



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA**



ESCOLA DE MINAS

Jhonatan Pereira Dornelas Borges

**LINHA 3 DO METRÔ DE BELO HORIZONTE: Correlação
de parâmetros geotécnicos para a modelagem numérica de
túneis urbanos**

Ouro Preto

2026

Jhonatan Pereira Dornelas Borges

Linha 3 do metrô de Belo Horizonte: Correlação de
parâmetros geotécnicos para a modelagem numérica de túneis
urbanos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbanista.

Orientador: Dr. Pedro Manuel A. Hernández

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B732I Borges, Jhonatan Pereira Dornelas.

Linha 3 do metrô de Belo Horizonte [manuscrito]: correlação de parâmetros geotécnicos para a modelagem numérica de túneis urbanos. / Jhonatan Pereira Dornelas Borges. - 2026.
59 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Mobilidade Urbana. 2. Transporte urbano. 3. Geotecnia. 4. Metrô. 5. Túneis. I. Hernández, Pedro Manuel Alameda. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza -CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jhonatan Pereira Dornelas Borges

Linha 3 do metrô de Belo Horizonte: Correlação de parâmetros geotécnicos para a modelagem numérica de túneis urbanos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbanista

Aprovada em 12 de Fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. - Pedro Manuel Alameda Hernández - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. - Daniela Antunes Lessa, - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. - Christiano Ottoni Carvalho - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Pedro Manuel Alameda Hernández, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Manuel Alameda Hernandez, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/02/2026, às 12:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1058894** e o código CRC **341D5FF3**.

Não é sobre a vista, mas sim sobre a escalada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Pedro, por acreditar na proposta deste trabalho e por todo o apoio e orientação ao longo do seu desenvolvimento. À UFOP e Escola de Minas, pelo ensino gratuito e de qualidade. À Fundação Gorceix, pelo suporte oferecido. Aos meus familiares e amigos, pelo incentivo constante. E a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de chegar até aqui.

RESUMO

A mobilidade urbana em Belo Horizonte enfrenta desafios históricos, especialmente no transporte metroferroviário, cuja rede é restrita à Linha 1, inaugurada nos anos 1980 e sem grandes ampliações desde então. Diversos projetos de expansão foram propostos, mas não executados, entre eles a Linha 3, que conectaria a Estação Lagoinha à região da Savassi. Este trabalho apresenta a modelagem numérica dos túneis idealizados dessa linha subterrânea, integrando aspectos históricos, urbanísticos, técnicos e ambientais. A proposta dialoga com as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, especialmente o ODS 11, ao buscar promover cidades inclusivas, seguras e sustentáveis. A análise da relevância socioeconômica e ambiental da expansão metroviária, estudo de métodos construtivos de túneis e modelagem numérica para estabilidade geotécnica do traçado estão entre os itens abordados ao longo deste texto. Os resultados apontam que a Linha 3 pode contribuir significativamente para a melhoria da mobilidade, redução de desigualdades e mitigação de impactos ambientais, além de reforçar a integração entre engenharia e planejamento urbano. Além disso, o mais importante nos aspectos técnicos: mostra que é tecnicamente viável.

Palavras-chaves: túnel, metrô, mobilidade urbana, transportes, desenvolvimento urbano.

ABSTRACT

Urban mobility in Belo Horizonte faces historical challenges, especially in rail-based transit, whose network is limited to Line 1, inaugurated in the 1980s, without significant expansions since then. Several expansion projects have been proposed but never implemented, including Line 3, which would connect Lagoinha Station to the Savassi region. This work presents the numerical modeling of the tunnels envisioned for this underground line, integrating historical, urbanistic, technical, and environmental aspects. The proposal aligns with the guidelines of the National Urban Mobility Policy and the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, particularly SDG 11, by seeking to promote inclusive, safe, and sustainable cities. The analysis of the socioeconomic and environmental relevance of subway expansion, the study of tunnel construction methods, and numerical modeling for the geotechnical stability of the route are among the topics addressed throughout this text. The results indicate that Line 3 can significantly contribute to improving mobility, reducing inequalities, and mitigating environmental impacts, while reinforcing the integration between engineering and urban planning. Moreover, most importantly from the technical standpoint: it shows that it is technically feasible.

