovia o trajeto é extremamente sinuoso. No novo projeto os trens de carga poderão atravessar a montanha a 160 km/h, mais do que o dobro da velocidade anterior, e os trens bala de passageiros poderão atingir uma velocidade de até 250 km/h (EHRBAR, 2008).

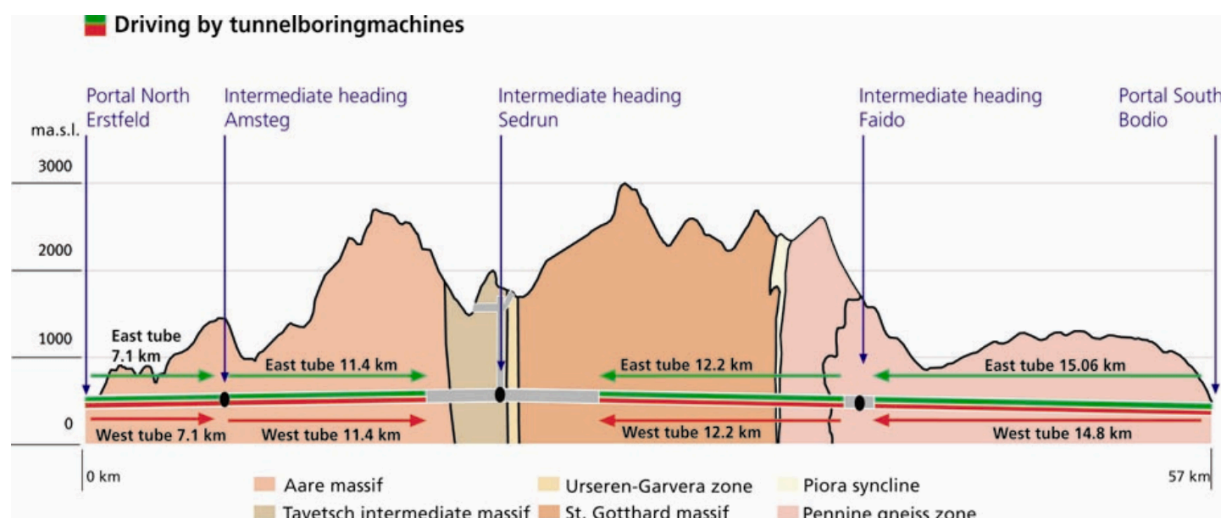


Figura 2.4: Perfil longitudinal do Túnel de Base de São Gotardo (EHRBAR, 2008)

O Túnel de São Gotardo foi inaugurado no dia 01 de julho de 2016, ligando Zurique a Milão, descongestionando e aumentando o tráfego entre o norte e o sul da Europa. Ele tem comprimento total de 57,1 km e atualmente é o mais longo já construído no mundo. Sua construção durou 17 anos. Ele possui duas galerias principais unidas por galerias transversais, pequenos túneis interconectados que funcionam como rotas de fuga de emergência (EHRBAR, 2008).

A Companhia Ferroviária Nacional da Suíça prevê um aumento do volume de transporte de carga de 20% até o ano de 2020 na rota entre Roterdã e Gênova. O número de passageiros também deve aumentar dos atuais 9.000 por dia a 15.000 até 2020. O trajeto entre Zurique e Lugano vai cair 41 minutos (EHRBAR, 2008).

O túnel é referência mundial nas questões de redução dos impactos ambientais e de custo dos transportes.

## **2.3 SMART Tunnel**

O *Stormwater Management And Road Tunnel* (SMART Tunnel) é uma estrutura com duplo aspecto, funciona como galeria de drenagem e também como túnel rodoviário. Ele se localiza na capital da Malásia, Kuala Lumpur, local onde ocorrem frequentes inundações, já que a região do sudeste asiático sofre com as Monções.

O projeto inicial do túnel SMART era solucionar problemas de enchentes relâmpagos, que são inundações repentinas de áreas geomórficas baixas, porém o alto investimento para construção de um túnel de 9,7 km para este fim era inviável. Então durante o processo de projeto, o conceito de duplo propósito nasceu e o túnel rodoviário foi integrado ao sistema, a fim de aliviar os constantes congestionamentos na região central da cidade (DARBY, 2007).

Como indica a Figura 2.5, o túnel é constituído de três patamares, no pavimento inferior ocorre a gestão de águas pluviais, e os dois níveis superiores funcionam como túnel rodoviário que desafogam o trânsito de umas das regiões mais congestionadas da cidade.

O seu funcionamento ocorre da seguinte forma, no primeiro modo, onde não há chuvas, não ocorre fluxo de água através do sistema. Quando o segundo modo está ativo, o fluxo de água escorre pelo patamar inferior do túnel, sendo eficaz para a maioria das chuvas que assolam a região. Quando o terceiro modo é acionado, o acesso de carros é completamente interrompido e então as comportas automatizadas são abertas, permitindo que todos os três patamares do

túnel SMART sejam utilizados para o escoamento de água. Ao fim do fluxo de água, se dá a limpeza do túnel e 48 horas depois parte rodoviária é reaberta (ASSIS, 2016).

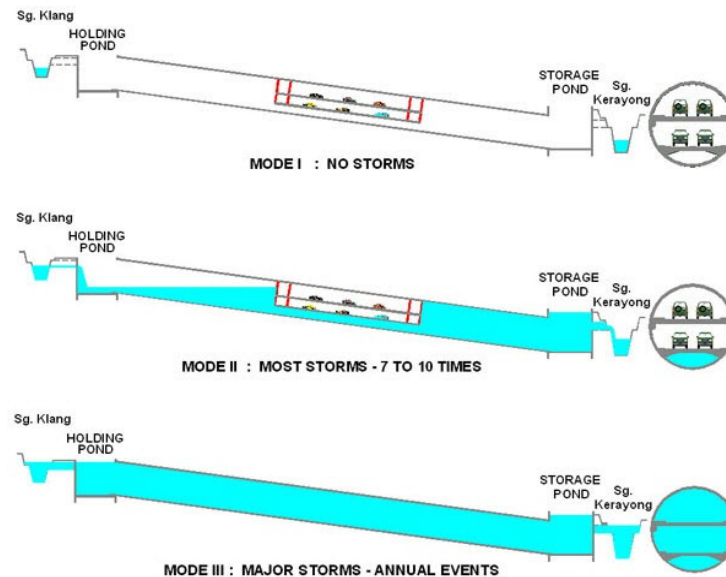


Figura 2.5: Modos de funcionamento do SMART Tunnel (DARBY, 2007)

## 2.4 Túnel Marcello Alencar

O Túnel Marcello Alencar, juntamente com o Túnel Rio 450 e o Túnel Nina Rabha, foi construído na cidade do Rio de Janeiro como parte do projeto Porto Maravilha, que é uma operação urbana que visa revitalizar a região portuária da cidade, uma área de especial interesse urbanístico, por sua localização privilegiada, mas que anteriormente estava abandonada e deteriorada.

A revitalização da área uniu esforços integrados. Foram uma sequência de obras com o objetivo de desenvolver a região economicamente, além de criar novas oportunidades de emprego, transporte, moradia, lazer e cultura para a população, priorizando o pedestre e o ciclista, mudando a paisagem da cidade e oferecendo também novos meios de transportes, como o VLT. Houve também a criação de dois museus na região, O Museu do Amanhã e o MAR - Museu de Arte do Rio, que além de atrair turistas por seus acervos artísticos, também são belas construções de grande imponência arquitetônica (DAVID, 2016).

Os túneis construídos têm como função principal substituir o elevador da Perimetral, uma via expressa elevada que cortava a região central da cidade e que era responsável por dar maior

fluidez ao trânsito, entretanto, o viaduto era fortemente criticado por ter mudado consideravelmente a estética do Cais do Porto e por desvalorizar a região, uma vez que a construção bloqueava a vista do mar, atraía moradores de rua e segregava o bairro, o que fez com que o comércio em torno da localidade decaísse, mesmo sendo esta região uma das portas de entrada da cidade pra quem chega por navio ou pela rodoviária Novo Rio (DAVID, 2016).

O túnel rodoviário Marcello Alencar, com 3.382 m é o maior em extensão em todo território nacional. É composto por duas galerias, com três faixas de rolamento de 3,5 m de largura por galeria e fluxo projetado de 110 mil veículos por dia. Seu ponto mais baixo está a 43 m abaixo do nível do mar. Ele possui quatro baias de refúgio e nove portas de emergência entre as galerias, com distância aproximada de 300 m entre cada uma, duas salas técnicas com sistema de geradores, automação e subestações interligadas ao centro de controle de operações da concessionária Porto Novo, responsável pela construção e operação da obra. O túnel conta também com 22 jatos-ventiladores e sensores de gases CO e CO<sub>2</sub>, detecção de calor e opacímetros, bem como 105 câmeras que farão o monitoramento 24 h por dia das condições de uso do pelo centro de controle(BRASIL, 2015).



Figura 2.6: Mapa da Zona Portuária após a construção do Túnel Marcello Alencar (BRASIL, 2015)

## 2.5 Nova Subida da Serra

A BR-040 é uma importante rodovia brasileira que liga Brasília à cidade do Rio de Janeiro. Ela passa por diversas cidades pequenas, que vivem em função da rodovia e o comércio gerado por ela. Entretanto, ela também corta cidades grandes como Belo Horizonte, Petrópolis e Duque de Caxias, o que muitas vezes gera engarrafamentos, dificultando o escoamento de produção, pois paralisa o tráfego de caminhões e trazendo diversos transtornos para a população local que utiliza da mesma como parte do seu trajeto diário de trabalho, por exemplo.

A Nova Subida da Serra é (NSS) é um projeto de infraestrutura viária no Estado do Rio de Janeiro que interliga a cidade de Duque de Caxias a Petrópolis, e que pertence a essa rodovia federal. Ele prevê a construção de uma pista de 20 km de extensão e um túnel de 4.640 m, que se tornará o maior túnel rodoviário brasileiro, o que reduzirá dantesicamente o impacto ambiental e trará segurança à autoestrada, visto que uma rodovia instalada em trechos de serra necessariamente apresentará longos trechos sinuosos e acidentados. Portanto, através de soluções subterrâneas é possível aumentar a segurança da via e diminuir o tempo de trajeto (NSS, 2016).

O túnel contará com uma estrutura completa de apoio e serviços através de um centro de controle operacional, tais como: sistema de supervisão e controle de tráfego, acionamento à distância de cancelas, semáforos e painel de mensagens eletrônicas, detecção e alarme de incêndio (NSS, 2016).



Figura 2.7: Trajeto da Nova Subida da Serra (NSS, 2016)

## 2.6 Túneis da Rodovia dos Imigrantes

A Rodovia dos Imigrantes (SP 160) é a principal via de acesso da cidade de São Paulo ao litoral Paulista e à Baixada Santista. Sua construção visou atender o grande fluxo de tráfego, uma vez que a rodovia Anchieta estava esgotada. Possui um trecho que atravessa a Serra do Mar, uma cadeia montanhosa do relevo brasileiro, que por seu grande valor geológico e sua fauna e flora, foi tombada como Patrimônio Histórico do Estado de São Paulo em 1985(DER/SP, 2016).

A pista Ascendente, ou Pista Norte, da rodovia foi inaugurada em 1976, porém como a construção da Pista Descendente não se concretizou por anos devido a questões políticas e financeiras, a Pista Norte era revertida em condições de tráfego mais intenso. Seu projeto foi considerado revolucionário, uma vez que, foi constituída uma sequência de túneis e viadutos atravessado revelo acidentado da Serra, como indica Figura 2.8. Foram 11 túneis construídos, aplicandonovas técnicas e processos construtivos que trouxeram maios produtividade, rentabilidade e flexibilidade para a construção, criando um marco histórico no Brasil, pois pela primeira vez foi utilizado o método NATM (CBT, 2006).



Figura 2.8: Trecho da Rodovia dos Imigrantes (CBT, 2006)

Em 1998, por meio do programa de concessões, a empresa privada Ecovias, recebeu a concessão por um período de 20 anos de administração da autoestrada. Uma das obrigações contratuais foi a construção da pista descendente da rodovia, que foi entregue em dezembro de 2002, e conta com três túneis longos. As soluções subterrâneas empregadas foram fundamentais para reduzir o impacto ambiental na região, já que a Serra do Mar possui importantes resquícios da Mata Atlântica no estado de São Paulo (GALLARDO & SÁNCHEZ, 2006).

### 3. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS

A escavação de túneis nos primórdios da civilização, antes do advento de explosivos e das máquinas escavadoras era feita de modo manual, onde os operários se utilizavam de ferramentas e com força humana construíam o túnel. Outra técnica ancestral foi a escavação a partir da queda repentina de temperatura, por volta de 2000 aC, os egípcios utilizavam essa técnica na mineração de cobre e ouro, que funcionava da seguinte forma, a parede do túnel era aquecida através de fogo, e então o seu resfriamento se dava por meio de água (MOREIRA, 2006).

No século XIX foram desenvolvidos vários métodos para a abertura de túneis a partir da geologia local, os Métodos Clássicos que mais se destacaram foram os Alemão, Belga, Austríaco Clássico e Inglês. Eles indicam sequências de ações para a perfuração que se adequam melhor a formação geológica de cada país (ASSIS, 2016).

Na década de 30, um pesquisador chamado Rebecwicz criou um novo método de escavação, chamado NATM – *New Austrian Tunneling Method*, que pode ser visto como uma filosofia de construção pois ele não fixa uma sequência de ações definida. O NATM se baseia em três princípios básicos: o maciço é visto como principal elemento da estrutura, a complementação da estrutura de sustentação deve ser executada através da instalação de um sistema de suporte otimizado quando necessário, deve-se promover a instrumentação do túnel (ASSIS, 2016).

Com a descoberta dos explosivos a escavação de túneis foi aperfeiçoada e sua execução passou a acontecer em uma velocidade muito superior à velocidade praticada anteriormente. Foram utilizados pólvora, nitroglicerina e posteriormente outro explosivo muito mais seguro, a dinamite (MOREIRA, 2006).

Com o avanço da tecnologia foram desenvolvidas as máquinas de escavação, que permitem de forma otimizada escavar túneis, apresentando uma série de vantagens sobre o método convencional de escavação por explosivos.

Segundo Travagin (2012) não há consenso em como classificar os processos construtivos de túneis. Aqui, será adotada uma classificação baseada no grau de mecanização do processo construtivo, dando origem a três categorias: Método de Escavação Convencional, Método de Escavação Mecanizado e Método de Escavação Combinado.

Para escolha do método a ser adotado deve-se levar em conta fatores de ordem técnica e econômica, a fim de tornar a obra economicamente viável, sendo a geologia local e as características do túnel a ser construído, os fatores mais relevantes para essa escolha.

### **3.1 Método de Escavação Convencional**

No método convencional de escavação, também conhecido como escavação a fogo, o túnel é perfurado por de explosivos, o mais comum entre eles é a dinamite.

A perfuração do túnel seguindo tal método ocorre em ciclos de explosão, o avanço horizontal é de até 6 m a cada sequência. Como indica a Figura 3.1, a primeira etapa se inicia com a marcação topográfica dos furos de explosivo, seguida da perfuração dos pequenos furos onde serão inseridos os explosivos através de um equipamento que se chama Jumbo, uma perfuratriz automatizada que está ligada a um sistema que indica com grande precisão os pontos de perfuração. Em seguida, esses pequenos furos são preenchidos com o material explosivo, que podem ser em cartucho ou a granel, sendo este material explosivo fluido e aquele bananas de dinamite. Logo após é procedida a detonação, que dura em torno de 3 s, e então a ventilação, que pode durar cerca de 30 min, onde os gases tóxicos são retirados. Posteriormente um equipamento faz o acabamento inicial, retirando possíveis blocos que estão parcialmente presos à parede do túnel. Em seguida há a limpeza grossa, com o auxílio de carregadeiras ocorre a retirada dos maiores blocos de rocha explodida no chão. Então, se dá a limpeza fina, junto com o bate choco, que são batidas mecânicas na parede da rocha a fim de encontrar alguma parte que possa estar levemente presa. Posteriormente ocorre o mapeamento geológico e geomecânico, que consiste na entrada do geólogo para analisar se a geologia encontrada é a mesma do que a esperada, assim é possível constatar se no próximo ciclo será necessária a quantidade prevista de explosivos ou não. Em seguida são aplicados chumbadores, que funcionam como tirantes nas rochas, aumentando assim a estabilidade e resistência da mesma, e por fim o concreto é projetado nas paredes do túnel. Então um ciclo é concluído, e dá-se início a outro ciclo (ASSIS, 2016).



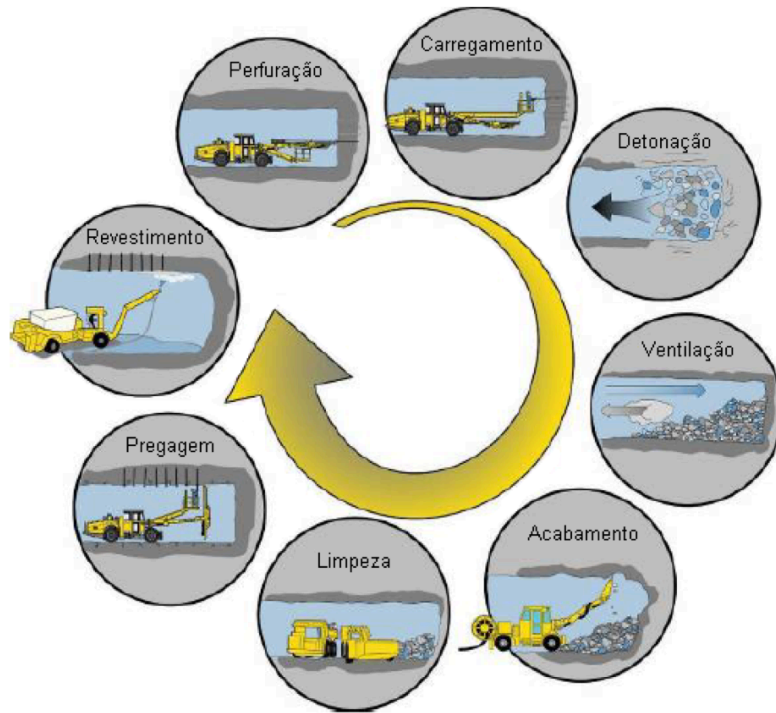


Figura 3.1: Sequência de Perfuração no Método Convencional (TRAVAGIN, 2012)

A detonação dos explosivos começa de dentro para fora, com diferença de aproximadamente 20 milissegundos entre as camadas. A camada mais interna é chamada de Pilão ou Núcleo (ver Figura 3.2), onde é concentrada a maior parte dos explosivos (ASSIS, 2016).

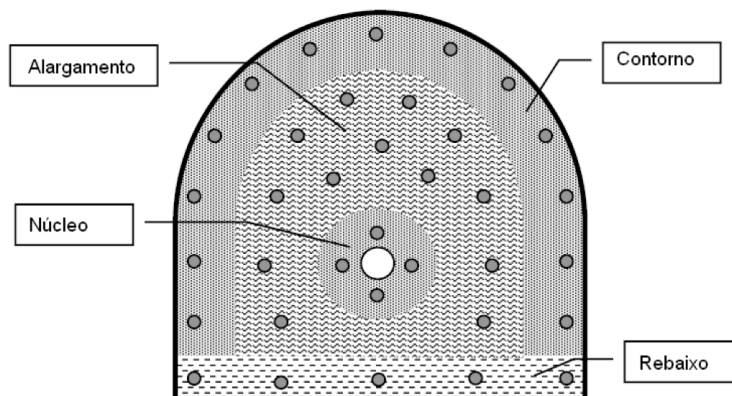


Figura 3.2: Setores de uma seção transversal a ser escavada (TRAVAGIN, 2012)

As grandes vantagens apresentadas por esse método estão relacionadas à flexibilidade que ele apresenta frente aos outros métodos. A primeira versatilidade apresentada é no que se refere à geometria. O tamanho da abertura, geometria dos alinhamentos e direção da perfuração são

facilmente alterados, uma vez que a quantidade de explosivos adequada é inserida a cada perfuração, no caso de uma seção transversal que mude de 10 m para 3 m de diâmetro, por exemplo, basta adequar a seção (ASSIS, 2016).

Outra flexibilidade apresentada por este método é a geológica. Caso as características mecânicas do maciço se alterem é possível adequar a quantidade de explosivos, a fim de obter a explosão ideal para cada tipo de rocha (ASSIS, 2016).

Como será visto mais a frente, essas flexibilidades não são atingidas através do método mecanizado.

### 3.2 Método de Escavação Mecanizado

Nesse método construtivo, utiliza-se de máquinas de escavação para perfurar o túnel a ser construído, as tuneladoras, também conhecidas por TBM, sigla para *Tunneling Boring Machine*, ou, como são popularmente chamadas no Brasil: “Tatuzão” (TRAVAGIN, 2012).



Figura 3.3: Tuneladora em operação no porto de Dublin (SAUER et MERGELSBERG, 2004)

Para Túneis em Rocha existem dois tipos usuais de tuneladoras, a *Gripper* e a *Shield*, sendo a primeira com laterais abertas e a segunda fechada. A tuneladoras do tipo *Shield* (ver Figura 3.4) tem funcionamento baseado no corte do maciço em seção plena, condução do material através de transportadores, propulsão por sistema hidráulico e instalação dos segmentos e anéis de suporte. As tuneladoras do tipo *Gripper* (ver Figura 3.5) não possuem escudo do tipo cilíndrico e seu sistema de propulsão basea-se na ancoragem provisória de elementos laterais (os *Grippers*) que agarram as paredes da cavidade já escavada.