Keywords: tunnel, metro, urban mobility, transportation, urban development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeto do Metrô de Belo Horizonte e da rede de linhas do trem suburbano.	22
Figura 2 – Manchete com a demanda esperada da linha 3.	24
Figura 3 – Projeto de expansão por fases do Metrô de Belo Horizonte	25
Figura 4 – Destaque na região central do projeto de ampliação do Metrô de Belo Horizonte.	26
Figura 5 – Perfil longitudinal da Linha 3, da estação Lagoinha a estação Savassi pela Rua Pernambuco.	27
Figura 6 – Perfil longitudinal da Linha 3, da estação Lagoinha a estação Savassi pela Avenida João Pinheiro	28
Figura 7 – Esquema da alteração do alinhamento de um túnel em razão das condições geológicas desfavoráveis.	29
Figura 8 – Manchete destacando o fim das sondagens com resultado positivo para a implantação da linha subterrânea	30
Figura 9 – Métodos construtivos por trecho da Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo.	32
Figura 10 – Esquema de construção de túneis pelo método <i>cut-and-cover</i>	33
Figura 11 – Construção de túnel pelo método <i>cut-and-cover</i> , na Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo.	33
Figura 12 – Diversas sequências construtivas de um túnel pelo método NATM.....	34
Figura 13 – Modelo 3D de uma escavação em NATM.....	35
Figura 14 – Seção transversal de uma escavação em NATM	35
Figura 15 - Método <i>shield</i> de escavação semimecanizada	36
Figura 16 - Tuneladora desembocando em um poço de ventilação	37
Figura 17 – Tipologias de seções típicas de túneis de metrô	39
Figura 18 – Aplicação de concreto projetado.....	41

Figura 19 – Seção de túnel com suporte de cambota	42
Figura 20 – Sistema de enfilagens para avanço de escavação.....	43
Figura 21 – Aplicação de Tirantes.....	44
Figura 22 - Discretização de elementos finitos	46
Figura 23 - Croqui dos trechos de modelagem na litologia.....	54
Figura 24 - Local de estudo	55
Figura 25 - Litologia, escavação e malha discretizada em solo residual.....	56
Figura 26 - Estado de tensões Sigma 1 em solo residual.....	57
Figura 27 - Estado de tensões Sigma 3 em solo residual.....	57
Figura 28 - Litologia, escavação e malha discretizada em face mista.....	58
Figura 29 - Estado de tensões Sigma 1 em face mista.....	59
Figura 30 - Estado de tensões Sigma 3 em face mista.....	59
Figura 31 - Vetores de deformação em Sigma 1	60
Figura 32 - Vetores de deformação em Sigma 3	60
Figura 33 - Litologia, escavação e malha discretizada em ganisse	61
Figura 34 - Estado de tensões Sigma 1 em gnaisse	62
Figura 35 - Estado de tensões Sigma 3 em gnaisse	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas de metrô pelo mundo.....	20
Tabela 2 - Sistemas de metrô no Brasil	21
Tabela 3 – Nível d'água por domínio geológico.....	30
Tabela 4 – Parâmetros geotécnicos	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Estrutura do Texto	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Mobilidade urbana, transporte de massa e qualidade de vida	17
2.1.1	Sistemas de metrô pelo mundo	19
2.1.2	Sistemas de metrô no Brasil	20
2.2	Histórico do transporte metroferroviário em Belo Horizonte	21
2.3	Caracterização geológica-geotécnica	28
2.4	Métodos construtivos de túneis de metrô	31
2.4.1	Método <i>Cut-and-Cover</i>	32
2.4.2	Método NATM	34
2.4.3	Método Shield	35
2.4.4	Método TBM	37
2.5	Geometria da escavação: um ou dois túneis?	38
2.5.1	Normativas e definições	38
2.6	Alternativas de suporte	40
2.6.1	Concreto projetado	40
2.6.2	Cambotas	41