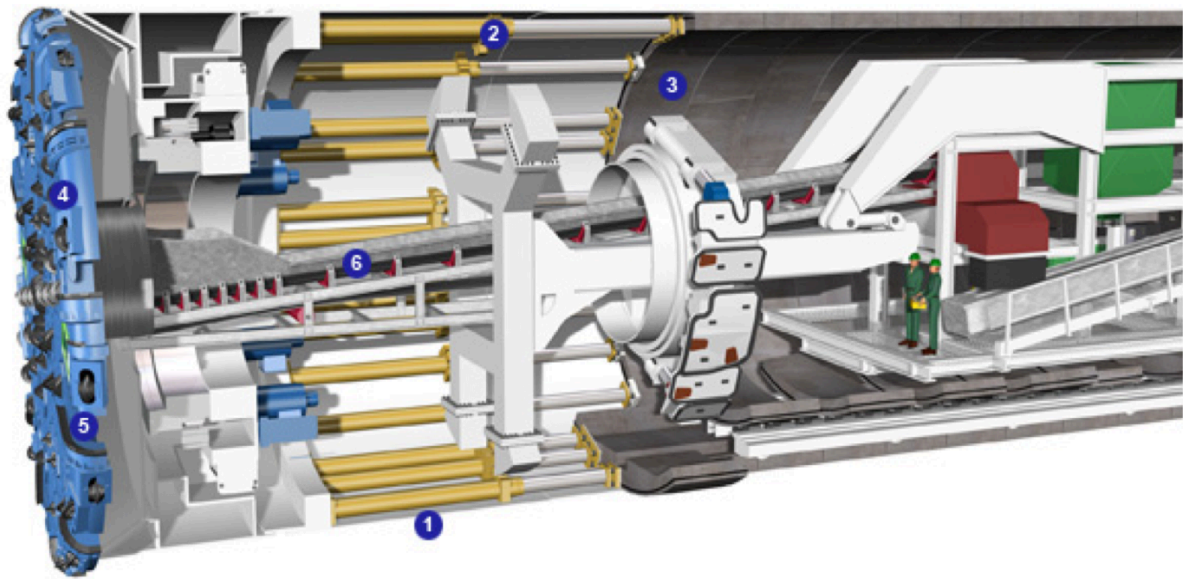


Figura 3.4: *Single Shield TMB* - (1) couraça (2) cilindros hidráulicos de propulsão (3) segmento pré-moldado instalado (4) corte (5) cavidade para entrada de material escavado (6) transportador (HERRENKNECHT, 2011)

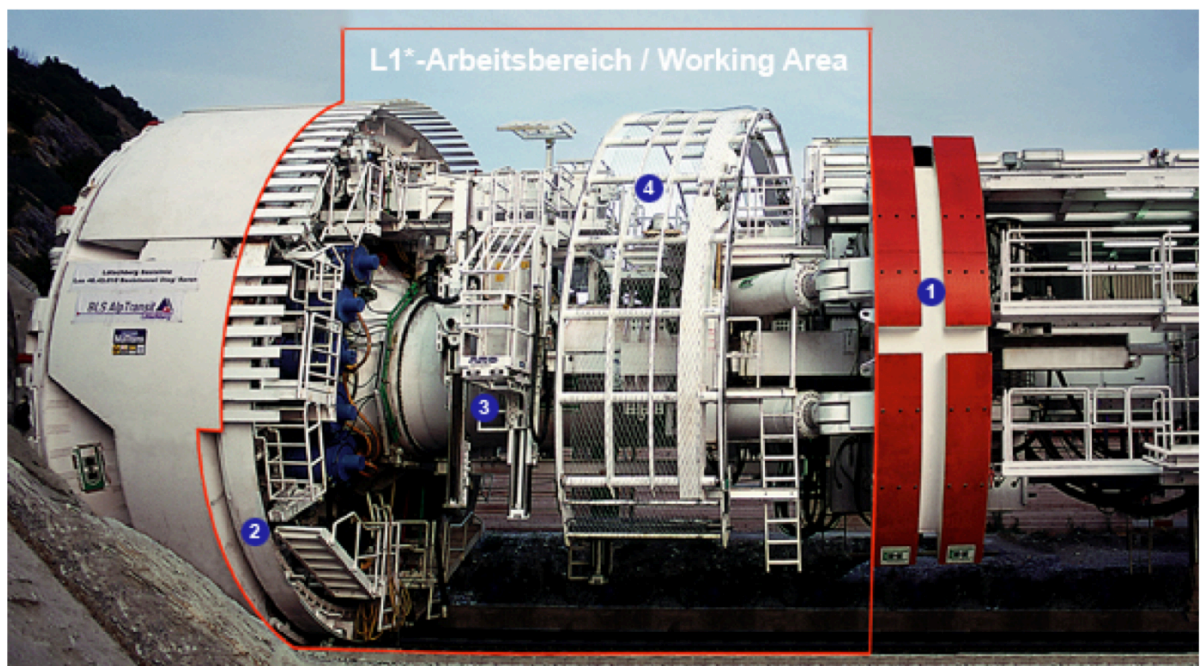


Figura 3.5: *Gripper TBM* – (1) gripper (2) instalador de cambotas (3) perfuradores para ancoragem (4) instalador de malha de arame (HERRENKNECHT, 2011)

De modo geral a construção de túneis por tuneladoras se dá pela da escavação da face em seção de geometria circular, seguida pela execução do revestimento do Túnel. Esse revestimento pode ser feito com segmentos pré-moldados de concreto justapostos, podendo ainda ser executado em concreto projetado quando a TBM for do tipo *Gripper*.

Para longos túneis, este método apresenta uma grande vantagem econômica frente ao método convencional, visto que, se for utilizada a mesma tuneladora para todo o túnel, haverá um grande custo inicial para compra da mesma, porém, em geral, não haverão grandes sobrecustos a medida que a perfuração for avançando, já no método tradicional, há um gasto significativo de explosivos na medida em que a obra avança, o que deixa a obra cada vez mais cara. Entretanto, como a tuneladora é construída para um tipo de rocha ou solo específico, em casos de longos túneis, onde a formação geológica do local escavado pode mudar, sendo necessária mais de uma tuneladora, o que eleva o custo da obra consideravelmente (ASSIS, 2016).

Para túneis curtos, em geral a tuneladora não é uma boa opção, uma vez que é quase impossível reaproveitar a máquina, já que ela é construída para um tipo de rocha específica, e por seu tamanho, o custo de transporte para transportar ela para outra obra é muito elevado (ASSIS, 2016).

Para Da Silva (2007), também corroborado por Assis (2016), ocorrem essas outras vantagens:

Outra vantagem evidente é a precisão da perfuração, o que implica diretamente na segurança da escavação, pois a abertura de paredes arredondadas favorece a capacidade de sustentação da rocha, portanto o perigo da queda de blocos é menos, e usualmente o suporte é pequeno ou desnecessário.

Não há a presença de *Overbreaks*, que são partes de rochas removidas além do necessário no considerando o gabarito máximo da escavação no uso de explosivos, portanto, em túneis que exijam revestimento, a economia de concreto será grande.

Há economia também no que tange à quantidade de trabalhadores, pois no método mecanizado não há a necessidade de tantopessoal quanto no método convencional.

Em geral, o avanço por tuneladoras também é mais rápido do que a escavação a fogo, porém isso não é uma regra bem definida, pois são vários fatores que podem causar sucessivas paralizações na escavação.

### **3.3 Método de Escavação Combinado**

No método combinado a Tuneladora substitui a escavação do pilão ou núcleo da seção transversal (ver Figura 3.2), onde se concentraria a maior quantidade de explosivos, o que

representa significativa economia, e então, por meio de explosivos o restante da seção transversal é escavado, seguindo os passos do método convencional.

Esse Método apresenta grandes vantagens, frente aos outros dois apresentados, visto que se tem a mecanização trazida pelas tuneladoras, juntamente com a flexibilidade da escavação a fogo, uma vez que, como somente o núcleo da seção é escavado com a TBM, pode-se variar facilmente o tamanho das seções transversais, sem que para isso seja necessária a compra de outra tuneladora, aumentando drasticamente o custo da obra (ASSIS, 2016).

É indicado para longos túneis, porém que tenham seções variáveis e que exijam um grau de flexibilidade maior quanto a geometria da seção.

## 4. METODOLOGIA

Este estudo se baseia em dois pilares: o primeiro é o cálculo do túnel Marcello Alencar a partir de análises numéricas, e o segundo é a avaliação dos deslocamentos induzidos pela perfuração do túnel com explosivos nas edificações vizinhas em superfície.

O dimensionamento da espessura do suporte do túnel e o estudo dos recalques induzidos se darão através do software PLAXIS, um programa que utiliza o método dos elementos finitos como base. O MEF é um procedimento numérico que busca soluções aproximadas para questões que envolvem equações diferenciais, dividindo o domínio do problema em pequenas parcelas, chamadas de elementos finitos.

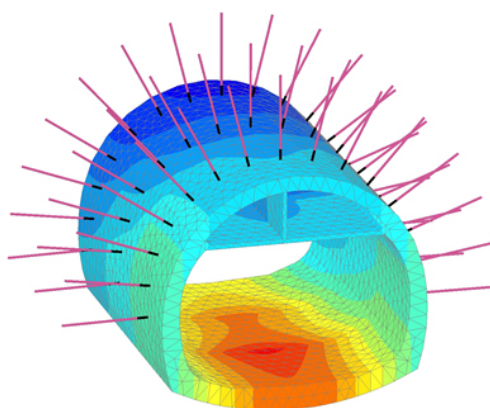


Figura 4.1: Exemplo de cálculo do Projeto de um túnel através do programa Plaxis (PLAXIS, 2016a)

A região portuária da cidade do Rio de Janeiro, onde o túnel Marcello Alencar foi construído, é um sítio histórico com diversos bens tombados pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN. Essa área possui construções que datam do século XIX, tais como o Paço Imperial, Igreja de Nossa Senhora da Candelária, Museu Histórico Cultural da Marinha, Mosteiro de São Bento, Igreja Nossa Senhora de Montserrante, Terminal Rodoviário Mariano Procópio, dentre outras edificações. Portanto, são edifícios antigos, de exímio valor para a sociedade brasileira e que devem ser preservados e protegidos a fim de garantir a integridade do patrimônio histórico nacional (IPHAN, 2016).

Como pode-se ver na Figura 4.2 o Antigo Elevado da Perimetral passava ao lado do edifício do Antigo Terminal Rodoviário Mariano Procópio, que hoje faz parte do Museu de Arte do Rio. O Túnel Marcello Alencar possui esse mesmo trajeto, porém subterraneamente.



Figura 4.2: Antigo Elevado da Perimetral passando pelo antigo Terminal Rodoviário Mariano Procópio (LETICHEVSKY, 2012)

A cidade do Rio de Janeiro passou por intervenções urbanísticas no início do século XX com o desmonte de alguns morros e construção de aterros, para que a cidade ganhasse mais áreas e espaços. Na Zona Portuária foi utilizada a técnica de Aterramento Hidráulico, onde o solo é extraído do leito do mar através de dragagem e depositado na encosta a ser aterrada, formando uma camada de areia sobre o terreno original. Assim a conformaçãogeotécnica resultante foi uma camada de solo, onde estão grande parte das fundações das edificações locais. Abaixo dessa camada estão camadas de areia, solo residual, rocha alterada e rocha sã. O túnel em questãoatravessa em sua maior extensão as camadas de rochas, porém, para que ele alcance tal profundidade, trechos em solo foram perfurados.

A Figura 4.3apresenta o perfil geológico da região e o traçado planialtimétrico do túnel Marcello Alencar. Nele podemos perceber as composições de cada camada de solo e rocha, são elas:

AT – Aterro, constituído por material heterogêneo: solo, entulho, resto de vegetação, entre outros;

QA – Sedimentos Quaternários: areia fina a média, medianamente compacta a pouco compacta; com bolsões argilosos contendo matéria orgânica (eventuais) e conchas; cor marrom a cinza escura;

SR – Solo residual silto-argiloso a silto-arenoso, micáceo, cor cinza a variegado medianamente compacto a compacto;

SA – Rocha alterada a sã, mediana / fraturada, cinza, natureza gnáissica – gnaisse facoidal;

RS – Rocha sã, pouco a mediana / fraturada, cinza, natureza gnáissica – gnaisse facoidal.



Esta página será impressa a parte

**Figura 4.3: Perfil Geológico e traçado altimétrico do Túnel Marcello Alencar**

Foram escolhidas duas seções de interesse do túnel, a Seção 1 está localizada no trecho em rocha sã, já a Seção 2 é mista, a escavação será feita em areia e solo residual silto-arenoso, conforme indica a Figura 4.3.

O impacto da construção do túnel sobre as edificações construídas em superfície e os possíveis recalques gerados pela detonação dos explosivos a fim de perfurar o túnel, tendo em vista a especificidade, importância histórica dos prédios da região e a importância de se preservar o patrimônio histórico, será analisado também nas Seções 1 e 2.

A Figura 4.4 representa uma análise da influência da perfuração de um túnel numa camada de rocha abaixo de uma camada de solo, onde está fundada uma edificação de múltiplos pavimentos, através do software PLAXIS 3D.

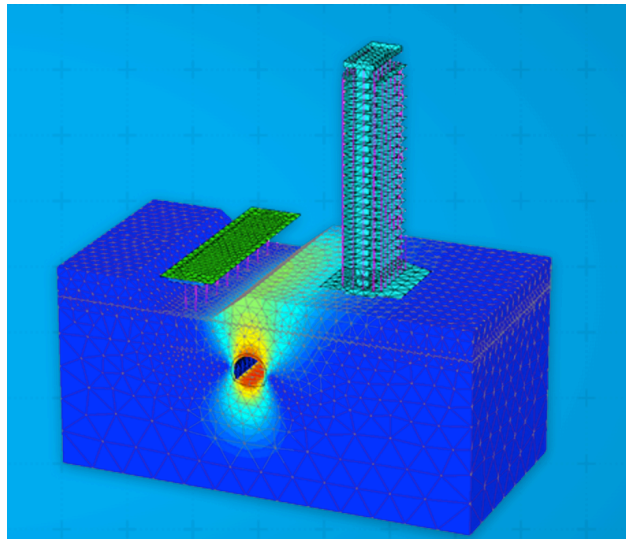


Figura 4.4: Impacto da perfuração de um túnel na fundação de um edifício (PLAXIS, 2016b)

## 5. SOFTWARE PLAXIS 2D

A modelagem computacional tem sido amplamente utilizada na solução de problemas complexos, onde é possível simular o comportamento de diferentes materiais e fenômenos, através de programas que resolvem simultaneamente uma série de equações matemáticas que definem o modelo.

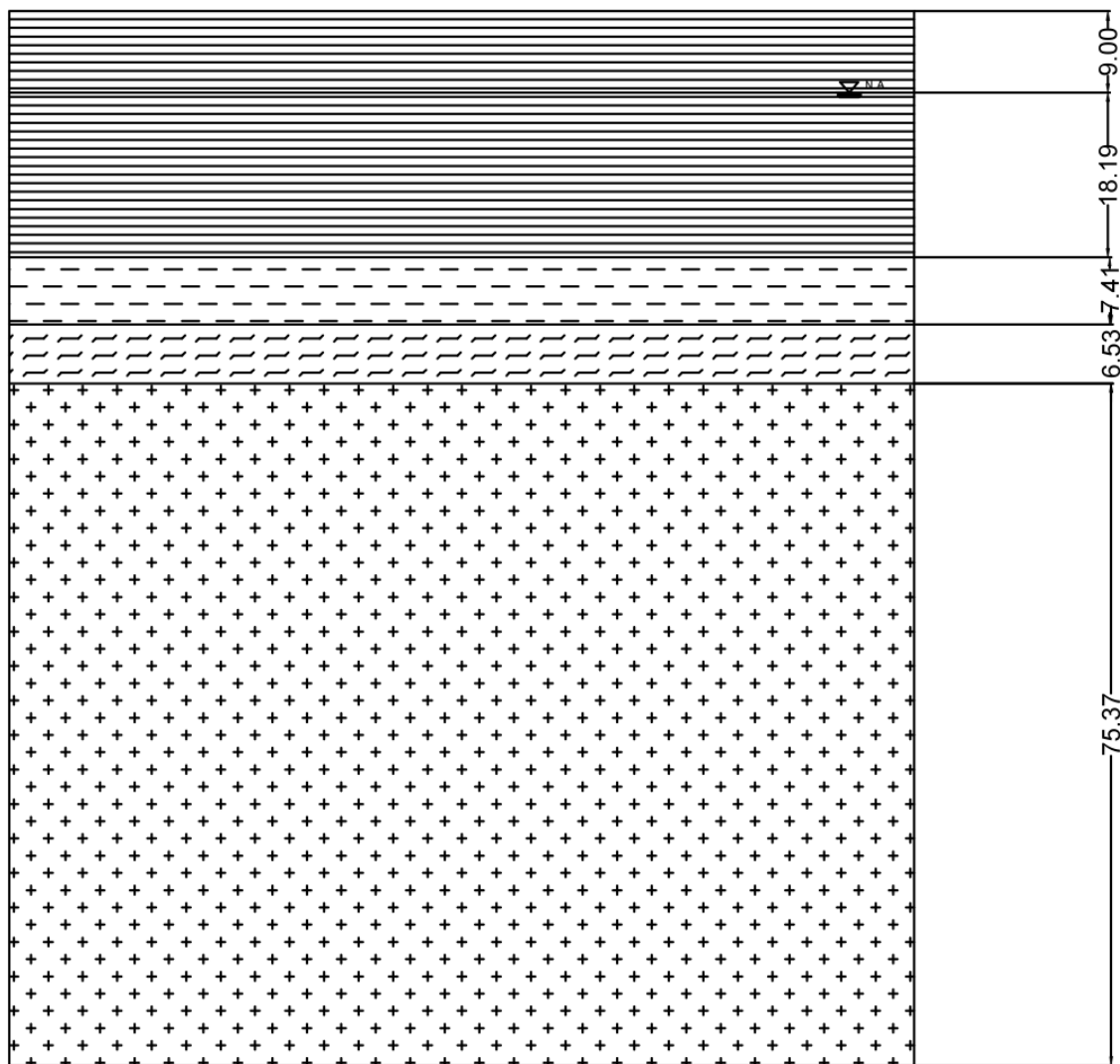
O Software utilizado para a análise em questão foi o PLAXIS 2D Versão 8.2. Ele utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), uma poderosa ferramenta numérica que pode empregar diversas soluções de contorno, etapas construtivas e outros vários recursos que envolvem os problemas de engenharia. O MEF transforma a equação diferencial que governa o problema em equações integrais equivalentes que cotêm as incógnitas a serem determinadas. Essas equações são aproximadas por uma malha, onde aparecem as incógnitas, que então são calculadas através das respostas dos nós vizinhos.

Segundo Foá (2005), uma análise feita pelo MEF, em que as incógnitas principais são os deslocamentos, envolve as seguintes etapas:

1. Discretização do meio contínuo – É o processo no qual o meio contínuo é subdividido mediante linhas e superfícies imaginárias em um número finito de elementos. No caso bidimensional esses elementos são triângulos ou quadriláteros, conectados por um número discreto de pontos, em seu contorno, que são denominados nós.
2. Seleção do modelo de deslocamentos – Determinação do conjunto de funções que definem o campo de deslocamentos dentro de cada elemento em função dos deslocamentos nodais.
3. Cálculo da matriz de rigidez – A matriz de rigidez é composta pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivados a partir da geometria, propriedades ou leis constitutivas obtidas em cada elemento, e pode ser obtida a partir do princípio dos trabalhos virtuais.
4. Cálculo das incógnitas do problema - Os deslocamentos são calculados a partir da relação de equilíbrio descrita acima. Estas deformações, juntamente com as deformações iniciais e as leis constitutivas de cada material definirão o estado de tensões no elemento e no seu contorno.

## 5.1 Características Geométricas das Camadas de Solo e Rocha

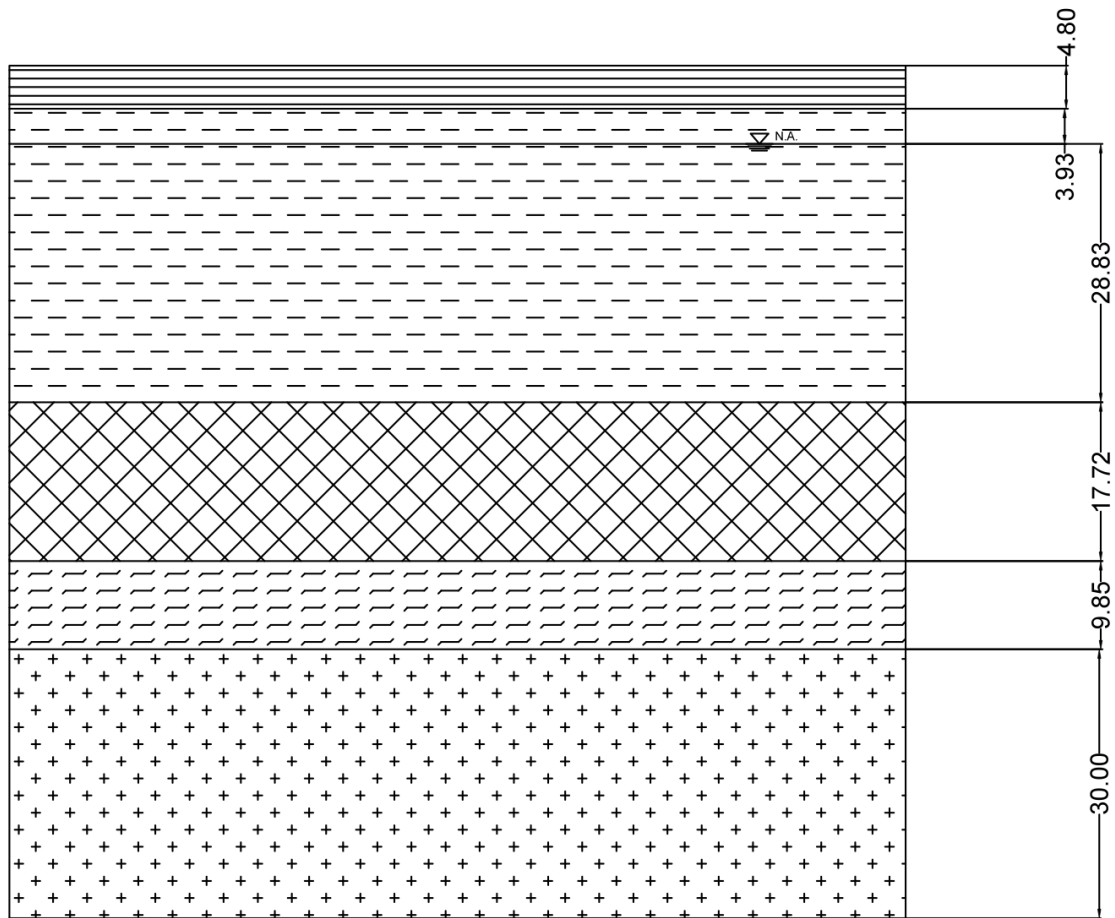
As camadas de solo e rocha foram extraídas do perfil geológico (ver Figura 4.3) nas duas seções a serem analisadas, as Figura 5.1 e Figura 5.2 representam a altura de camada de solo inserida no programa, bem como a posição do lençol freático.