2.6.3	Enfilagens.....	42
2.6.4	Tirantes e chumbadores.....	43
2.7	Métodos numéricos.....	44
2.7.1	Elementos Finitos.....	45
3	METODOLOGIA	47
3.1	Dados trabalhados.....	48
3.1.1	Correlações	48
4	RESULTADOS	52
4.1	Modelagem	52
4.1.1	Litologias do tipo A, B e C	53
4.2	Local modelo.....	54
4.2.1	Dimensionamento A: Solo residual	55
4.2.2	Dimensionamento B: Face mista.....	58
4.2.3	Dimensionamento C: Gnaisse.....	61
5	CONCLUSÃO	63
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é um dos grandes desafios das cidades modernas (Cobli, 2024). A capital de Minas Gerais, Belo Horizonte, não é exceção. Apesar de ser a terceira principal centralidade do país, com mais de 2,3 milhões de habitantes (IBGE, 2022), o transporte coletivo na cidade é historicamente limitado (Planmob, 2010), especialmente no que se refere ao transporte metroferroviário, como demonstram os relatórios do Ministério dos Transportes (GEIPOT, 1980) durante a elaboração do estudo do trem suburbano da região metropolitana, que viria a se tornar a única linha ativa atualmente do sistema, a Linha 1. Inaugurada nos anos 1980, esta permanece praticamente inalterada, não cumprindo adequadamente sua função (Planmob, 2010). Diversos projetos de expansão foram idealizados ao longo das últimas décadas e paralisadas/não iniciadas pelos mais diversos motivos, dentre elas a expansão da Linha 1 e a Linha 2, hoje em processo de construção por meio da atual concessionária do sistema na cidade, a MetrôBH (MetrôBH, 2025), e a idealizada Linha 3, objeto de estudo deste trabalho.

A ampliação da malha metroferroviária de Belo Horizonte é um tema relevante, seguindo as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), em especial em seu inciso segundo, em que diz respeito ao desenvolvimento sustentável das cidades, nas dimensões socioeconômicas e ambientais (Brasil, 2012). Dialogando também com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, em especial a ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis (ONU, 2015).

Cidades de todo o mundo demonstram que o metrô é capaz de transformar positivamente a dinâmica urbana, reduzindo congestionamentos e a poluição; atraindo investimentos para áreas estratégicas; e melhorando a qualidade de vida (Vasconcellos, 2001). Nesse contexto, a proposta de implementação da Linha 3, conectando a Estação Lagoinha à região da Savassi, surge como uma solução para suprir demandas de conexões efetivas, de fato trazendo a rede metroferroviária aos pontos de interesse no hipercentro da cidade (Planmob, 2010).

O presente trabalho busca resgatar essa ideia, apresentando uma sequência de modelagens numéricas para o pré-dimensionamento dos túneis para a Linha 3 do Metrô de Belo Horizonte. Além de propor tecnicamente a solução, este texto busca discutir os impactos positivos desse modo para a cidade, relacionando-o aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, como a promoção de cidades inclusivas, seguras e sustentáveis. Ao longo do trabalho, serão abordados aspectos históricos, técnicos e urbanísticos, além de apresentar soluções de engenharia para estabilidade do túnel proposto, tanto em trechos em solo, rocha e em face mista.

1.1 Objetivos

Este trabalho se propõe a realizar a modelagem numérica dos túneis para a idealizada Linha 3 subterrânea de metrô, conectando a Estação Lagoinha à região da Savassi, em Belo Horizonte - MG.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar a evolução histórica do transporte metroferroviário em Belo Horizonte, com ênfase nos projetos relacionados à Linha 3 e suas implicações para o planejamento urbano atual.
- Analisar o papel da expansão metroviária na mobilidade urbana de Belo Horizonte, articulando-a às diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
- Analisar métodos construtivos de túneis metroviários e os principais desafios de obras subterrâneas em contexto urbano, com foco no cenário brasileiro e no caso de Belo Horizonte
- Avaliar a estabilidade e a viabilidade geotécnico-estrutural dos túneis da Linha 3, a partir de modelagem numérica.