### LEGENDA

AT QA SR RA RS

Figura 5.1: Perfil geológico da Seção 1



### LEGENDA

 AT  
  QA  
  SR  
  RA  
  RS

Figura 5.2: Perfil geológico da Seção 2

## 5.2 Propriedades das Camadas de Solo e Rocha

Foi escolhido o modelo de Mohr-Coulomb para representar os materiais. Nesse critério supõe-se que o colapso se dá quando a tensão cisalhante no plano de resistência alcança o valor da tensão cisalhante de resistência do material. Para tal, é necessária a entrada dos valores de peso específico ( $\gamma$ ), peso específico saturado ( $\gamma_{\text{sat}}$ ), coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), módulo de Young ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), coesão ( $c$ ), ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coeficiente de

empuxo no repouso ( $k_0$ ) de cada material que compõe as camadas do perfil geológico em cada seção analisada. Na tabela abaixo são mostrados os valores citados:

Tabela 5.1: Parâmetros de entrada no PLAXIS 2D

Camada	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	k (m/s)	E (Mpa)	v	c (kPa)	$\phi$ (°)
AT	19	20	10	20	0,25	15	30
QA	17	18	10	15	0,25	5	33
SR	17		10	10	0,30	25	28
RA	20		10	30	0,25	50	33
RS	25		10	500	0,20	500	38

O coeficiente de atrito no repouso foi calculado a partir da Fórmula de Jacky e é indicado na Tabela 5.2 para cada camada de solo e rocha:

$$k_0 = 1 - \sin \phi$$

Tabela 5.2: Valores de  $K_0$  para cada camada

Camada	$K_0$
AT	0,500
QA	0,455
SR	0,531
RA	0,455
RS	0,384

### 5.3 Características Geométricas do Túnel

Embora o túnel Marcello Alencar possua diferentes tipos de seções ao longo de seu comprimento, como indicadas na Figura 5.3 e Figura 5.4, para este estudo foi escolhido uma seção típica circular, de forma a simplificar as análises.



Figura 5.3: Emboque do túnel Marcello Alencar em seção retangular (PORTO MARAVILHA, 2017)



Figura 5.4: Seção arco-retângulo do túnel Marcello Alencar (O DIA, 2016)

Cada seção do túnel é composta de três faixas de trânsito, duas barreiras New Jersey e afastamento lateral. Cada faixa de rolagem possui 3,6 m, como indica a norma do DNIT, que adicionadas aos afastamento lateral geram 12 m de comprimento, diâmetro da seção típica adotada.

O túnel Marcello Alencar é composto de duas galerias principais, e foi considerado nesse estudo a distância de 12 m entre a borda dos dois túneis, conforme indicado na Figura 5.5.

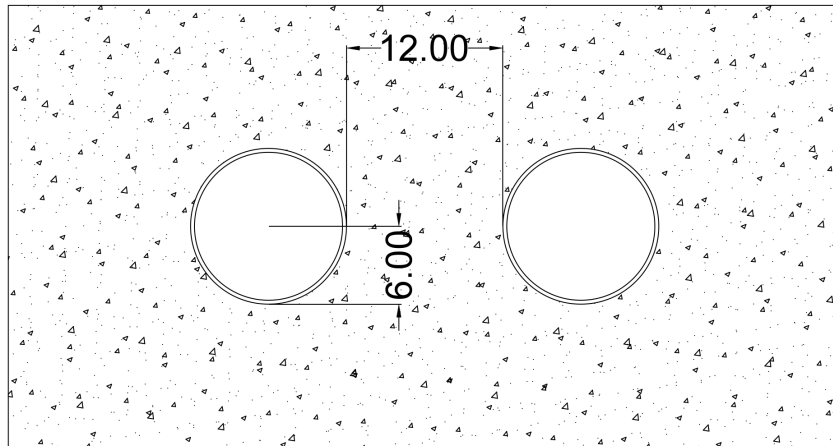


Figura 5.5: Seção típica adotada para o túnel Marcello Alencar

## 5.4 Propriedades do Suporte do Túnel

O suporte do túnel foi feito em concreto projetado com fck de 20 MPa com 30 cm de espessura. Esse sistema é muito utilizado em concretagem de túneis escavados pelo método construtivo convencional, NATM. O sistema consiste na aplicação de uma malha de aço na borda do túnel escavado e então a projeção de concreto sob pressão nesta malha. O impacto do material provoca a compactação, sem a necessidade dos vibradores para adensamento.

A armação escolhida foi de aço CA 50, e o valor adotado para o Coeficiente de Poisson foi de 0,20, valores usuais para concreto projetado.

O software PLAXIS demanda os valores de resistência característica a compressão, rigidez à flexão, rigidez axial, peso e coeficiente de Poisson para um elemento infinitesimal do suporte do túnel, como visto na Figura 5.6.



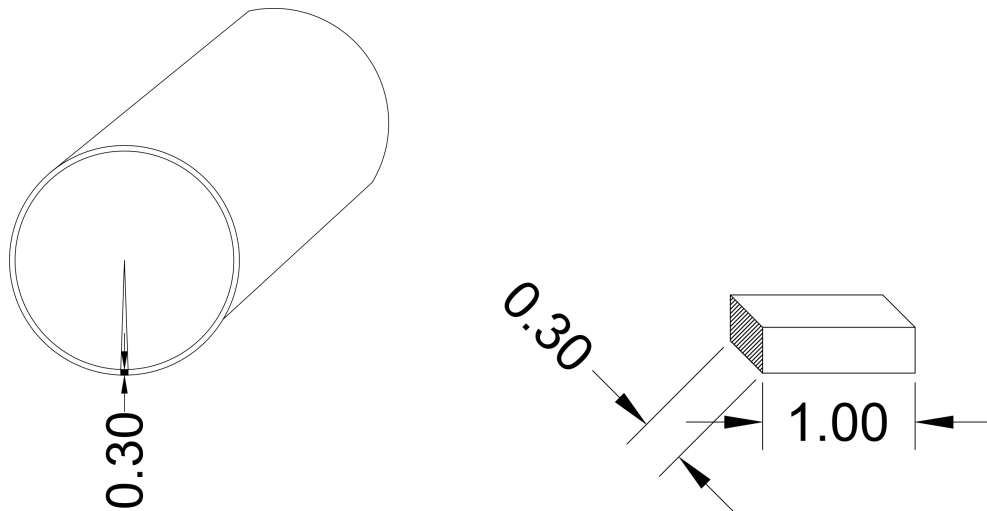


Figura 5.6: Seção transversal e elemento infinitesimal do túnel

Abaixo seguem os cálculos feitos e inseridos no programa:

Módulo de Elasticidade

$$E = 0,85 * 5600 * f_{ck}^{1/2} = 0,85 * 5600 * 20^{1/2} = 21,287 \text{ GPa}$$

Momento de Inércia

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{b * 0,30^3}{12} = 0,00225 \text{ m}^4/\text{m}$$

Rigidez à flexão

$$EI = 21,287 * 0,00225 = 47.895,75 \text{ KNm}^2/\text{m}$$

Área da Seção

$$A = b * h = 0,3 \text{ m}^2/\text{m}$$

Rigidez Axial

$$EA = 21,287 * 0,3 = 6.386.100,00 \text{ KN}/\text{m}$$

Peso da Seção

$$w = \gamma_{concreto} * A = 25 * 0,3 = 7,5 \text{ KN/m/m}$$

## 5.5 Características da Malha

A malha de elementos finitos é gerada automaticamente pelo PLAXIS, porém na malha inicial os elementos são excessivamente espaçados, levando a generalizações e resultados não muito precisos. Entretanto, essa malha mais espaçada, gera menos tempo de espera nas iterações que o programa deve fazer para resolver os problemas propostos. Então, inicialmente se usou a malha espaçada, e foi sendo refinada até que o resultados convergissem para o mesmo valor. A Figura 5.7 indica a malha gerada automaticamente pelo software, já a Figura 5.8 a malha no estado final refinada, cabe-se ressaltar que ao redor do túnel usou-se um refino de malha ainda maior para que os dados obtidos sejam mais precisos ao longo da seção transversal, pois se trata de uma área de interesse.

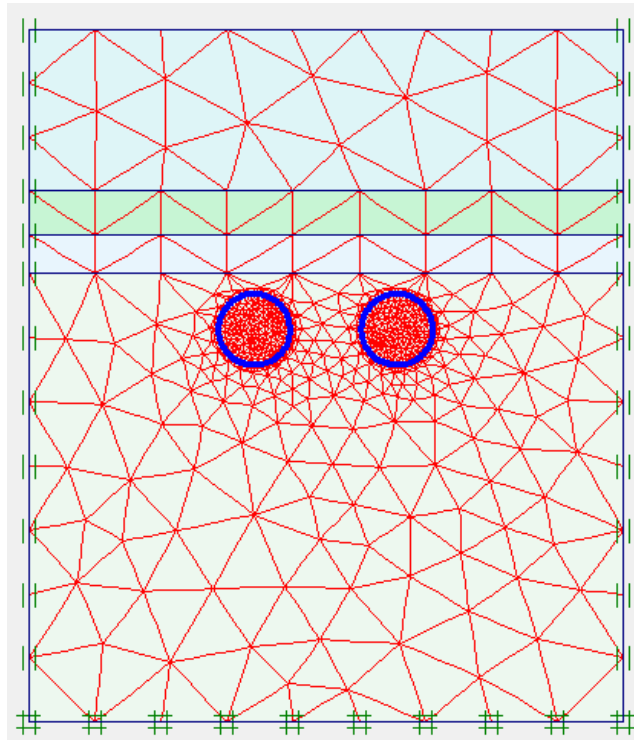


Figura 5.7: Malha não refinada na Seção 2 do túnel

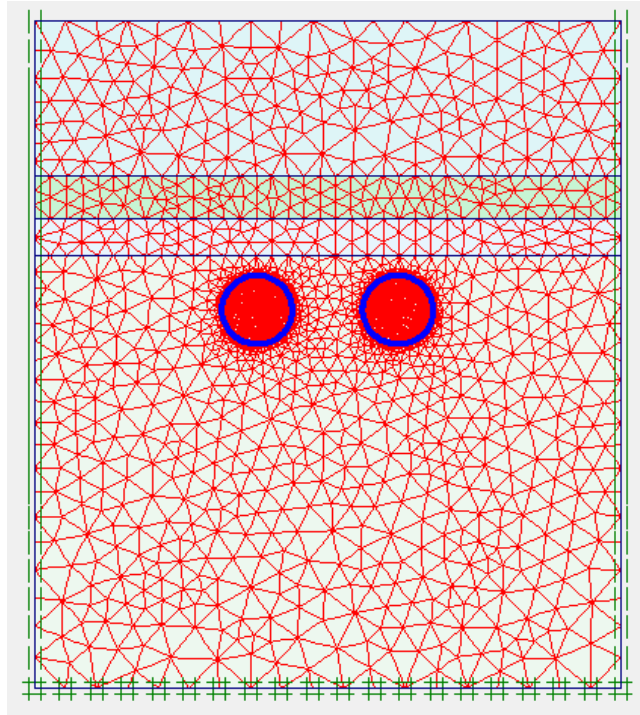


Figura 5.8: Malha refinada na Seção 2 do túnel

Parte dos deslocamentos causados pela escavação do túnel ocorre antes da aplicação do suporte, essa proporção é chamada de coeficiente de relaxação. Segundo Assis (2016), esse coeficiente varia entre 20% e 67% , a depender do método de escavação adotado. Neste trabalho, foi utilizado o valor de 67%, uma vez que a escavação proposta é pelo método convencional (NATM).

## 6. RESULTADOS E ANÁLISE

### 6.1 Tensões no Solo

As figuras abaixo apresentam as tensões efetivas verticais e horizontais em cada seção analisado do túnel.

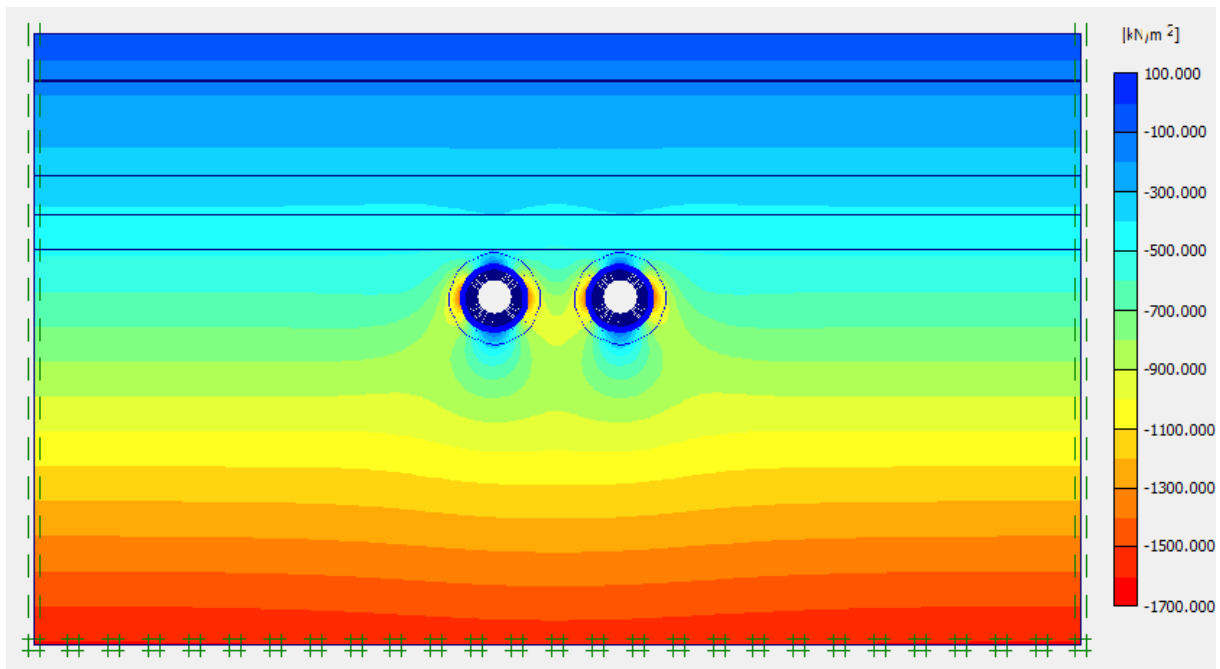


Figura 6.1: Tensões efetivas verticais na seção 1

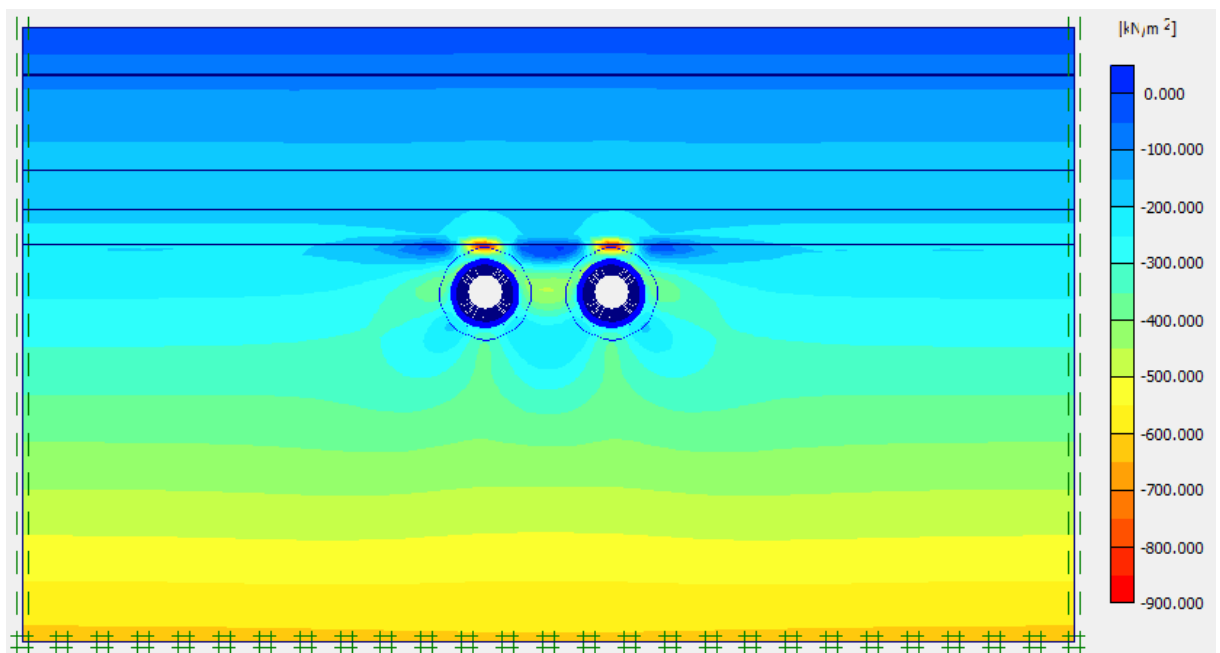


Figura 6.2: Tensões efetivas horizontais na seção 1

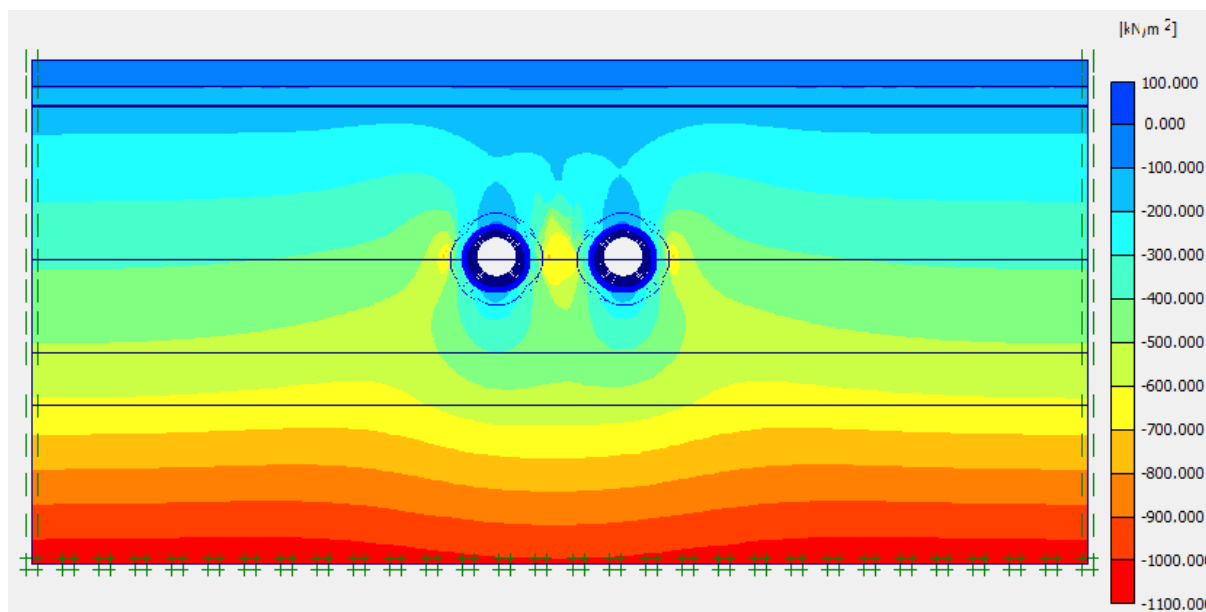


Figura 6.3: Tensões efetivas verticais na seção 2

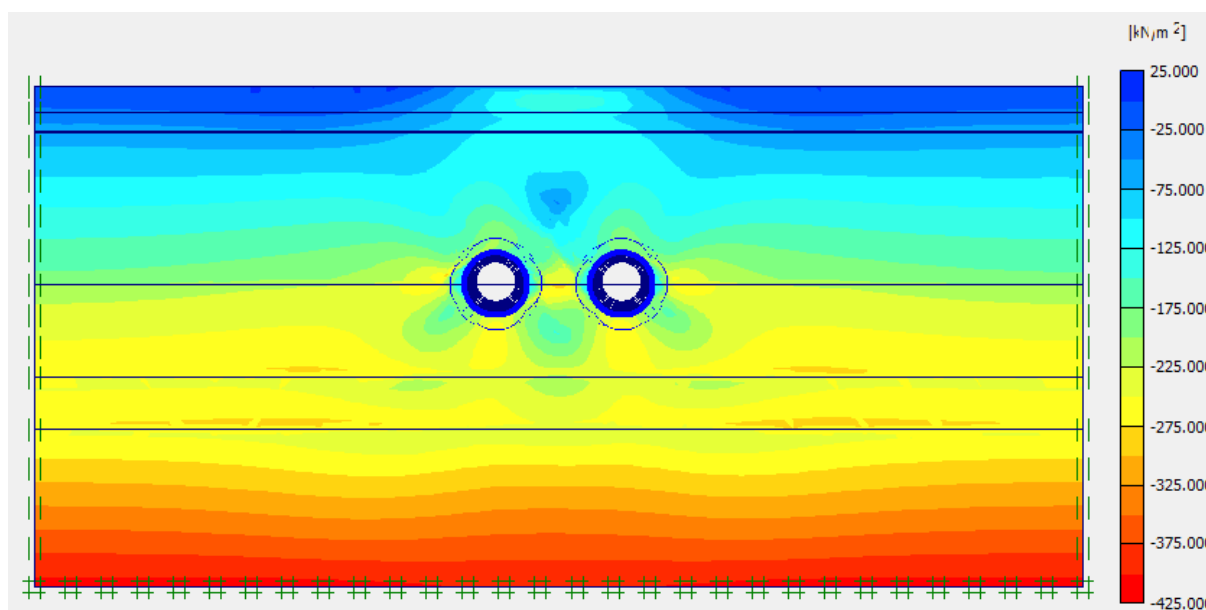


Figura 6.4: Tensões efetivas horizontais na seção 2

## 6.2 Esforços no Suporte

Conforme indicado na seção 5.4, adotou-se uma espessura de suporte de 30 cm de concreto projetado, e o cálculo dos esforços solicitantes nesse suporte foi feito a partir do software PLAXIS 2D. Abaixo a Figura 6.5 e a Figura 6.6 indicam o diagrama de momento fletor para

as Seções 1 e 2 respectivamente. Já a Figura 6.7 e a Figura 6.8 apresentam os diagramas de força cortante, e por fim a Figura 6.9 e a Figura 6.10 indicam o diagrama de forças normais

### 6.2.1 Diagrama de Momento Fletor

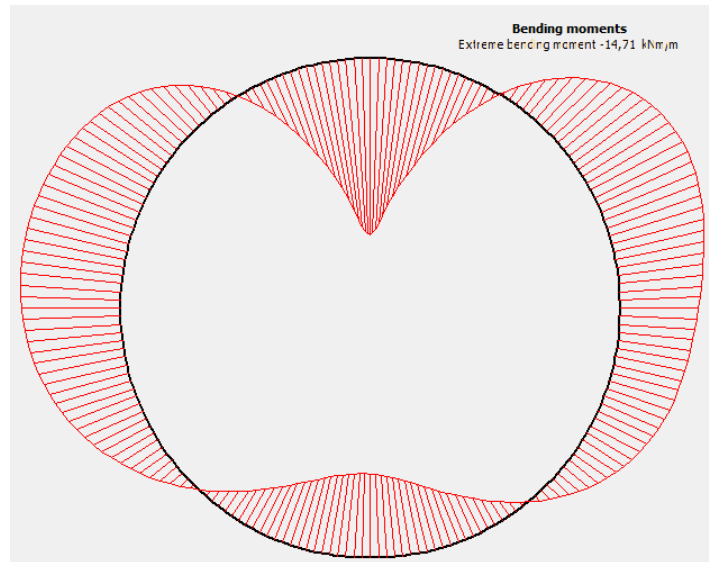


Figura 6.5: Diagrama de momento Fletor da Seção 1

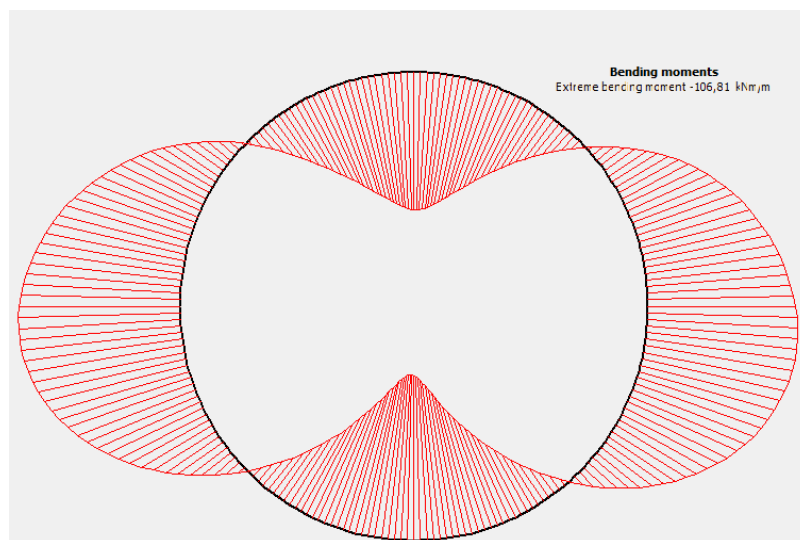


Figura 6.6: Diagrama de Momento Fletor da Seção 2

## 6.2.2 Diagrama Força Cortante

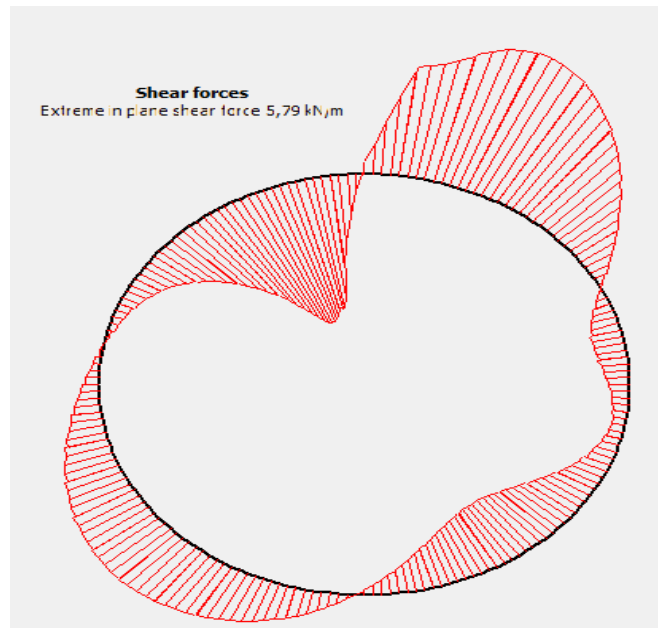


Figura 6.7: Diagrama de Força Cortante da Seção 1

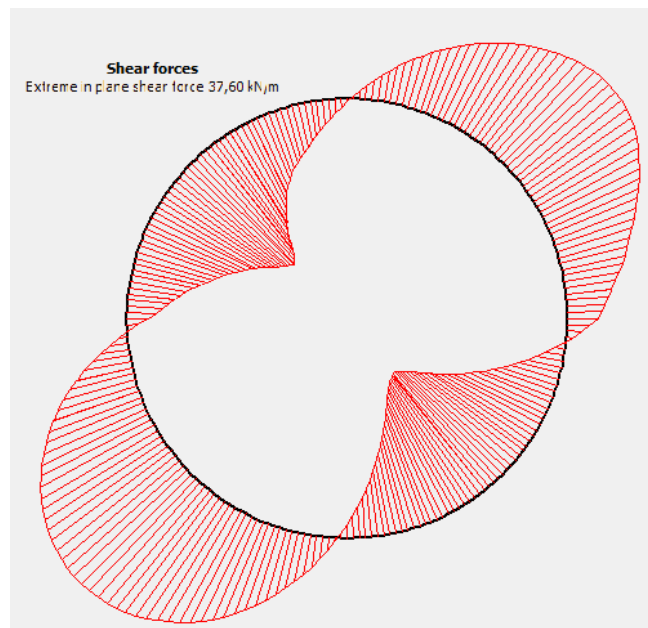


Figura 6.8: Diagrama de Força Cortante da Seção 2

### 6.2.3 Diagrama de Força Normal

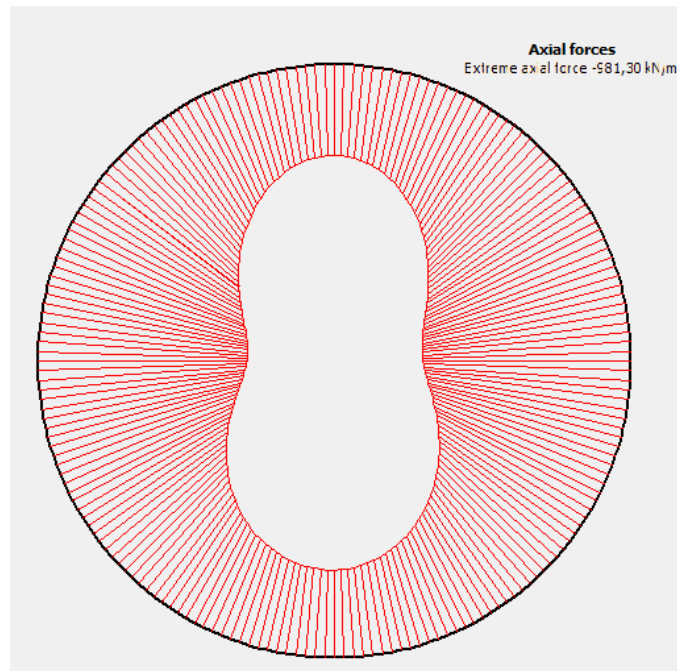


Figura 6.9: Diagrama de Força Normal da Seção 1

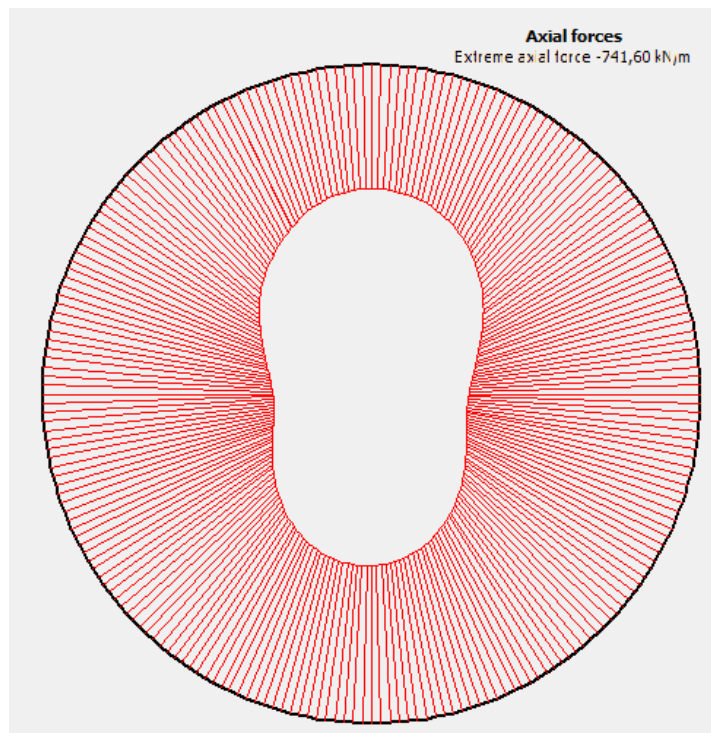


Figura 6.10: Diagrama de Força Normal da Seção 1



### 6.2.4 Dimensionamento do Suporte

O dimensionamento do suporte foi calculado a partir das tensões resultantes nele, de acordo com a fórmula abaixo. Esse valor foi comparado com a resistência do concreto armada à compressão.

$$\sigma = \frac{N}{e} \pm \frac{M * y}{I}$$

Os valores máximos para tensões encontrados na Seção 1 e Seção 2 foram 3,83 Mpa e 9,44 Mpa respectivamente.

O valor da resistência característica a compressão adotado para o concreto foi de 20 Mpa e o fator de segurança usualmente adotado para suportes de túneis é de 2,00. Portanto, o valor admissível para a resistência é de 10 MPa, então ambas as seções estão de acordo com o valor aceitável.

O Apêndice I apresenta os valores calculados para tensão resultante ao longo de todo o suporte nas duas seções analisadas.

## 6.3 Deslocamentos Horizontais

As imagens Abaixo indicam os deslocamentos horizontais provocados pela escavação do túnel na Seção 1 e 2 respectivamente:

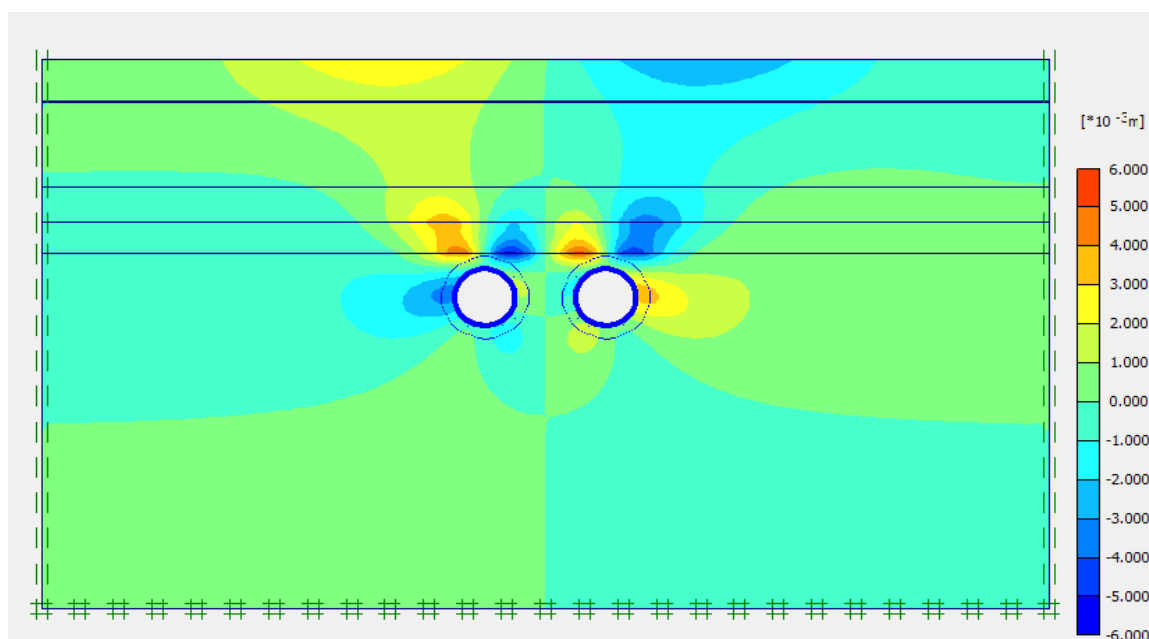


Figura 6.11: Deslocamentos horizontais na seção 1 do túnel com escavação simultânea

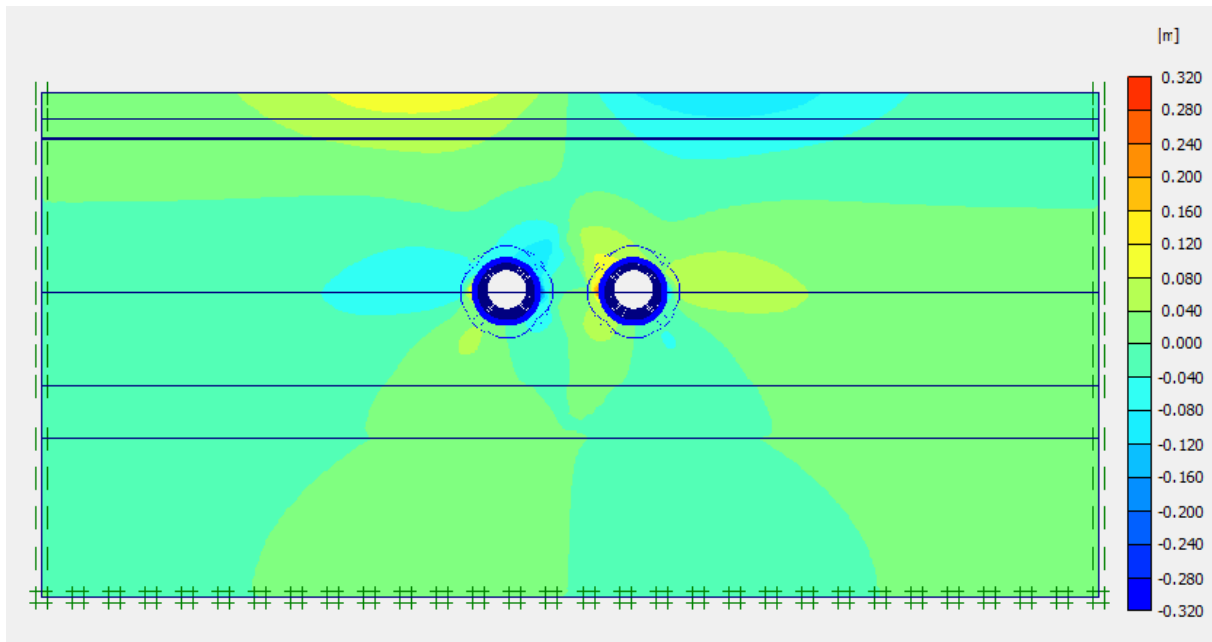


Figura 6.12: Deslocamentos horizontais na seção 2 do túnel com escavação simultânea

#### 6.4 Descolamentos Verticais

Os deslocamentos verticais ao longo da malha foram calculados pelo programa PLAXIS a partir dos valores de entrada. A Figura 6.13 e a Figura 6.14 indicam os valores obtidos para esses deslocamentos considerando a escavação simultânea das galerias do túnel.

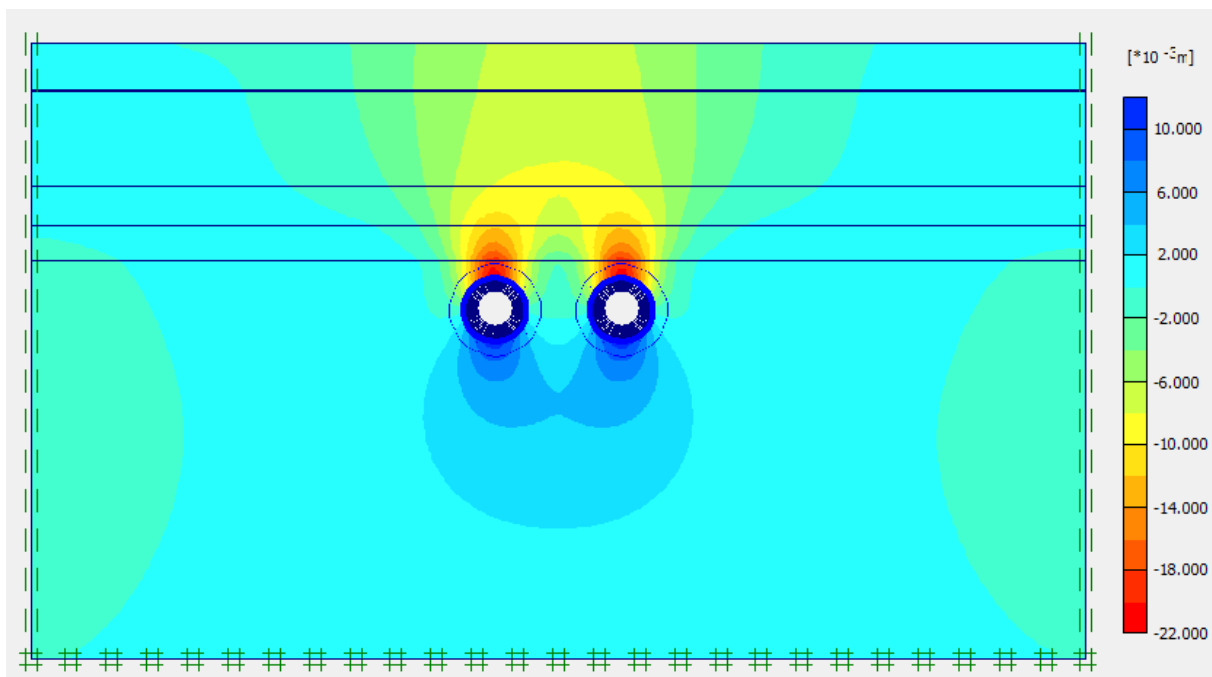


Figura 6.13: Deslocamentos verticais na seção 1 do túnel com escavação simultânea

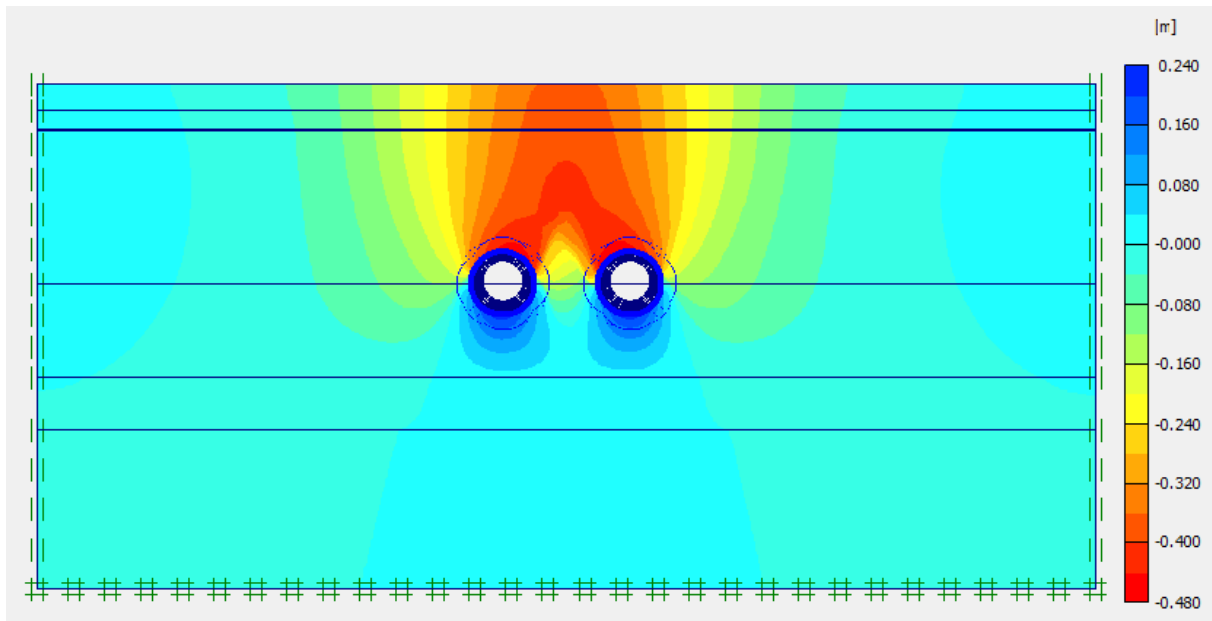


Figura 6.14: Deslocamentos verticais na seção 2 do túnel com escavação simultânea

A partir dos deslocamentos totais foram obtidas as bacias de recalques em algumas alturas definidas. Foram escolhidas cinco seções para o corte, são elas a 0 m , 5 m, 10 m, 15 m e 20 m, para que os recalques distorcionais possam ser calculados em diferentes alturas de fundações.

A altura de 0 m representa uma edificação em fundação rasa, em radier por exemplo. A altura de 5 m simboliza uma fundação em sapata corrida, as alturas de 10 e 15 m representam tubulões e, por fim, a altura de 20 m simula uma fundação em estacas.

A Figura 6.15 e a Figura 6.16 indicam as bacias de recalques total a 0 m da superfície nas Seções 1 e 2 com escavação simultânea das galerias em ambos os casos.