1.2 Justificativa

O estudo da Linha 3 do Metrô de Belo Horizonte é relevante sob diversos aspectos. Do ponto de vista social, a idealização de ampliar e levar o sistema de transporte de massa diretamente nos pontos de interesse final da população sem necessidade de troca de modos de transporte, cenário que ocorre atualmente (Planmob, 2010), possibilita a redução de desigualdades, facilitando o acesso de diferentes camadas da população aos centros comerciais, educacionais e culturais da cidade, como o Palácio das Artes e o Circuito da Praça da Liberdade, o maior complexo cultural do país (Fundação Clóvis Salgado, 2025). Além de ser mais democrático por facilitar o acesso a população periférica, melhora a mobilidade urbana e a qualidade de vida de modo geral (Amaral, 2025). Do ponto de vista ambiental, contribui para a redução da emissão de gases poluentes, uma vez que transportes de massa sobre trilhos têm menor impacto ambiental quando comparados ao transporte rodoviário individual, como afirma Vasconcellos (Vasconcellos, 2001).

No contexto da limitação da atual rede metroferroviária em atender diretamente os principais pontos de interesse da cidade, o Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte explicita que o traçado da linha existente não atende à Área Central, principal destino das viagens no período de pico da manhã, conforme registrado em Planmob (2010, p. 18). Essa condição evidencia a necessidade de soluções estruturais que ampliem a cobertura do sistema sobre trilhos, especialmente em áreas de elevada concentração de atividades urbanas.

Analizando o sistema sobre trilhos de Belo Horizonte, constata-se que o traçado da linha existente não atende diretamente a Área Central, principal destino das viagens no período do pico da manhã. Destaca-se que, na situação atual, o trem metropolitano, em função da limitação do número de composições, não tem condições de ampliar significativamente a oferta de lugares. Todavia, com a ampliação da oferta do sistema de trem metropolitano, a linha existente poderá operar como um eficiente corredor troncal, de elevada capacidade, com linhas alimentadoras distribuídas ao longo das estações do sistema, particularmente na Área Central, de modo a minimizar a limitação operacional gerada pela localização da estação em relação ao real destino dos usuários na Área Central. (Planmob, 2010, p.18)

No aspecto urbanístico, a implantação de uma linha de metrô subterrânea é ideal, conforme diretriz do Metrô de São Paulo quando afirma que:

As linhas subterrâneas de metrô são as mais apropriadas para as áreas densamente ocupadas, proporcionando menor impacto à superfície, menor volume de desapropriações, facilidades para o remanejamento de grandes interferências enterradas, reduzidas interrupções do tráfego e preservação do patrimônio histórico. (Metrô São Paulo, 2025, seção métodos construtivos).

Já do ponto de vista técnico e científico, este trabalho contribui ao reunir conceitos de engenharia de túneis, mecânica de solos, mecânica de rochas e planejamento urbano, aplicando-os ao contexto específico de Belo Horizonte, instigando ainda contribuições da academia atribuindo a viabilidade técnica dessa infraestrutura na cidade. Socialmente, o projeto se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, particularmente o ODS 11, ao propor uma solução de transporte limpa, eficiente e econômica (ANPTrilhos, 2018). A relevância deste estudo se manifesta em três dimensões principais: técnica, social e acadêmica. Do ponto de vista técnico, preenche uma lacuna nos estudos de viabilidade para a Linha 3, fornecendo discussões sobre métodos construtivos e desafios geotécnicos. Academicamente, o trabalho contribui para a literatura especializada ao integrar análises urbanísticas com modelagem numérica geotécnicas com poucos recursos de dados, seara pouco explorada.

1.3 Estrutura do Texto

O trabalho se dará em sua maior parte por texto corrido, intercalando figuras, tabelas e outros itens que possa surgir. Ao final, modelos em modelagem numérica serão apresentados como produto deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mobilidade urbana, transporte de massa e qualidade de vida

A mobilidade urbana constitui um dos maiores desafios das cidades contemporâneas, inicialmente sentido nos grandes centros metropolitanos e agora cada vez mais nas cidades médias (Gobli, 2024). Contrariando o conceito de cidades compactas, o crescimento acelerado e desordenado da população urbana se deu no formato de espraiamento horizontal. Essa condição tem resultado em sistemas de transporte coletivo ineficientes, congestionados e dependentes quase exclusivamente dos ônibus, conceito discutido como “imobilidade” por Cervero (2013). Como consequência, é observado aumento dos tempos de deslocamento, maior emissão de poluentes e redução da qualidade de vida da população (Vasconcellos, 2001).