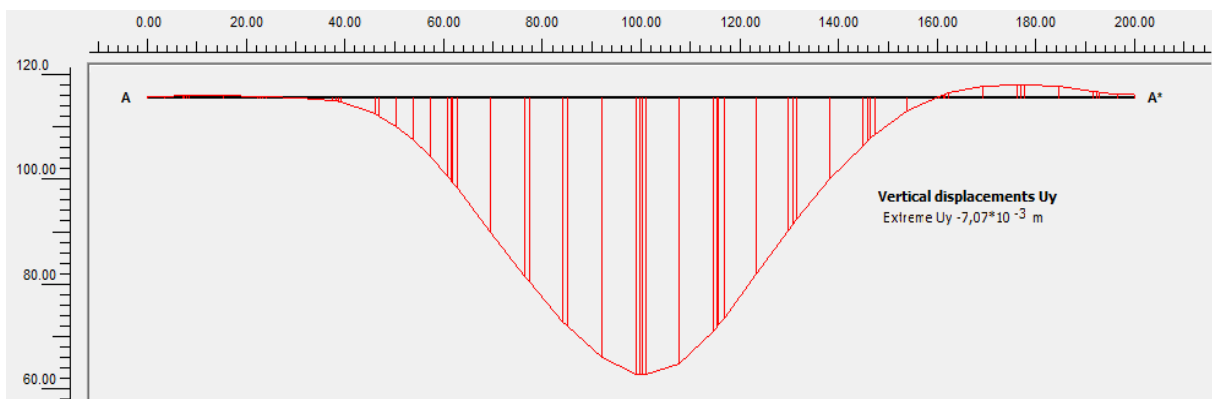


Figura 6.15: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea



Figura 6.16: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea

### 6.3.1 Seção 1

Foram calculados os valores de recalques distorcionais, para as bacias de recalques obtidas, com o alcance horizontal de 6 m, distância usual entre peças de fundações em estruturas. Foram considerados apenas os pontos em que os deslocamentos verticais foram negativos, ou seja, onde há rebaixamento do solo.

No Apêndice II encontram-se as bacias de recalques para cada seção estudada e em cada altura de fundação, assim como o valor máximo de deslocamento vertical, gerado pela escavação simultânea das galerias do túnel pelo método convencional.

O recalque distorcional admissível para estruturas é de  $1/500$ , porém, no caso do Túnel Marcello Alencar, que está situado na Zona Portuária do Rio de Janeiro, o valor admissível é de  $1/1000$ , visto as especificidades das edificações históricas, que não podem tolerar fissurações.

Para a Seção 1, escavada em rocha, o recalque distorcional máximo provocado pela escavação foi obtido em dois trechos, antes e depois do eixo de simetria da configuração geométrica. Eles se deram no ponto de 68 m e 125 m medidos no eixo horizontal, com o ponto 0 fixo na origem das malhas. Ou seja, o recalque distorcional se deu a 25 m do eixo de simetria da galeria do túnel em ambos os casos. Valor que coincide com o ponto de inflexão da bacia de recalques traçadas, onde a curva muda de concavidade, como pode ser visto na Figura 6.15. Os valores críticos encontrados foram de  $1/5635$  e  $1/5620$  respectivamente, que estão bem acima do aceitável para não provocar danos estruturais em edifícios históricos (ver Figura 6.18).

A Figura 6.17 mostra os recalques distorcionais calculados nos diversos pontos ao longo do eixo horizontal, com ponto inicial na origem da malha. Observa-se que no eixo de simetria o recalque distorcional calculado é 0, pois não há diferença entre os deslocamentos das peças de fundação.

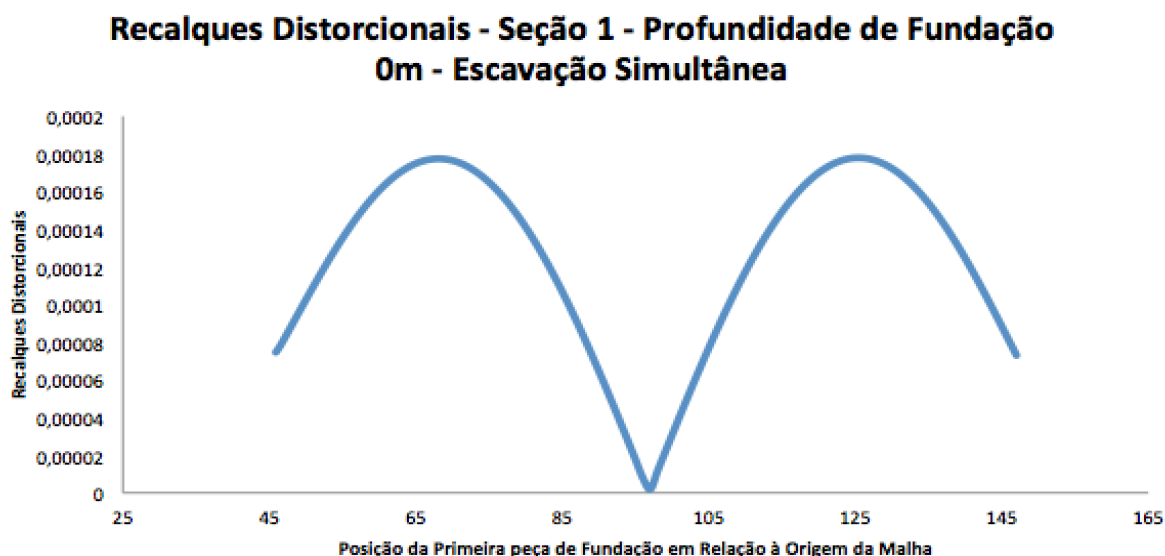


Figura 6.17: Recalques Distorcionais ao longo da superfície

A Tabela 6.1 indica os recalques distorcionais críticos na seção 1 para cada altura de fundação adotada, bem como a posição de referência do primeiro elemento de fundação desses pontos críticos em relação a origem e em relação ao eixo de simetria da configuração geométrica, conforme indica a Figura 6.18.

Tabela 6.1: Recalques distorcionais críticos na Seção 1

Profundidade de Fundação (m)	Recalque Distorcional Crítico - Antes da Simetria	Posição em Relação à Origem da Malha (m)	Posição em Relação à Simetria (m)	Recalque Distorcional Crítico - Depois da Simetria	Posição em Relação a Origem da Malha (m)	Posição em Relação à Simetria (m)
0	1/5635	68	32	1/5622	125	25
5	1/5411	70	30	1/5330	124	24
10	1/5096	71	29	1/5077	123	23
15	1/4733	72	28	1/4643	123	23
20	1/4276	72	28	1/4231	122	22

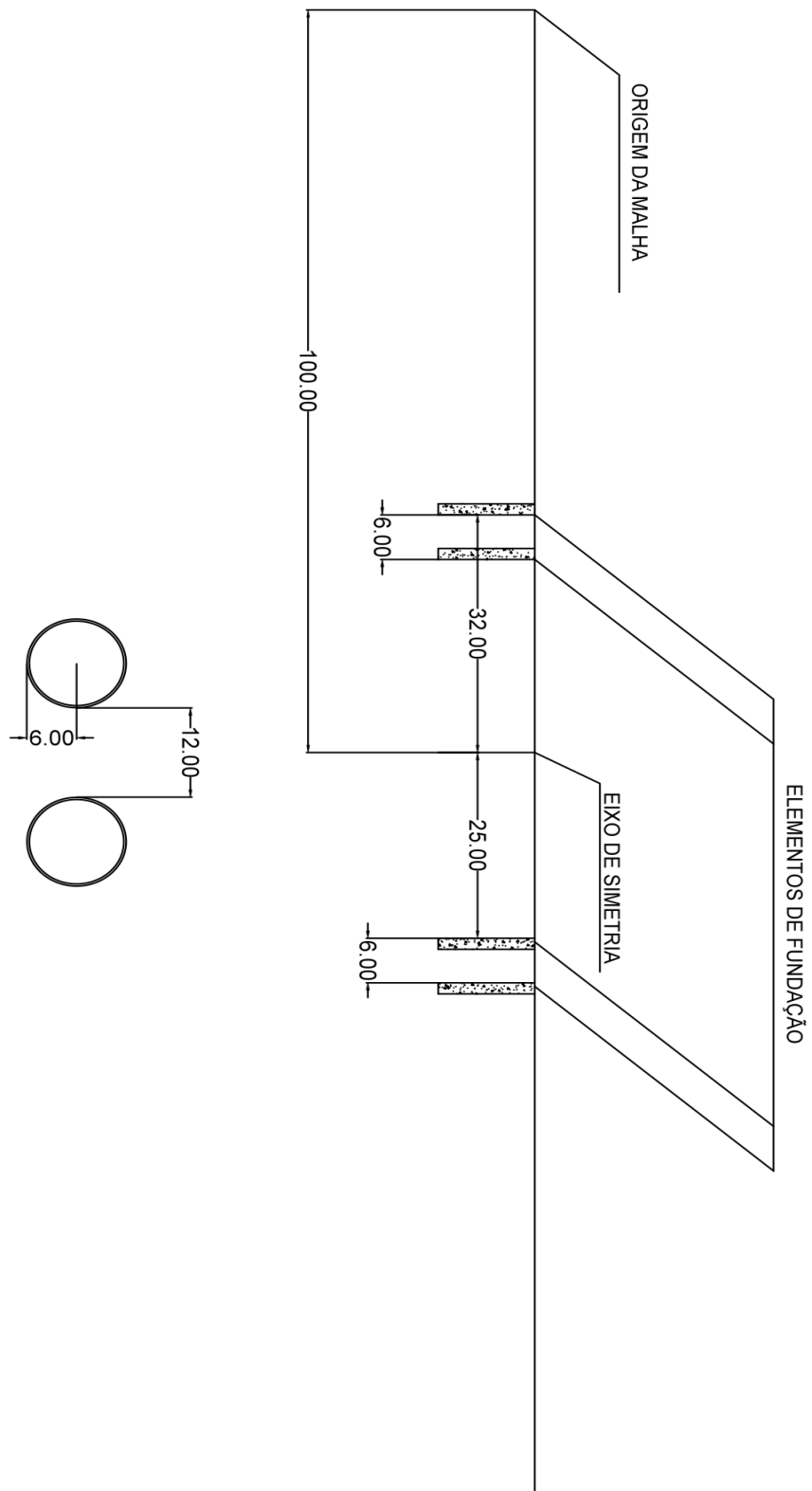


Figura 6.18: Configuração geométrica dos elementos de fundação nas seções críticas

Portanto, a escavação da Seção 1, em rocha pelo método convencional, NATM, não causará danos estruturais nas edificações em superfície que estão alicerçadas nas cinco alturas de fundações analisadas, uma vez que os recalques distorcionais críticos calculados são cerca de cinco vezes menor do que o aceitável, não sendo preciso reforço estrutural.

### 6.3.2 Seção 2

Na análise da Seção 2 utilizou-se a mesma metodologia que na Seção 1. Na Figura 6.19 encontram-se os recalques distorcionais à profundidade de 0 m causados pela perfuração simultânea das galerias do túnel Marcello Alencar. Nota-se que nessa seção os recalques críticos antes de depois do eixo de simetria foram de 1/109 e 1/108 respectivamente, e foram obtidos à 69 m e 124 m da origem da malha, ou 31 m e 24 m do eixo de simetria.

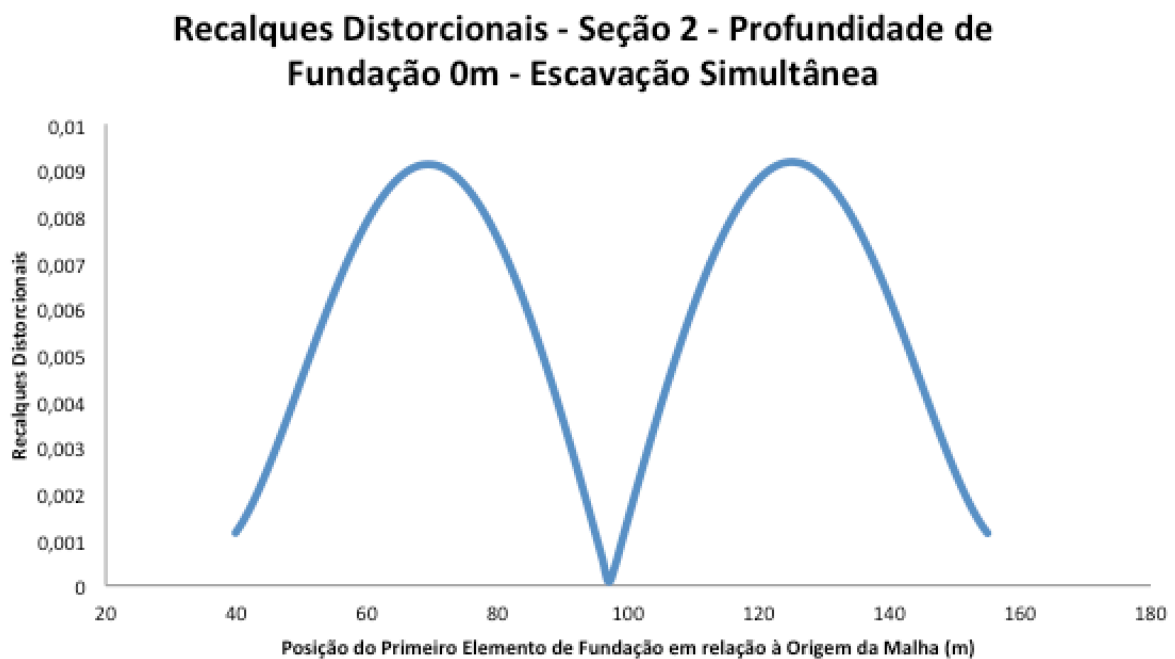


Figura 6.19: Recalques Distorcionais ao longo da superfície

A **Tabela 6.2** indica os recalques distorcionais críticos na seção 2 para cada altura de fundação escolhida, bem como a distância dos primeiros elementos de fundação ao eixo de simetria. Os recalques distorcionais novamente foram calculados a 6 m, distância usual de

peças de fundações (ver Figura 6.18: Configurações geométricas dos elementos de fundação nas seções críticas).

Tabela 6.2: Recalques distorcionais críticos na Seção 2 – Escavação Simultânea

Profundidade de Fundação (m)	Recalque Distorcional Crítico - Antes da Simetria	Posição em Relação à Origem da Malha (m)	Posição em Relação à Simetria (m)	Recalque Distorcional Crítico - Depois da Simetria	Posição em Relação a Origem da Malha (m)	Posição em Relação à Simetria (m)
0	1/109	69	31	1/108	125	25
5	1/104	70	30	1/104	125	25
10	1/100	70	30	1/99	124	24
15	1/94	71	29	1/94	123	23
20	1/88	72	28	1/88	123	23

Na Seção 2, que é composta por uma perfuração em seção mista, onde o centro do túnel está localizado a 37,03 m de profundidade, a perfuração das galerias simultaneamente gerou recalques distorcionais críticos em média dez vezes maiores do que o admissível para edificações históricas, que não podem sofrer danos estruturais significantes, a ponto de ter fissuras e tricas. Portanto, neste caso recomenda-se reforço estrutural.

Como os deslocamentos verticais foram consideravelmente altos em todas as alturas de fundação analisadas, simulou-se a escavação do túnel em duas etapas. Inicialmente a galeria da direita foi escavada e o suporte foi alocado, e em seguida a segunda galeria foi perfurada e os suportes foram adicionados. Dessa forma espera-se que o impacto da perfuração sobre o solo em superfície seja menor, diminuindo assim a tendência de patologias estruturais nas edificações históricas da Zona Portuária do Rio de Janeiro.

A Figura 6.20 apresenta a bacia de recalques gerada a 0m de profundidade pela perfurações em etapas do túnel Marcello Alencar, na seção 2.





Figura 6.20: Bacia de Recalques a 0m de profundidade na Seção 2 gerada pela escavação em etapas

Nota-se que em superfície o deslocamento total em um ponto gerado pela escavação em etapas é de 25,8 cm enquanto na mesma seção e mesma altura, o deslocamento máximo é de 36,8 cm, conforme visto na Figura 6.16.

A Tabela 6.3 mostra a os deslocamentos máximos em todas as profundidades de fundações analisadas pela escavação simultânea e em etapas na Seção 2:

Tabela 6.3: Deslocamentos verticais máximos na Seção 2

Profundidade de Fundação (m)	Deslocamento Vertical Máximo (cm)	
	Escavação Simultânea	Escavação em Etapas
0	36,80	25,8
5	38,20	26,5
10	39,00	27,0
15	40,00	27,4
20	41,40	27,8

No Apêndice III encontram-se todas as bacias de recalques para a escavação em etapas das Seções 1 e 2, entretanto, na análise feita para a escavação simultânea da Seção 1 não houveram deflexões suficientes para causar abalos estruturais, portanto, para a escavação em etapas, onde as condições são mais favoráveis, esses recalques também não serão prejudiciais.

A Figura 6.21 apresenta os recalques distorcionais calculados ao longo da superfície para a escavação em etapas. Os valores críticos encontrados foram de 1/161 em ambos os lados da simetria, localizados a 67 m e 126 m da origem da malha.

### Recalques Distorcionais - Seção 2 - Profundidade de Fundação 0m - Escavação em Etapas

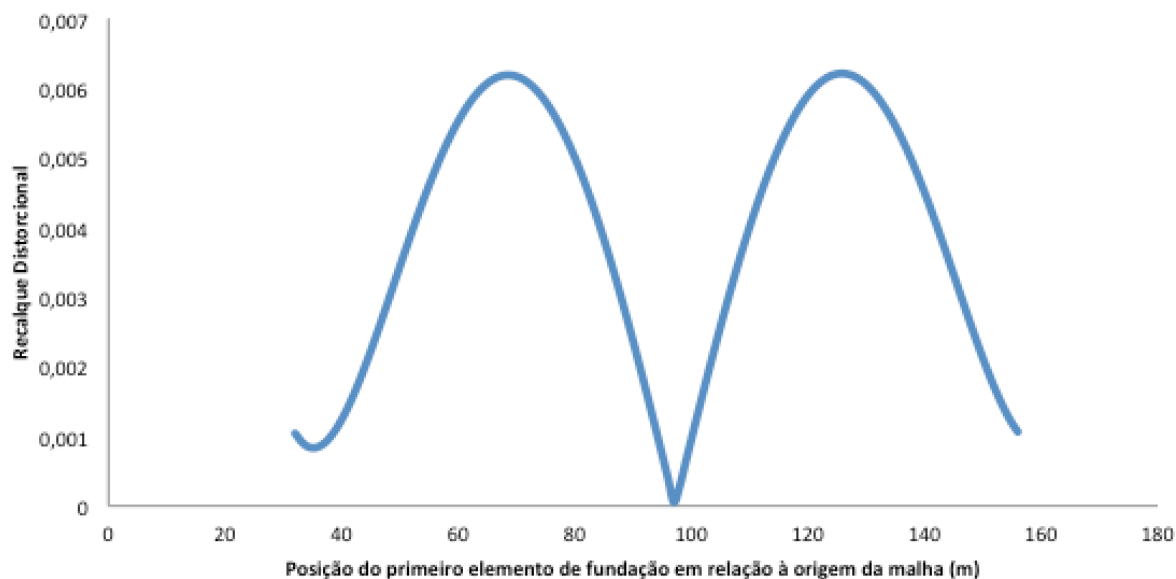


Figura 6.21: Recalques Distorcionais ao longo da superfície

A tabela abaixo indica os valores críticos de recalques distorcionais em cada altura de profundidade para a escavação em etapas.

Tabela 6.4: Recalques distorcionais críticos na Seção 2 – Escavação em Etapas

Profundidade de Fundação (m)	Recalque Distorcional Crítico - Antes da Simetria	Posição em Relação à Origem da Malha (m)	Posição em Relação à Simetria (m)	Recalque Distorcional Crítico - Depois da Simetria	Posição em Relação a Origem da Malha (m)	Posição em Relação à Simetria (m)
0	1/161	67	33	1/161	126	26
5	1/156	67	33	1/156	124	24
10	1/149	69	31	1/148	125	25
15	1/141	70	30	1/142	125	25
20	1/132	71	29	1/30	124	24

Portanto, a escavação em etapas gerou recalques distorcionais menores que a escavação em simultânea, porém ainda são mais elevados do que o recomendado para edificações históricas, então, ainda aconselha-se reforço estrutural.

## 7. CONCLUSÃO

A construção de túneis urbanos é, sem dúvidas, muito mais que um desafio geotécnico, mas também um desafio político e econômico, a medida que os investimentos necessários para a criação de tais soluções de engenharia são elevados, o que se agrava ainda mais com os eventuais reforços estruturais, que são necessários por conta dos recalques distorcionais induzidos nas estruturas em superfície, principalmente em túneis escavados pelo método NATM e em túneis rasos ou em solo.

Porém, com a prática da boa engenharia, os túneis podem ser ferramentas de valorização econômica, como foi o caso do Túnel Marcello Alencar no Projeto Porto Maravilha, o Túnel SMART em Kuala Lumpur, a Artéria Central de Boston e o Túnel de São Gotardo nos Alpes Suíços. Dessa forma, além de ganhos indiretos trazidos pela revitalização desses espaços urbanos, pela substituição do transporte em superfície pelo subterrâneo, como a qualidade de vida das pessoas que vivem na cidade, existem também ganhos financeiros palpáveis para a administração pública, como o aumento na arrecadação de impostos sobre habitações e comércios nas imediações da região amplamente valorizada pela nova construção.

Cabe-se ainda ressaltar a diminuição do impacto ambiental trazido pelas obras subterrâneas, que, como no caso do Túnel da Nova Subida da Serra em Petrópolis e da Sequência de túneis da Rodovia dos Imigrantes no estado de São Paulo tornaram as obras viáveis, mesmo passando por áreas de proteção ambiental, garantindo assim o desenvolvimento sustentável da região e a não extinção da fauna e flora local, únicas no mundo.

O desafio econômico muitas vezes está ligado também ao método construtivo utilizado, uma vez que em túneis escavados por tuneladoras, o coeficiente de relaxação adotado é consideravelmente menor do que o utilizado em túneis escavados pelo método convencional, o que provoca menores recalques nas estruturas, diminuindo os custos de reforços nas fundações. Esse fator deve ser levado em conta especialmente em sítios históricos e patrimônios tombados, por conta dos limites inferiores de recalques distorcionais admissíveis em edificações com essas características.

Todavia, os altos custos das tuneladoras podem inviabilizar essa solução. Mas, uma outra possível solução é levar o túnel a uma maior profundidade, preferencialmente em rocha, para que os recalques induzidos na superfície sejam menores, ainda se utilizado o método NATM, assim como foi feito no túnel Marcello Alencar.

Conclui-se então que indubitavelmente o Projeto Porto Maravilha foi bem sucedido e trouxe um grande legado pra cidade do Rio de Janeiro, mesmo após os grandes eventos esportivos para qual ele foi originalmente criado. A valorização do espaço em superfície trouxe resultados pra população carioca e também para a prefeitura, que segue faturando com o turismo, com a venda de terrenos na região e com os impostos arrecadados.

Projetos integradores como este são necessários e fundamentais para o crescimento inteligente das nossas cidades. Na era ambiental e da informação é preciso que a engenharia civil tenha uma unidade, entre transportes, geotecnia, recursos hídricos, estruturas e materiais de construção civil, para que juntos possam ser criadas soluções inovadoras, como o Projeto Porto Maravilha, pois a prática da boa engenharia tem grande impacto social, sendo ela um forte instrumento de mudança na qualidade de vida das pessoas que vivem nas cidades.

Mesmo com uma boa escolha do método construtivo e uma análise eficiente dos deslocamentos causados pela perfuração de túneis, ainda existem outros fatores que podem impactar diretamente os custos de obras subterrâneas no Brasil, chegando até mesmo a inviabilizar essas construções. São eles os riscos, muitas vezes negligenciados pela administração pública, que segue o modelo de licitação estabelecido pela Lei 8.666/93. A análise de como essa lei tem impactos na viabilidade econômica de obras subterrâneas é uma sugestão de tema para futuros trabalhos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAPM, Associação Amigos Parque Minhocão. A história do Minhocão (2016). Disponível em: <<http://minhocao.org/a-historia-do-minhocao/>>. Acesso em: 1 de nov. 2016.

ABRAHÃO, Sergio (2011). Espaço público na São Paulo do século XXI: perspectivas. Revista Arq.

ALBUQUERQUE, Carlos. Projeto de Viadutos em Fortaleza incita debates sobre mobilidade urbana (2013). Disponível em: <<http://dw.com/p/1ABTR>>. Acesso em: 5 de nov. 2016.

ARTIGAS, Rosa; MELLO, Joana; CASTRO, Ana. 2º prêmio Prestes Maia de urbanismo: as propostas para o Minhocão. In Caminhos do elevado: memórias e projetos. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008. p.75 a 89

Assis, A.P. (2016). Notas de Aula da Disciplina de Obras Subterrâneas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

BRASIL. Lei n. 12.587, de 3 de janeiro de 2012. **Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana; revoga dispositivos dos Decretos-Leis nºs 3.326, de 3 de junho de 1941, e 5.405, de 13 de abril de 1943, da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, e das Leis nºs 5.917, de 10 de setembro de 1973, e 6.261, de 14 de novembro de 1975; e dá outras providências.** 2012.

BRASIL. Prefeitura do Rio de Janeiro. Túnel Prefeito Marcello Alencar (2015). Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6188641/4162729/ViaExpressaeTunelMarcelloAlencar.pdf>>. Acesso em: 2 de nov. 2016.

BROWN-WEST, Orikaye G. In *Defese of the Big Dig*. United States of America: Diabono Consolidated, 2007.

CAMPOS, Vânia Barcellos Gouvêa. "Uma visão da mobilidade urbana sustentável." *Revista dos Transportes Públicos* 2 (2006): 99-106.

CBT, Comitê Brasileiro de Túneis. Túneis do Brasil. São Paulo: Editora DBA, 2006.

DARBY, Arthur. A Dual-Purpose Tunnel. *Ingenia* 30, March 2007.

DA SILVA, Carlos Antônio R. Perfil geológico-geotécnico do subsolo ao longo do traçado do Metrô de Goiânia. 2007. 227 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF, 2007.

DAVID, Flávia. Prefeitura entrega o novo túnel Prefeito Marcello Alencar na Região Portuária (2016). Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/guest/exibeconteudo?id=6214944>>. Acesso em: 1 de nov. 2016.

DER/SP, Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo. Histórico de rodovias. Disponível em <<http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/Institucional/HistoricoRodovias.aspx>>. Acesso em: 06 de nov. de 2016.

DOMINGUES, V. R. (2016). Técnicas Construtivas de Túneis de Travessia. Dissertação de Mestrado, Publicação G-DM-269/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

EHRBAR, Heinz. Gotthard Base Tunnel, Switzerland. Experiences with different Tunnelling Methods. In: Proc. 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, São Paulo. 2008.

FOÁ, S. B. (2005). Análise dos recalques de fundações e seus danos em edifícios devido a escavações subterrâneas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-031/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 308 p.

GALLARDO, Amarilis Lucia Casteli Figueredo; SÁNCHEZ, Luis Enrique. Gestão Ambiental da Construção da Pista Descendente da Rodovia dos Imigrantes - Atenuação de Impactos Sobre o Meio Físico em Ambientes Frágeis. Revista Solos e Rochas. São Paulo, Setembro – Dezembro, 2006.

HERRENKNECHT. Machine Technology. Disponível em: <<http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology.html>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

IPHAN, Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Rio de Janeiro (RJ). Disponível em <<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/383/>>. Acesso em: 10 de nov. de 2016.

LETICHEVSKY, David. Pela Transformação do Elevado da Perimetral em um Jardim Suspenso. Disponível em <<http://paneladepressao.nossascidades.org/campaigns/101>>. Acesso em: 19 de nov. de 2016.

MENINO, Tom. Then and Now : Menino's Boston (2013). Boston Magazine. Disponível em <<http://www.bostonmagazine.com/news/article/2013/09/24/mayor-tom-menino-big-dig-photos/>>. Acesso em: 07 de nov. de 2016.

MOREIRA, Carlos Manuel da Cruz. Túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro, 2006.

NSS. Nova Subida da Serra (2016). Disponível em <<http://www.novaserraconcer.com.br/>>. Acesso em: 04 de nov. de 2016.

O DIA (2016). Centro e Região Portuária Terão Alterações Para Inauguração de Via Expressa. Artigo Jornalístico. Disponível em <<http://odia.ig.com.br/rio-de-janeiro/odia24horas/2016-06-15/centro-e-regiao-portuaria-terao-alteracoes-para-inauguracao-de-via-expressa.html>>. Acesso em: 16 de jun. de 2017.

PLAXIS, 2016a. Rock, Mining and Tunnelling. Disponível em <<https://www.plaxis.com/industries/rock-mining-and-tunnelling/>>. Acesso em: 19 de nov. de 2016.

PLAXIS, 2016b. Modelling Complex Geo-Engineering Projects Made Easy <<https://www.plaxis.com/>>. Acesso em: 19 de nov. de 2016.

PORTO MARAVILHA. Fotos e videos de Via Expressa e Túnel Prefeito Marcello Alencar. Disponível em <[http://portomaravilha.com.br/fotos\\_videos/g/21](http://portomaravilha.com.br/fotos_videos/g/21)>. Acesso em: 16 de jun. de 2017.

SALVUCCI, F. P. The 'Big Dig' of Boston, Massachusetts: lessons to learn. Re) claiming the underground space. Swets and Zeitlinger, BV, Lisse, The Netherlands, p. 37-42, 2003.

SAUER, G; MERGELSBERG, Walter A. Tunneling... and beyond. Dr. G. Sauer Corp., Herndon, EUA, 2004.

SMITH, Michael W. Boston's "Big Dig": A Socio-Historical and Political Analysis of Malfeasance and Official Deviance. NATIONAL SOCIAL SCIENCE JOURNAL Volume 34# 2, p. 148, 2010.

TAJIMA, Kayo. New estimates of the demand for urban green space: implications for valuing the environmental benefits of Boston's big dig project. *Journal of Urban Affairs*, v. 25, n. 5, p. 641-655, 2003.

TRAVAGIN, Vinícius Bernardino. Subsídios para escolha do método construtivo de túneis. 2012.



## APÊNDICE I

Tabela AI.1: Esforços Atuantes na Seção 1 do Suporte Túnel

X (m)	Y (m)	N (KN/m)	V (KN/m)	M (KNm/m)	$\sigma$ (Mpa)
82,00	66,00	-978,93	0,53	-8,26	3,81
82,00	65,80	-976,14	0,55	-8,16	3,80
82,01	65,61	-972,30	0,68	-8,03	3,78
82,03	65,41	-967,42	0,80	-7,89	3,75
82,05	65,22	-961,50	0,83	-7,73	3,72
82,05	65,22	-961,52	0,94	-7,73	3,72
82,08	65,02	-954,56	0,97	-7,54	3,68
82,12	64,83	-946,64	1,10	-7,34	3,64
82,16	64,64	-937,74	1,24	-7,11	3,60
82,20	64,45	-927,88	1,28	-6,86	3,55
82,20	64,45	-927,92	1,38	-6,86	3,55
82,26	64,26	-917,12	1,42	-6,59	3,50
82,32	64,07	-905,50	1,55	-6,29	3,44
82,38	63,89	-893,04	1,68	-5,98	3,38
82,46	63,70	-879,74	1,71	-5,64	3,31
82,46	63,70	-879,80	1,81	-5,64	3,31
82,53	63,52	-865,73	1,84	-5,29	3,24
82,62	63,35	-851,04	1,95	-4,92	3,16
82,71	63,17	-835,70	2,07	-4,52	3,09
82,80	63,00	-819,71	2,11	-4,11	3,01
82,80	63,00	-819,79	2,19	-4,11	3,01
82,90	62,83	-803,26	2,19	-3,68	2,92
83,01	62,67	-786,35	2,26	-3,24	2,84
83,12	62,51	-769,05	2,35	-2,79	2,75
83,24	62,35	-751,35	2,37	-2,33	2,66
83,24	62,35	-751,44	2,43	-2,33	2,66
83,36	62,19	-733,46	2,42	-1,85	2,57
83,49	62,04	-715,39	2,46	-1,37	2,48
83,62	61,90	-697,20	2,50	-0,89	2,38
83,76	61,76	-678,90	2,49	-0,39	2,29
83,76	61,76	-678,99	2,53	-0,39	2,29
83,90	61,62	-660,72	2,50	0,10	2,21
84,04	61,49	-642,65	2,49	0,59	2,18
84,19	61,36	-624,77	2,48	1,07	2,15
84,35	61,24	-607,08	2,44	1,56	2,13
84,35	61,24	-607,17	2,45	1,56	2,13
84,51	61,12	-589,82	2,39	2,03	2,10
84,67	61,01	-572,97	2,34	2,50	2,08
84,83	60,90	-556,61	2,28	2,95	2,05

85,00	60,80	-540,74	2,20	3,39	2,03
85,00	60,80	-540,82	2,20	3,39	2,03
85,17	60,71	-525,58	2,11	3,82	2,01
85,35	60,62	-511,12	2,01	4,22	1,99
85,52	60,53	-497,41	1,90	4,60	1,96
85,70	60,46	-484,46	1,80	4,97	1,95
85,70	60,46	-484,53	1,77	4,97	1,95
85,89	60,38	-472,48	1,66	5,30	1,93
86,07	60,32	-461,42	1,51	5,62	1,91
86,26	60,26	-451,34	1,36	5,90	1,90
86,45	60,20	-442,25	1,23	6,15	1,88
86,45	60,20	-442,29	1,20	6,15	1,88
86,64	60,16	-434,29	1,07	6,38	1,87
86,83	60,12	-427,42	0,89	6,57	1,86
87,02	60,08	-421,70	0,71	6,73	1,85
87,22	60,05	-417,12	0,57	6,85	1,85
87,22	60,05	-417,14	0,52	6,85	1,85
87,41	60,03	-413,76	0,38	6,94	1,84
87,61	60,01	-411,59	0,18	6,99	1,84
87,80	60,00	-410,63	-0,01	7,01	1,84
88,00	60,00	-410,89	-0,16	6,99	1,84
88,00	60,00	-410,88	-0,21	6,99	1,84
88,20	60,00	-412,36	-0,36	6,94	1,84
88,39	60,01	-415,04	-0,55	6,85	1,84
88,59	60,03	-418,91	-0,74	6,72	1,84
88,78	60,05	-423,97	-0,89	6,56	1,85
88,78	60,05	-423,94	-0,94	6,56	1,85
88,98	60,08	-430,17	-1,07	6,37	1,86
89,17	60,12	-437,48	-1,25	6,14	1,87
89,36	60,16	-445,87	-1,42	5,88	1,88
89,55	60,20	-455,36	-1,55	5,58	1,89
89,55	60,20	-455,30	-1,58	5,58	1,89
89,74	60,26	-465,79	-1,70	5,26	1,90
89,93	60,32	-477,17	-1,84	4,91	1,92
90,11	60,38	-489,45	-1,98	4,54	1,93
90,30	60,46	-502,62	-2,08	4,14	1,95
90,30	60,46	-502,54	-2,09	4,14	1,95
90,48	60,53	-516,50	-2,18	3,72	1,97
90,65	60,62	-531,09	-2,27	3,28	1,99
90,83	60,71	-546,32	-2,34	2,83	2,01
91,00	60,80	-562,19	-2,40	2,36	2,03
91,00	60,80	-562,10	-2,40	2,36	2,03
91,17	60,90	-578,47	-2,45	1,89	2,05
91,33	61,01	-595,18	-2,47	1,40	2,08
91,49	61,12	-612,23	-2,48	0,92	2,10

91,65	61,24	-629,64	-2,50	0,43	2,13
91,65	61,24	-629,55	-2,47	0,43	2,13
91,81	61,36	-647,14	-2,47	-0,06	2,16
91,96	61,49	-664,76	-2,42	-0,54	2,25
92,10	61,62	-682,42	-2,36	-1,01	2,34
92,24	61,76	-700,12	-2,32	-1,46	2,43
92,24	61,76	-700,03	-2,27	-1,46	2,43
92,38	61,90	-717,62	-2,22	-1,91	2,52
92,51	62,04	-734,94	-2,11	-2,33	2,61
92,64	62,19	-752,02	-1,99	-2,73	2,69
92,76	62,35	-768,86	-1,93	-3,12	2,77
92,76	62,35	-768,78	-1,86	-3,12	2,77
92,88	62,51	-785,23	-1,77	-3,48	2,85
92,99	62,67	-801,18	-1,62	-3,81	2,92
93,10	62,83	-816,65	-1,46	-4,11	3,00
93,20	63,00	-831,63	-1,39	-4,39	3,06
93,20	63,00	-831,57	-1,30	-4,39	3,06
93,29	63,17	-845,95	-1,22	-4,64	3,13
93,38	63,35	-859,66	-1,07	-4,86	3,19
93,47	63,52	-872,71	-0,92	-5,06	3,25
93,54	63,70	-885,10	-0,88	-5,23	3,30
93,54	63,70	-885,06	-0,79	-5,23	3,30
93,62	63,89	-896,72	-0,74	-5,38	3,35
93,68	64,07	-907,59	-0,63	-5,52	3,39
93,74	64,26	-917,70	-0,53	-5,63	3,43
93,80	64,45	-927,04	-0,55	-5,74	3,47
93,80	64,45	-927,02	-0,45	-5,74	3,47
93,84	64,64	-935,55	-0,48	-5,83	3,51
93,88	64,83	-943,24	-0,44	-5,92	3,54
93,92	65,02	-950,12	-0,42	-6,00	3,57
93,95	65,22	-956,17	-0,52	-6,09	3,59
93,95	65,22	-956,16	-0,41	-6,09	3,59
93,97	65,41	-961,36	-0,52	-6,19	3,62
93,99	65,61	-965,71	-0,54	-6,29	3,64
94,00	65,80	-969,21	-0,57	-6,40	3,66
94,00	66,00	-971,85	-0,72	-6,52	3,67
94,00	66,00	-971,85	-0,61	-6,52	3,67
94,00	66,20	-973,62	-0,75	-6,66	3,69
93,99	66,39	-974,51	-0,80	-6,81	3,70
93,97	66,59	-974,53	-0,84	-6,97	3,71
93,95	66,78	-973,66	-0,97	-7,15	3,72
93,95	66,78	-973,66	-0,86	-7,15	3,72
93,92	66,98	-971,89	-0,98	-7,33	3,73
93,88	67,17	-969,21	-0,97	-7,52	3,73
93,84	67,36	-965,63	-0,95	-7,71	3,73

93,80	67,55	-961,12	-1,00	-7,90	3,73
93,80	67,55	-961,13	-0,89	-7,90	3,73
93,74	67,74	-955,68	-0,91	-8,08	3,72
93,68	67,93	-949,31	-0,80	-8,25	3,71
93,62	68,11	-942,01	-0,66	-8,39	3,70
93,54	68,30	-933,76	-0,57	-8,51	3,68
93,54	68,30	-933,79	-0,48	-8,51	3,68
93,47	68,48	-924,58	-0,36	-8,60	3,66
93,38	68,65	-914,48	-0,13	-8,64	3,62
93,29	68,83	-903,46	0,14	-8,64	3,59
93,20	69,00	-891,50	0,34	-8,59	3,54
93,20	69,00	-891,56	0,43	-8,59	3,54
93,10	69,17	-878,71	0,66	-8,49	3,50
92,99	69,33	-865,06	0,98	-8,33	3,44
92,88	69,49	-850,61	1,32	-8,10	3,38
92,76	69,65	-835,31	1,60	-7,81	3,31
92,76	69,65	-835,39	1,67	-7,81	3,31
92,64	69,81	-819,35	1,96	-7,46	3,23
92,51	69,96	-802,72	2,31	-7,04	3,15
92,38	70,10	-785,48	2,67	-6,55	3,06
92,24	70,24	-767,61	2,96	-6,00	2,96
92,24	70,24	-767,71	3,03	-6,00	2,96
92,10	70,38	-749,35	3,32	-5,37	2,86
91,96	70,51	-730,71	3,66	-4,69	2,75
91,81	70,64	-711,75	3,99	-3,94	2,64
91,65	70,76	-692,47	4,27	-3,13	2,52
91,65	70,76	-692,60	4,31	-3,13	2,52
91,49	70,88	-673,19	4,59	-2,25	2,39
91,33	70,99	-653,87	4,87	-1,32	2,27
91,17	71,10	-634,64	5,14	-0,34	2,14
91,00	71,20	-615,47	5,36	0,69	2,10
91,00	71,20	-615,60	5,37	0,69	2,10
90,83	71,29	-596,73	5,55	1,76	2,11
90,65	71,38	-578,41	5,68	2,87	2,12
90,48	71,47	-560,61	5,76	3,99	2,13
90,30	71,54	-543,34	5,79	5,12	2,15
90,30	71,54	-543,47	5,76	5,12	2,15
90,11	71,62	-526,97	5,71	6,25	2,17
89,93	71,68	-511,47	5,56	7,36	2,20
89,74	71,74	-496,97	5,34	8,43	2,22
89,55	71,80	-483,45	5,09	9,45	2,24
89,55	71,80	-483,54	5,03	9,45	2,24
89,36	71,84	-471,27	4,76	10,42	2,27
89,17	71,88	-460,31	4,53	11,33	2,29
88,98	71,92	-450,64	4,37	12,20	2,32

88,78	71,95	-442,27	4,30	13,05	2,34
88,78	71,95	-442,36	4,10	13,05	2,34
88,59	71,97	-435,81	3,05	13,75	2,37
88,39	71,99	-430,98	2,03	14,25	2,39
88,20	72,00	-427,84	1,13	14,56	2,40
88,00	72,00	-426,34	0,47	14,71	2,40
88,00	72,00	-426,34	0,16	14,71	2,40
87,80	72,00	-426,97	-0,66	14,66	2,40
87,61	71,99	-429,26	-1,62	14,44	2,39
87,41	71,97	-433,21	-2,64	14,02	2,38
87,22	71,95	-438,82	-3,65	13,40	2,36
87,22	71,95	-438,71	-3,79	13,40	2,36
87,02	71,92	-446,37	-4,72	12,55	2,32
86,83	71,88	-455,51	-5,13	11,58	2,29
86,64	71,84	-466,04	-5,18	10,56	2,26
86,45	71,80	-477,91	-5,05	9,56	2,23
86,45	71,80	-477,81	-5,21	9,56	2,23
86,26	71,74	-490,82	-5,36	8,52	2,20
86,07	71,68	-504,82	-5,50	7,45	2,18
85,89	71,62	-519,81	-5,59	6,36	2,16
85,70	71,54	-535,78	-5,59	5,27	2,14
85,70	71,54	-535,66	-5,61	5,27	2,14
85,52	71,47	-552,42	-5,53	4,17	2,12
85,35	71,38	-569,72	-5,41	3,10	2,11
85,17	71,29	-587,57	-5,24	2,05	2,10
85,00	71,20	-605,98	-5,01	1,04	2,09
85,00	71,20	-605,85	-5,01	1,04	2,09
84,83	71,10	-624,59	-4,75	0,08	2,09
84,67	70,99	-643,43	-4,46	-0,82	2,20
84,51	70,88	-662,41	-4,16	-1,67	2,32
84,35	70,76	-681,52	-3,87	-2,45	2,44
84,35	70,76	-681,41	-3,84	-2,45	2,43
84,19	70,64	-700,46	-3,56	-3,18	2,55
84,04	70,51	-719,26	-3,24	-3,85	2,65
83,90	70,38	-737,84	-2,93	-4,45	2,76
83,76	70,24	-756,22	-2,68	-5,00	2,85
83,76	70,24	-756,12	-2,62	-5,00	2,85
83,62	70,10	-774,11	-2,39	-5,50	2,95
83,49	69,96	-791,58	-2,11	-5,94	3,03
83,36	69,81	-808,56	-1,86	-6,33	3,12
83,24	69,65	-825,06	-1,68	-6,67	3,19
83,24	69,65	-824,98	-1,61	-6,67	3,19
83,12	69,49	-840,85	-1,46	-6,98	3,27
83,01	69,33	-856,01	-1,26	-7,24	3,34
82,90	69,17	-870,46	-1,07	-7,47	3,40

82,80	69,00	-884,24	-0,99	-7,67	3,46
82,80	69,00	-884,17	-0,90	-7,67	3,46
82,71	68,83	-897,15	-0,83	-7,84	3,51
82,62	68,65	-909,27	-0,69	-7,99	3,56
82,53	68,48	-920,53	-0,56	-8,11	3,61
82,46	68,30	-930,96	-0,55	-8,22	3,65
82,46	68,30	-930,91	-0,44	-8,22	3,65
82,38	68,11	-940,42	-0,43	-8,31	3,69
82,32	67,93	-948,96	-0,32	-8,38	3,72
82,26	67,74	-956,54	-0,22	-8,43	3,75
82,20	67,55	-963,18	-0,23	-8,47	3,78
82,20	67,55	-963,14	-0,12	-8,47	3,78
82,16	67,36	-968,77	-0,12	-8,50	3,80
82,12	67,17	-973,35	-0,02	-8,51	3,81
82,08	66,98	-976,91	0,08	-8,51	3,82
82,05	66,78	-979,44	0,06	-8,49	3,83
82,05	66,78	-979,43	0,18	-8,49	3,83
82,03	66,59	-980,89	0,19	-8,46	3,83
82,01	66,39	-981,30	0,30	-8,41	3,83
82,00	66,20	-980,64	0,41	-8,34	3,83
82,00	66,00	-978,93	0,42	-8,26	3,81