Em Belo Horizonte, como em outras metrópoles brasileiras e mundiais, o transporte por ônibus, um modo de transporte de baixa capacidade, tem sido utilizado como o principal, quando deveria atuar de forma complementar (O Tempo, 2023). O Sistema BRT Move, mesmo se tratando de um sistema de média capacidade (ITDP Brasil, 2019), com suas linhas trocais e alimentadoras ilustra o que o sistema ideal deveria ser: ônibus, transporte de baixa capacidade, atuando como complemento a um sistema de transporte de massa de maior capacidade. Apesar da boa aplicação desses conceitos na concepção do sistema BRT Move, foi adotado um sistema de transporte de média capacidade para suprir uma demanda de alta (Planmob, 2010). Os ônibus, por sua natureza, possuem capacidade reduzida e menor eficiência quando se trata de alta demanda, o que leva à sobrecarga estrutural do sistema de mobilidade e à precarização do serviço (Andrade, 2023). Esse cenário é reflexo direto da ausência de políticas públicas consistentes de incentivo ao transporte de massa sobre trilhos, como metrô e trens urbanos, conforme Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos – ANPTrilhos (ANPTrilhos, 2023).

Do ponto de vista técnico-operacional, a distinção entre sistemas de média e alta capacidade é estabelecida principalmente pela capacidade de transporte medida em passageiros por hora por sentido, pelo papel estrutural na rede urbana e pelos limites operacionais de cada tecnologia. Sistemas de média capacidade, como corredores de BRT, operam tipicamente entre 8.000 e 25.000 passageiros por hora por direção

(pphpd), sendo indicados como eixos estruturantes secundários e sistemas de alimentação da rede principal (ITDP, 2019), e os sistemas de baixa capacidade, como ônibus convencionais, atuam abaixo dessa capacidade. Já sistemas de alta capacidade, como metrô e trens urbanos, ultrapassam 30.000 pphpd e podem exceder 60.000 pphpd em redes consolidadas, assumindo função troncal primária na mobilidade metropolitana (Union Internationale des Transports Publics, 2018). A diferença entre os modos não é apenas quantitativa, mas estrutural: o BRT depende de operação rodoviária e apresenta limitações físicas de frota e intervalos operacionais, enquanto o metrô opera em via integralmente segregada, garantindo maior regularidade, confiabilidade, velocidade comercial e escalabilidade de capacidade. Dessa forma, a literatura técnica aponta que sistemas BRT são adequados como complemento distributivo da demanda, enquanto o metrô constitui o núcleo estruturador de sistemas de transporte de massa em cidades de grande porte (Vasconcellos, 2001; ITDP, 2019).

Pesquisa realizada pela ANPTrilhos reforça essa percepção, apontando que a capital mineira possui uma rede metroferroviária insuficiente para atender à demanda atual e projetada para os próximos anos (ANPTrilhos, 2018). A previsão de conclusão da Linha 2, que ligará a regional Barreiro ao sistema apenas para 2028 conforme cronograma da concessionária (MetrôBH, 2025), demonstra a lentidão nos avanços e a falta de priorização do transporte sobre trilhos nos investimentos em mobilidade urbana (ANPTrilhos, 2023). Nesse sentido, torna-se evidente a necessidade de resgatar projetos paralisados ou abandonados, como a Linha 3 do Metrô de Belo Horizonte, e de pensar em soluções que superem o modelo rodoviarista dependente exclusivamente de ônibus que, pelas condições de superlotação, demora e ineficiência, contribui para a escolha pelo transporte individual, deixando a cidade em estado de imobilidade (Cervero, 2013), onde nos últimos anos a população da cidade tem utilizado cada vez menos o transporte coletivo em opção ao transporte individual, tanto por carros e por motocicletas, com quedas significativas no número de usuários do transporte público (O Tempo, 2025).

Amaral (2025) demonstra que os sistemas de transporte de massa, quando devidamente implementados, contribuem não apenas para a mobilidade, mas também

para a melhoria da qualidade de vida nas cidades. Isso ocorre porque o transporte metroferroviário promove maior acessibilidade, reduz desigualdades socioespaciais e incentiva padrões de urbanização mais sustentáveis, alinhados às diretrizes da Agenda 2030 da ONU (ONU, 2015). A experiência internacional reforça esse argumento: cidades que investiram em metrô e trens urbanos conseguiram transformar significativamente seus padrões de deslocamento e reduzir problemas de poluição e congestionamento, além de, principalmente, trazer acessibilidade às populações mais vulneráveis nas periferias (Hemasree e Subramanian, 2022).