Tabela AI.2: Esforços Atuantes na Seção 1 do Suporte Túnel

X (m)	Y (m)	N (KN/m)	V (KN/m)	M (KNm/m)	$\sigma$ (Mpa)
88,00	63,57	-394,40	-0,73	88,70	7,23
87,83	63,57	-394,75	-2,06	88,47	7,21
87,66	63,56	-395,58	-3,38	88,01	7,19
87,50	63,55	-396,90	-4,67	87,33	7,15
87,33	63,53	-398,71	-5,94	86,44	7,09
87,33	63,53	-398,72	-5,95	86,44	7,09
87,16	63,51	-401,01	-7,18	85,33	7,03
86,99	63,49	-403,81	-8,38	84,02	6,95
86,83	63,45	-407,10	-9,55	82,51	6,86
86,66	63,42	-410,89	-10,65	80,81	6,76
86,66	63,42	-410,89	-10,71	80,81	6,76
86,50	63,38	-415,27	-11,62	78,94	6,65
86,34	63,34	-420,21	-12,57	76,90	6,53
86,18	63,29	-425,71	-13,57	74,70	6,40
86,02	63,23	-431,76	-14,60	72,33	6,26
86,02	63,23	-431,69	-14,60	72,33	6,26
85,86	63,18	-438,15	-15,64	69,79	6,11
85,70	63,11	-444,96	-16,87	67,06	5,95
85,55	63,05	-452,11	-18,19	64,11	5,78
85,40	62,98	-459,62	-19,54	60,93	5,59
85,40	62,98	-459,57	-19,57	60,93	5,59
85,25	62,90	-467,28	-21,06	57,52	5,39
85,10	62,82	-475,11	-22,62	53,84	5,17
84,95	62,74	-483,08	-24,24	49,90	4,94
84,81	62,65	-491,19	-25,90	45,68	4,68
84,81	62,65	-491,23	-25,86	45,68	4,68
84,67	62,56	-499,13	-27,54	41,18	4,41
84,53	62,46	-506,85	-29,12	36,41	4,12
84,39	62,36	-514,43	-30,60	31,39	3,81
84,26	62,26	-521,92	-31,96	26,12	3,48
84,26	62,26	-522,00	-31,88	26,12	3,48
84,13	62,15	-529,83	-33,10	20,65	3,14
84,00	62,04	-537,78	-34,04	15,00	2,79
83,88	61,93	-545,87	-34,67	9,21	2,43
83,76	61,81	-554,08	-34,95	3,35	2,07
83,76	61,81	-554,13	-34,98	3,35	2,07
83,64	61,69	-562,99	-34,42	-2,49	2,04
83,53	61,57	-572,00	-33,89	-8,24	2,46
83,42	61,44	-581,12	-33,40	-13,90	2,86
83,31	61,31	-590,36	-32,96	-19,49	3,27
83,31	61,31	-590,37	-32,99	-19,49	3,27

83,21	61,18	-599,40	-32,46	-24,99	3,66
83,11	61,04	-608,43	-31,92	-30,41	4,06
83,01	60,90	-617,53	-31,13	-35,72	4,44
82,92	60,76	-626,75	-29,87	-40,87	4,81
82,92	60,76	-626,65	-30,04	-40,87	4,81
82,83	60,62	-635,63	-29,01	-45,83	5,17
82,75	60,47	-644,17	-28,00	-50,63	5,52
82,67	60,32	-652,26	-27,04	-55,26	5,86
82,59	60,17	-659,92	-26,11	-59,73	6,18
82,59	60,17	-660,00	-26,04	-59,73	6,18
82,52	60,02	-667,56	-25,04	-64,04	6,49
82,46	59,87	-674,77	-23,96	-68,16	6,79
82,39	59,71	-681,62	-22,83	-72,10	7,08
82,34	59,55	-688,12	-21,69	-75,84	7,35
82,34	59,55	-688,10	-21,68	-75,84	7,35
82,28	59,39	-694,18	-20,53	-79,39	7,61
82,23	59,23	-699,82	-19,39	-82,75	7,85
82,19	59,07	-705,04	-18,22	-85,92	8,08
82,15	58,91	-709,87	-16,97	-88,88	8,29
82,15	58,91	-709,96	-16,75	-88,88	8,29
82,12	58,74	-714,80	-15,24	-91,57	8,49
82,08	58,58	-719,04	-13,78	-94,01	8,66
82,06	58,41	-722,69	-12,44	-96,22	8,82
82,04	58,24	-725,77	-11,31	-98,21	8,97
82,04	58,24	-725,84	-11,23	-98,21	8,97
82,02	58,07	-728,55	-9,87	-99,99	9,09
82,01	57,91	-730,79	-8,43	-101,53	9,20
82,00	57,74	-732,57	-6,90	-102,82	9,30
82,00	57,57	-733,88	-5,26	-103,85	9,37
82,00	57,57	-733,89	-5,18	-103,85	9,37
82,00	57,40	-734,80	-2,74	-104,51	9,42
82,01	57,23	-735,24	-0,31	-104,77	9,44
82,02	57,07	-735,21	2,12	-104,62	9,43
82,04	56,90	-734,73	4,51	-104,06	9,39
82,04	56,90	-734,74	4,50	-104,06	9,39
82,06	56,73	-733,80	6,88	-103,10	9,32
82,08	56,56	-732,42	9,24	-101,74	9,22
82,12	56,40	-730,63	11,55	-99,99	9,10
82,15	56,23	-728,42	13,78	-97,86	8,95
82,15	56,23	-728,42	13,79	-97,86	8,95
82,19	56,07	-725,80	15,96	-95,36	8,78
82,23	55,91	-722,79	18,04	-92,49	8,58
82,28	55,75	-719,40	20,03	-89,29	8,35
82,34	55,59	-715,64	21,91	-85,76	8,10
82,34	55,59	-715,64	21,94	-85,76	8,10



82,39	55,43	-711,53	23,75	-81,91	7,83
82,46	55,27	-707,07	25,48	-77,77	7,54
82,52	55,12	-702,27	27,11	-73,34	7,23
82,59	54,97	-697,14	28,63	-68,65	6,90
82,59	54,97	-697,16	28,65	-68,65	6,90
82,67	54,82	-691,73	30,06	-63,71	6,55
82,75	54,67	-686,04	31,39	-58,54	6,19
82,83	54,52	-680,12	32,60	-53,15	5,81
82,92	54,38	-673,98	33,67	-47,57	5,42
82,92	54,38	-673,99	33,69	-47,57	5,42
83,01	54,24	-667,67	34,62	-41,82	5,01
83,11	54,10	-661,17	35,43	-35,92	4,60
83,21	53,96	-654,52	36,12	-29,90	4,18
83,31	53,83	-647,73	36,67	-23,77	3,74
83,31	53,83	-647,74	36,68	-23,77	3,74
83,42	53,70	-640,84	37,10	-17,56	3,31
83,53	53,57	-633,86	37,40	-11,29	2,87
83,64	53,45	-626,84	37,56	-4,98	2,42
83,76	53,33	-619,77	37,59	1,34	2,16
83,76	53,33	-619,79	37,60	1,34	2,16
83,88	53,21	-612,72	37,49	7,66	2,55
84,00	53,10	-605,69	37,25	13,95	2,95
84,13	52,99	-598,70	36,89	20,19	3,34
84,26	52,88	-591,78	36,39	26,36	3,73
84,26	52,88	-591,80	36,39	26,36	3,73
84,39	52,78	-584,97	35,76	32,44	4,11
84,53	52,68	-578,29	35,01	38,39	4,49
84,67	52,58	-571,75	34,14	44,21	4,85
84,81	52,49	-565,37	33,15	49,88	5,21
84,81	52,49	-565,39	33,16	49,88	5,21
84,95	52,40	-559,20	32,05	55,37	5,56
85,10	52,32	-553,25	30,83	60,66	5,89
85,25	52,24	-547,53	29,51	65,74	6,21
85,40	52,16	-542,06	28,09	70,59	6,51
85,40	52,16	-542,07	28,10	70,59	6,51
85,55	52,09	-536,87	26,57	75,19	6,80
85,70	52,03	-531,99	24,96	79,53	7,08
85,86	51,96	-527,41	23,27	83,59	7,33
86,02	51,91	-523,16	21,50	87,36	7,57
86,02	51,91	-523,17	21,51	87,36	7,57
86,18	51,85	-519,26	19,66	90,82	7,79
86,34	51,80	-515,72	17,76	93,97	7,98
86,50	51,76	-512,55	15,79	96,79	8,16
86,66	51,72	-509,76	13,78	99,28	8,32
86,66	51,72	-509,76	13,78	99,28	8,32

86,83	51,69	-507,37	11,71	101,43	8,45
86,99	51,65	-505,38	9,62	103,22	8,57
87,16	51,63	-503,79	7,49	104,66	8,66
87,33	51,61	-502,61	5,34	105,74	8,72
87,33	51,61	-502,62	5,34	105,74	8,72
87,50	51,59	-501,86	3,18	106,46	8,77
87,66	51,58	-501,53	1,00	106,81	8,79
87,83	51,57	-501,61	-1,17	106,80	8,79
88,00	51,57	-502,12	-3,33	106,42	8,77
88,00	51,57	-502,12	-3,33	106,42	8,77
88,17	51,57	-503,05	-5,47	105,68	8,72
88,34	51,58	-504,40	-7,60	104,58	8,65
88,50	51,59	-506,15	-9,69	103,12	8,56
88,67	51,61	-508,31	-11,74	101,32	8,45
88,67	51,61	-508,31	-11,74	101,32	8,45
88,84	51,63	-510,87	-13,75	99,17	8,31
89,01	51,65	-513,81	-15,70	96,69	8,16
89,17	51,69	-517,13	-17,60	93,89	7,98
89,34	51,72	-520,82	-19,43	90,77	7,79
89,34	51,72	-520,81	-19,43	90,77	7,79
89,50	51,76	-524,86	-21,19	87,36	7,57
89,66	51,80	-529,24	-22,86	83,65	7,34
89,82	51,85	-533,93	-24,45	79,67	7,09
89,98	51,91	-538,94	-25,96	75,42	6,82
89,98	51,91	-538,93	-25,96	75,42	6,82
90,14	51,96	-544,23	-27,36	70,93	6,54
90,30	52,03	-549,79	-28,67	66,22	6,25
90,45	52,09	-555,60	-29,87	61,29	5,94
90,60	52,16	-561,65	-30,97	56,17	5,62
90,60	52,16	-561,64	-30,96	56,17	5,62
90,75	52,24	-567,89	-31,94	50,87	5,28
90,90	52,32	-574,33	-32,80	45,42	4,94
91,05	52,40	-580,94	-33,53	39,84	4,59
91,19	52,49	-587,71	-34,15	34,14	4,24
91,19	52,49	-587,68	-34,11	34,14	4,24
91,33	52,58	-594,67	-34,61	28,36	3,87
91,47	52,68	-601,79	-34,96	22,50	3,51
91,61	52,78	-608,99	-35,23	16,60	3,14
91,74	52,88	-616,24	-35,48	10,65	2,76
91,74	52,88	-616,21	-35,53	10,65	2,76
91,87	52,99	-623,14	-35,66	4,66	2,39
92,00	53,10	-629,97	-35,75	-1,36	2,19
92,12	53,21	-636,69	-35,63	-7,36	2,61
92,24	53,33	-643,29	-35,12	-13,33	3,03
92,24	53,33	-643,31	-35,11	-13,33	3,03

92,36	53,45	-650,09	-34,60	-19,19	3,45
92,47	53,57	-656,78	-33,97	-24,97	3,85
92,58	53,70	-663,40	-33,22	-30,62	4,25
92,69	53,83	-669,91	-32,36	-36,14	4,64
92,69	53,83	-669,90	-32,34	-36,14	4,64
92,79	53,96	-676,25	-31,39	-41,51	5,02
92,89	54,10	-682,37	-30,36	-46,70	5,39
92,99	54,24	-688,26	-29,25	-51,72	5,74
93,08	54,38	-693,92	-28,07	-56,55	6,08
93,08	54,38	-693,91	-28,06	-56,55	6,08
93,17	54,52	-699,31	-26,79	-61,16	6,41
93,25	54,67	-704,44	-25,42	-65,56	6,72
93,33	54,82	-709,28	-23,98	-69,72	7,01
93,41	54,97	-713,84	-22,47	-73,62	7,29
93,41	54,97	-713,83	-22,48	-73,62	7,29
93,48	55,12	-718,07	-20,90	-77,28	7,55
93,54	55,27	-721,99	-19,24	-80,65	7,78
93,61	55,43	-725,58	-17,53	-83,75	8,00
93,66	55,59	-728,85	-15,79	-86,55	8,20
93,66	55,59	-728,84	-15,77	-86,55	8,20
93,72	55,75	-731,73	-14,00	-89,06	8,38
93,77	55,91	-734,25	-12,18	-91,26	8,53
93,81	56,07	-736,40	-10,34	-93,16	8,67
93,85	56,23	-738,16	-8,50	-94,74	8,78
93,85	56,23	-738,16	-8,44	-94,74	8,78
93,88	56,40	-739,61	-6,51	-96,00	8,87
93,92	56,56	-740,67	-4,55	-96,93	8,93
93,94	56,73	-741,34	-2,59	-97,53	8,97
93,96	56,90	-741,60	-0,65	-97,81	8,99
93,96	56,90	-741,59	-0,65	-97,81	8,99
93,98	57,07	-741,50	1,37	-97,75	8,99
93,99	57,23	-741,01	3,41	-97,34	8,96
94,00	57,40	-740,13	5,44	-96,60	8,91
94,00	57,57	-738,85	7,41	-95,52	8,83
94,00	57,57	-738,84	7,43	-95,52	8,83
94,00	57,74	-737,14	8,38	-94,18	8,74
93,99	57,91	-735,04	9,32	-92,69	8,63
93,98	58,07	-732,54	10,28	-91,05	8,51
93,96	58,24	-729,63	11,29	-89,23	8,38
93,96	58,24	-729,77	11,14	-89,23	8,38
93,94	58,41	-726,37	12,31	-87,26	8,24
93,92	58,58	-722,64	13,49	-85,09	8,08
93,88	58,74	-718,57	14,63	-82,72	7,91
93,85	58,91	-714,18	15,69	-80,17	7,73
93,85	58,91	-714,18	15,74	-80,17	7,73

93,81	59,07	-709,39	16,73	-77,44	7,53
93,77	59,23	-704,19	17,84	-74,53	7,32
93,72	59,39	-698,55	19,03	-71,43	7,09
93,66	59,55	-692,48	20,24	-68,12	6,85
93,66	59,55	-692,52	20,23	-68,12	6,85
93,61	59,71	-686,05	21,50	-64,61	6,59
93,54	59,87	-679,21	22,78	-60,89	6,32
93,48	60,02	-671,99	24,02	-56,95	6,04
93,41	60,17	-664,38	25,15	-52,81	5,74
93,41	60,17	-664,38	25,21	-52,81	5,74
93,33	60,32	-656,50	26,27	-48,47	5,42
93,25	60,47	-648,22	27,32	-43,96	5,09
93,17	60,62	-639,51	28,36	-39,28	4,75
93,08	60,76	-630,36	29,38	-34,42	4,40
93,08	60,76	-630,32	29,46	-34,42	4,40
92,99	60,90	-621,25	30,28	-29,39	4,03
92,89	61,04	-612,06	30,88	-24,24	3,66
92,79	61,18	-602,73	31,28	-19,01	3,28
92,69	61,31	-593,25	31,51	-13,72	2,89
92,69	61,31	-593,28	31,52	-13,72	2,89
92,58	61,44	-583,67	31,62	-8,40	2,51
92,47	61,57	-574,04	31,58	-3,08	2,12
92,36	61,69	-564,41	31,42	2,22	2,03
92,24	61,81	-554,77	31,12	7,48	2,35
92,24	61,81	-554,80	31,13	7,48	2,35
92,12	61,93	-545,28	30,73	12,69	2,66
92,00	62,04	-535,86	30,19	17,82	2,97
91,87	62,15	-526,55	29,53	22,85	3,28
91,74	62,26	-517,34	28,77	27,75	3,57
91,74	62,26	-517,38	28,78	27,75	3,57
91,61	62,36	-508,32	27,95	32,53	3,86
91,47	62,46	-499,49	27,07	37,16	4,14
91,33	62,56	-490,89	26,13	41,64	4,41
91,19	62,65	-482,53	25,13	45,95	4,67
91,19	62,65	-482,55	25,13	45,95	4,67
91,05	62,74	-474,48	24,07	50,09	4,92
90,90	62,82	-466,72	22,97	54,05	5,16
90,75	62,90	-459,27	21,82	57,82	5,39
90,60	62,98	-452,13	20,64	61,39	5,60
90,60	62,98	-452,15	20,64	61,39	5,60
90,45	63,05	-445,37	19,42	64,77	5,80
90,30	63,11	-438,96	18,17	67,93	5,99
90,14	63,18	-432,94	16,90	70,88	6,17
89,98	63,23	-427,30	15,60	73,62	6,33
89,98	63,23	-427,31	15,60	73,62	6,33

89,82	63,29	-422,08	14,28	76,13	6,48
89,66	63,34	-417,28	12,94	78,42	6,62
89,50	63,38	-412,92	11,59	80,49	6,74
89,34	63,42	-408,98	10,24	82,32	6,85
89,34	63,42	-408,99	10,23	82,32	6,85
89,17	63,45	-405,51	8,86	83,93	6,95
89,01	63,49	-402,50	7,49	85,31	7,03
88,84	63,51	-399,96	6,11	86,45	7,10
88,67	63,53	-397,88	4,73	87,36	7,15
88,67	63,53	-397,88	4,73	87,36	7,15
88,50	63,55	-396,28	3,35	88,04	7,19
88,34	63,56	-395,17	1,98	88,49	7,22
88,17	63,57	-394,54	0,62	88,71	7,23
88,00	63,57	-394,40	-0,72	88,70	7,23

## APÊNDICE II

A seguir estão as bacias de recalques geradas a 0m, 5m, 10m e 20m de profundidade para a Seção 1 da simulação do Túnel Marcello Alencar com escavação simultânea das galerias pelo método convencional – NATM:

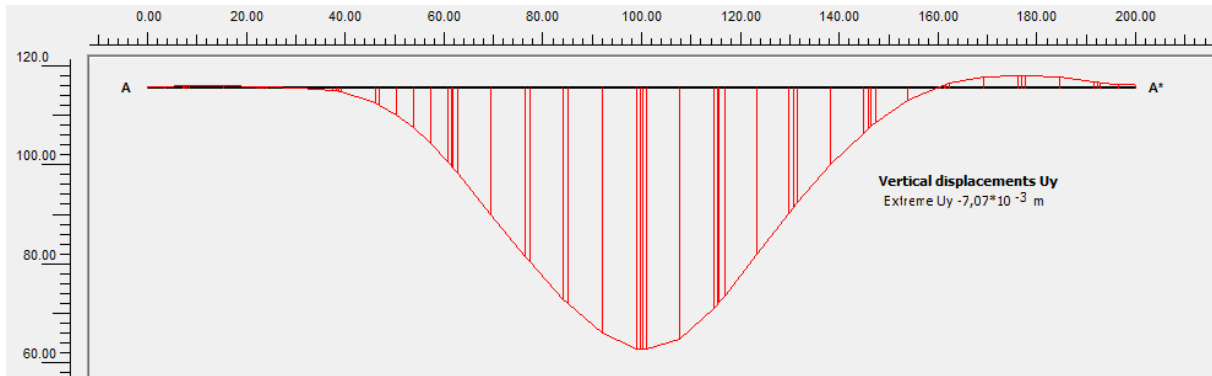


Figura AII.1: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea

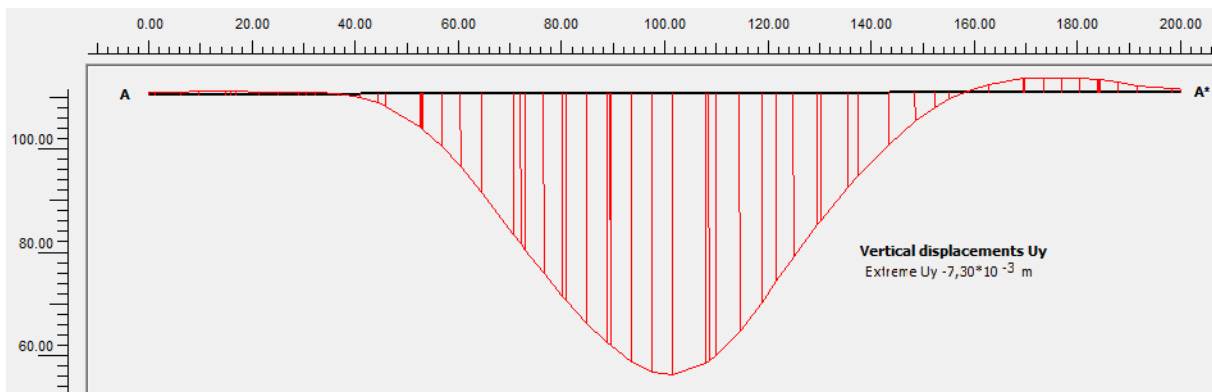


Figura AII.2: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea



Figura AII.3: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea

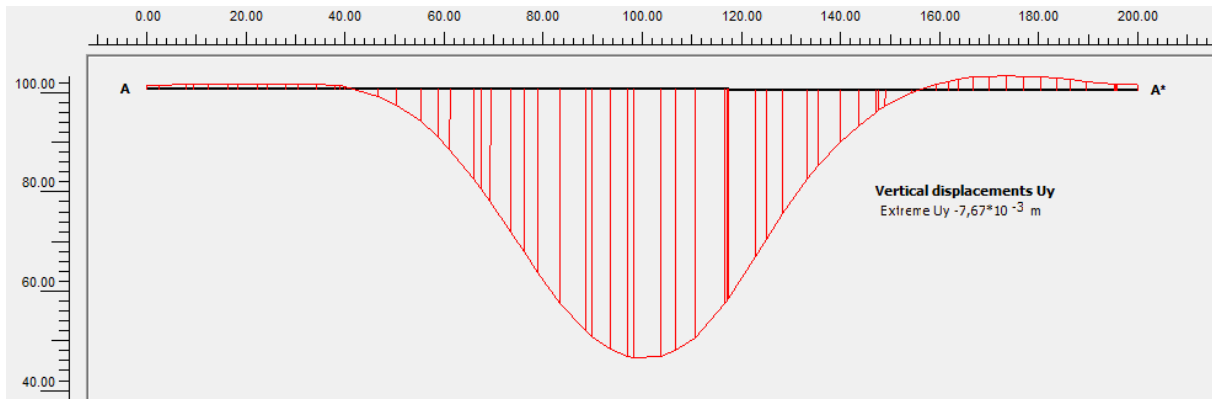


Figura AII.4: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea

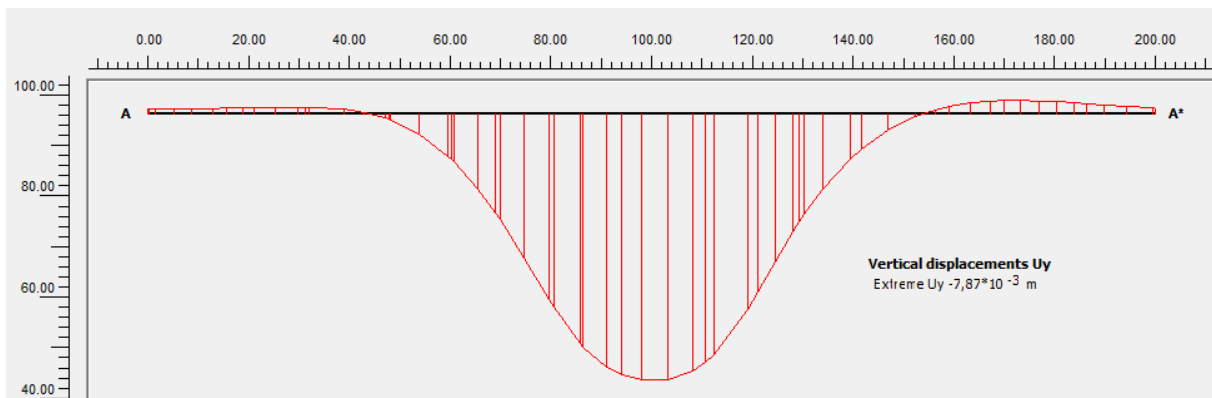


Figura AII.5: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea

A seguir estão as bacias de recalques geradas a 0m, 5m, 10m, 15m e 20m de profundidade para a Seção 2 da simulação do Túnel Marcello Alencar com escavação simultânea das galerias pelo método convencional – NATM:

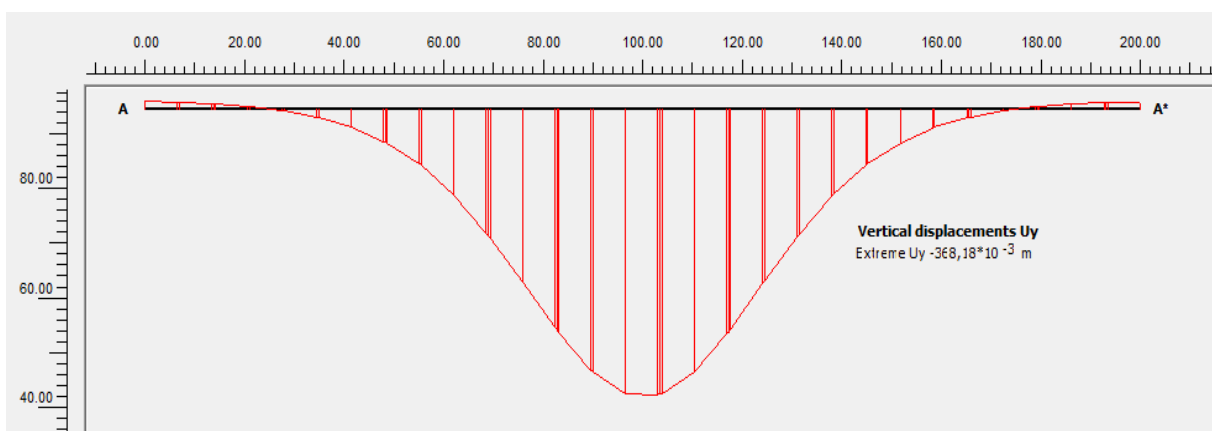


Figura AII.6: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação simultânea



Figura AII.7: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea

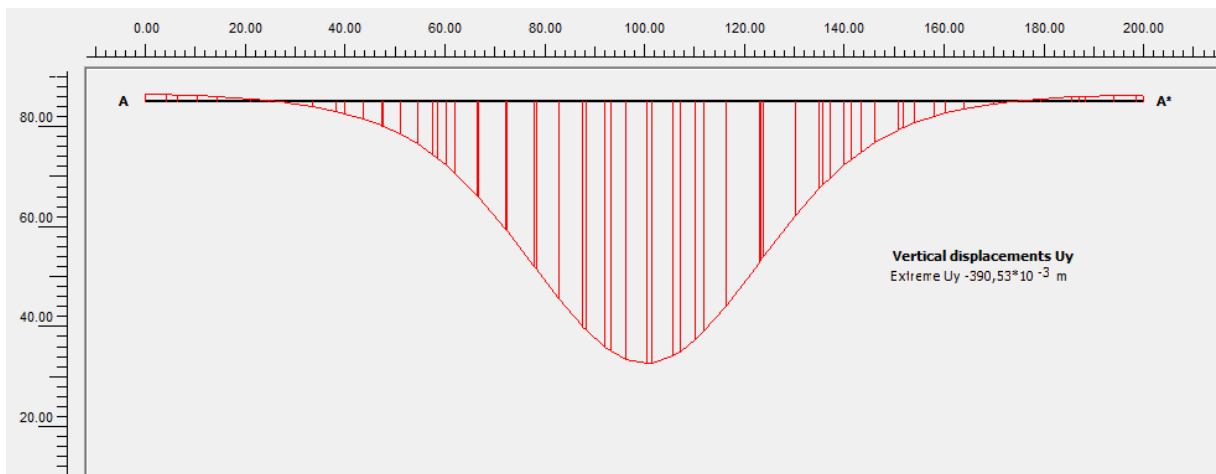


Figura AII.8: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea



Figura AII.9: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea



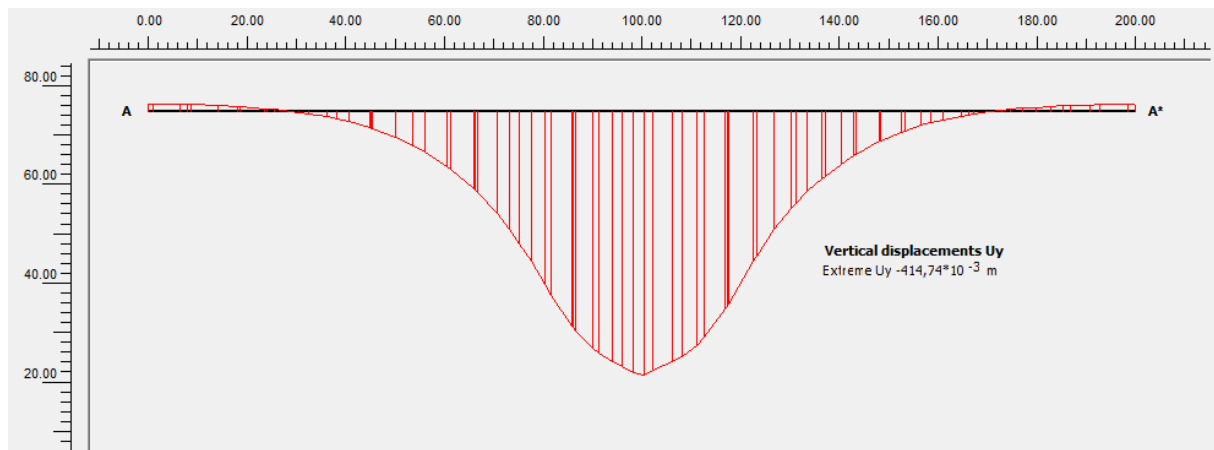


Figura AII.10: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação simultânea

## APÊNDICE III

Nas imagens a seguir estão as bacias de recalques geradas a 0m, 5m, 10m, 15m e 20m de profundidade para a Seção 1 da simulação do Túnel Marcello Alencar com escavação em etapas das galerias, sendo a galeria da esquerda a primeira a ser escavada e inserida o suporte pelo método convencional – NATM:

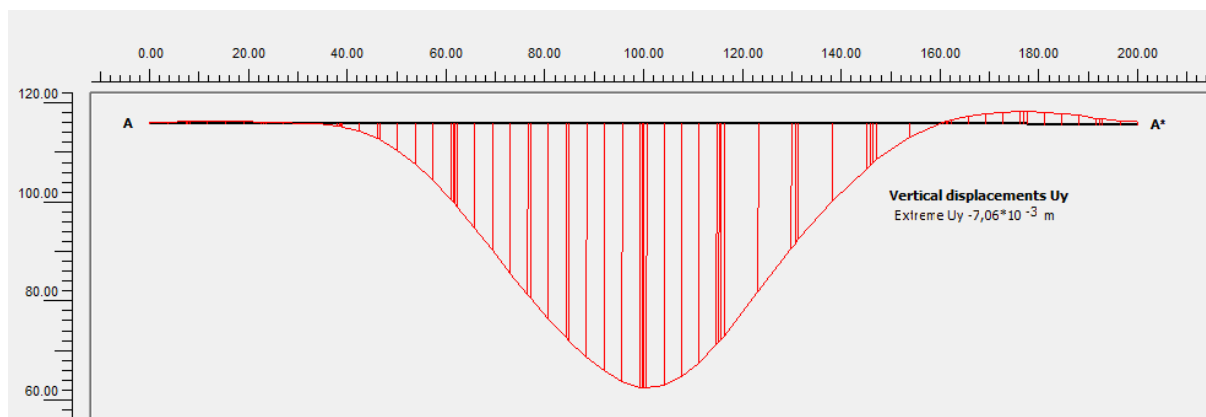


Figura AIII.1: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas

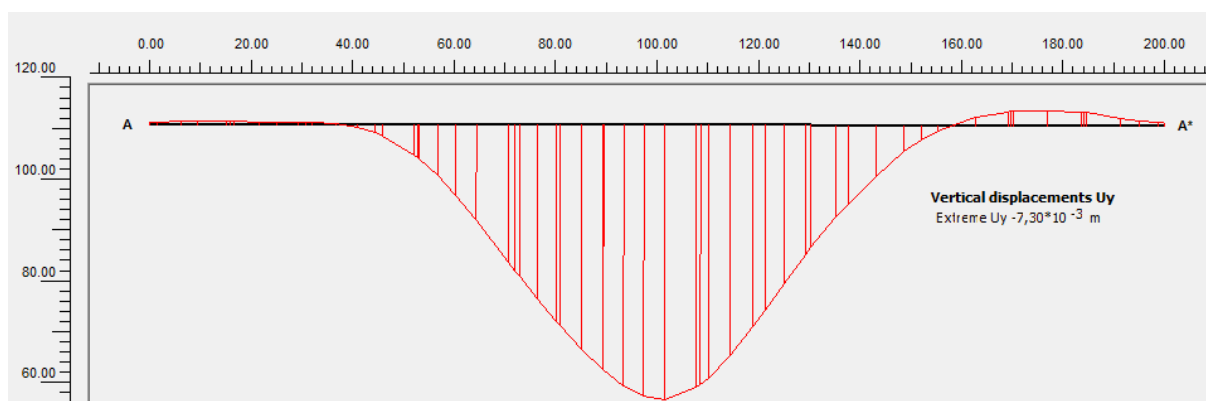


Figura AIII.2: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas

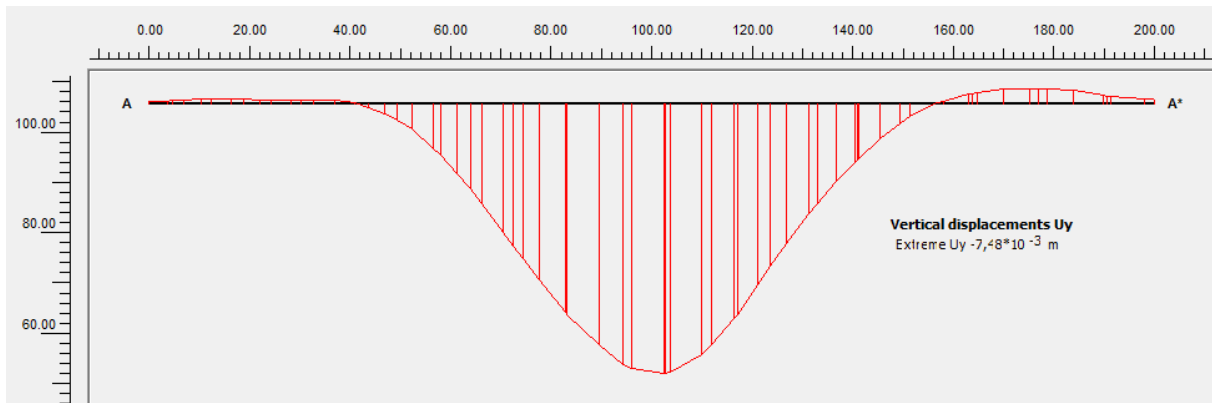


Figura AIII.3: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas

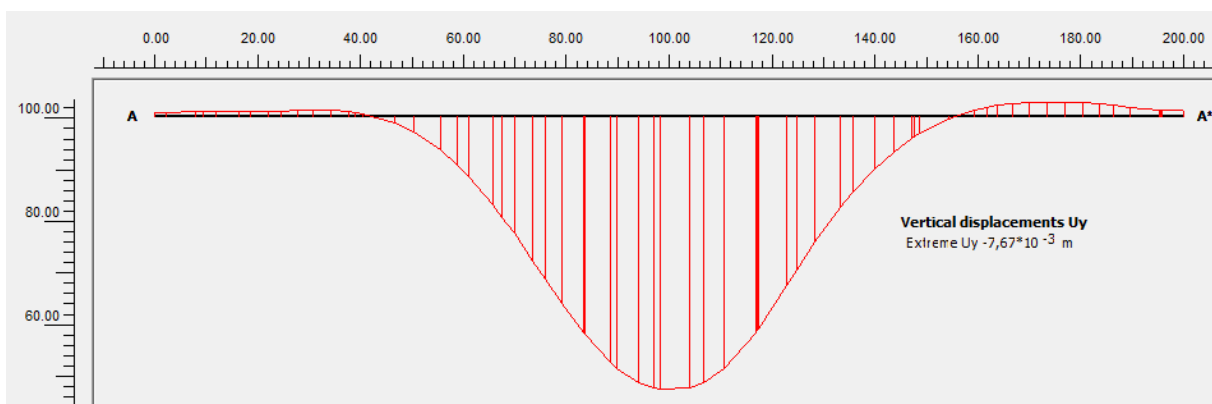


Figura AII.4: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas



Figura AIII.5: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 1 do túnel com escavação em etapas

Nas imagens a seguir estão as bacias de recalques geradas a 0m, 5m, 10m, 15m e 20m de profundidade para a Seção 2 da simulação do Túnel Marcello Alencar com escavação em etapas das galerias, sendo a galeria da esquerda a primeira a ser escavada e inserido o suporte pelo método convencional – NATM:



Figura AIII.6: Bacia de recalques a 0 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas

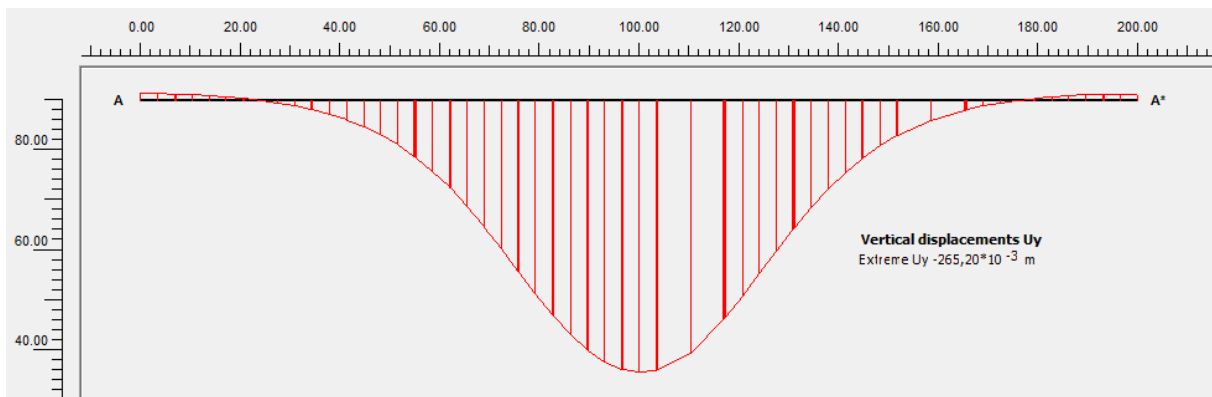


Figura AIII.7: Bacia de recalques a 5 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas

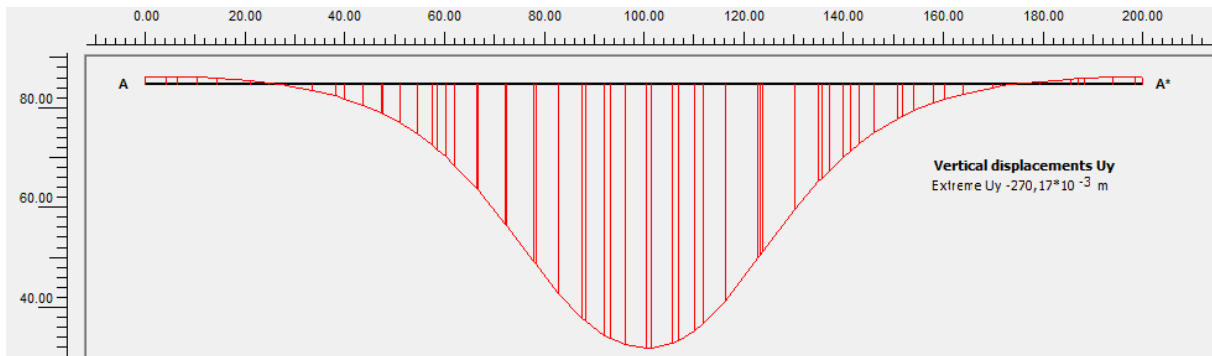


Figura AIII.8: Bacia de recalques a 10 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas

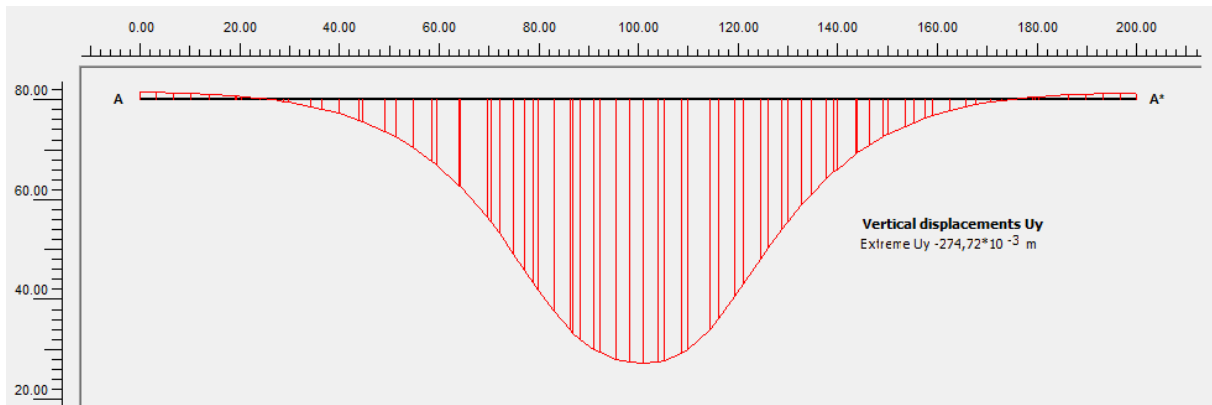


Figura AIII.9: Bacia de recalques a 15 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas

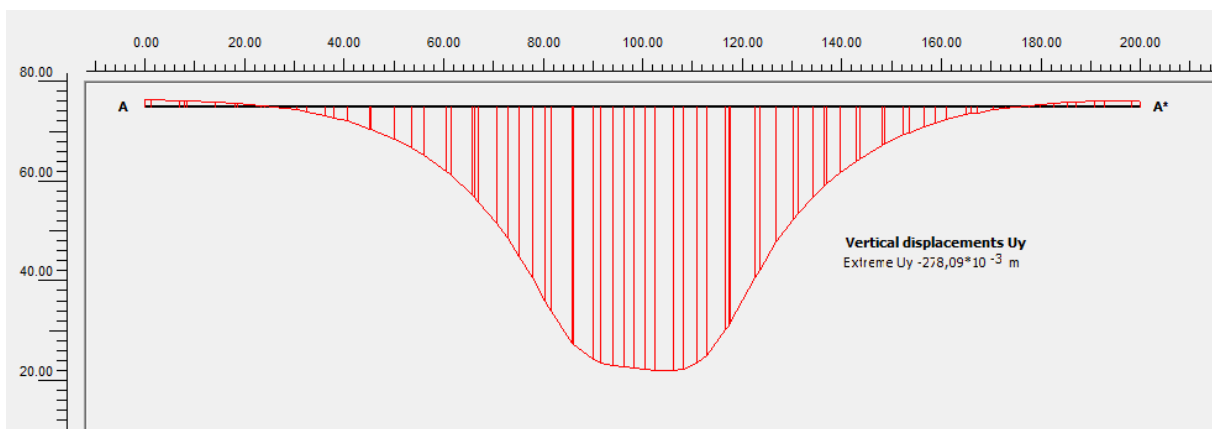


Figura AIII.10: Bacia de recalques a 20 m de profundidade na seção 2 do túnel com escavação em etapas