Dessa forma, a discussão sobre mobilidade urbana não pode se restringir à ampliação da frota de ônibus ou à criação de corredores exclusivos, como tem sido tratado em Belo Horizonte nas últimas décadas, mas sim incluir um olhar sistêmico que priorize modais de alta capacidade. O investimento em linhas subterrâneas de metrô, como a proposta da Linha 3 em Belo Horizonte, apresenta-se como alternativa necessária para reestruturar a lógica de deslocamento urbano, reduzir a dependência de sistemas rodoviários e construir uma cidade mais justa, acessível, plural e sustentável.

2.1.1 Sistemas de metrô pelo mundo

Com o desenvolvimento da sociedade urbana, especialmente no contexto pós-revolução industrial, novas formas de locomoção foram demandadas. Em 1863 foi inaugurada em Londres, Inglaterra, a Metropolitan Railway, a primeira linha de metrô subterrâneo do mundo, com cerca de 6 km de extensão sob as ruas centrais da cidade (Britannica, 2026). Na época, as ruas centrais da capital britânica já estavam congestionadas por carroças, carruagens e ônibus puxados por cavalos, o que incentivou a busca por alternativas ao transporte de superfície (DW, 2021). Na Tabela 1 podem ser observadas informações de alguns dos sistemas metroferroviários do mundo.

Tabela 1 - Sistemas de metrô pelo mundo

Cidade	Extensão (km)	Passageiros transportados por dia (milhões)	Quantidade de linhas	Quantidade de estações	Data de Inauguração
Nova York	1070	4	24	472	1904
Tóquio	532	7,1	9	180	1927
Xangai	831	10	20	508	1993
Moscou	461	9	16	250	1935
Londres	402	3,6	16	272	1863
Deli	392	6,5	10	288	2002
Madri	294	1,5	13	302	1919
Paris	245	4	16	321	1900

Fonte: O autor, 2026

2.1.2 Sistemas de metrô no Brasil

Assim como ao redor do mundo, o Brasil desenvolveu também uma malha urbana de transportes sobre trilhos. Algumas delas, como no caso de São Paulo com a CPTM (CPTM, 2026), foi reaproveitado a malha já existente e outras construídas do zero. Na Tabela 2 é relacionado a malha de metrô no país.

Tabela 2 - Sistemas de metrô no Brasil

Cidade	Extensão (km)	Passageiros transportados por dia (milhões)	Quantidade de linhas	Quantidade de estações	Inauguração
São Paulo	104	4	6	91	1974
Rio de Janeiro	56	0,8	3	41	1979
Brasília	42	0,16	2	24	1998
Salvador	33	0,35	2	22	2014
Fortaleza	44	0,1	2	31	2012

Fonte: O autor, 2026

Vale ressaltar que na Tabela 2 constam apenas sistemas de metrô propriamente ditos. Sistemas de trens urbanos, como os de Recife, Porto Alegre e o próprio de Belo Horizonte não se encontram nessa lista. Se contados, apenas em São Paulo com a CPTM (Companhia Paulista de Trens Metropolitanos), adicionaria mais 142 km de malha ferroviária, 41 estações e mais de 1,2 milhão de passageiros transportados por dia (CPTM, 2026). Esse comentário que finaliza este tópico e permite avançar para as discussões do item abaixo, leva ao entendimento que ter trens urbanos é uma solução extremamente válida. Se valer apenas dele, como o caso de Belo Horizonte, não.

2.2 Histórico do transporte metroferroviário em Belo Horizonte

Ainda na década de 1980 quando o Ministério dos Transportes desenvolveu o plano para o trem suburbano de Belo Horizonte, já se entendia que a ampliação da rede de transporte de massa por trilhos era essencial para o desenvolvimento da região e a mitigação dos problemas urbanísticos (GEIPOT, 1980). O projeto idealizado seguiria os moldes do que ocorre em São Paulo com a CPTM, sendo respectivamente

equivalente ao idealizado trem suburbano e Metrô de Belo Horizonte, como apresentado a Figura 1.

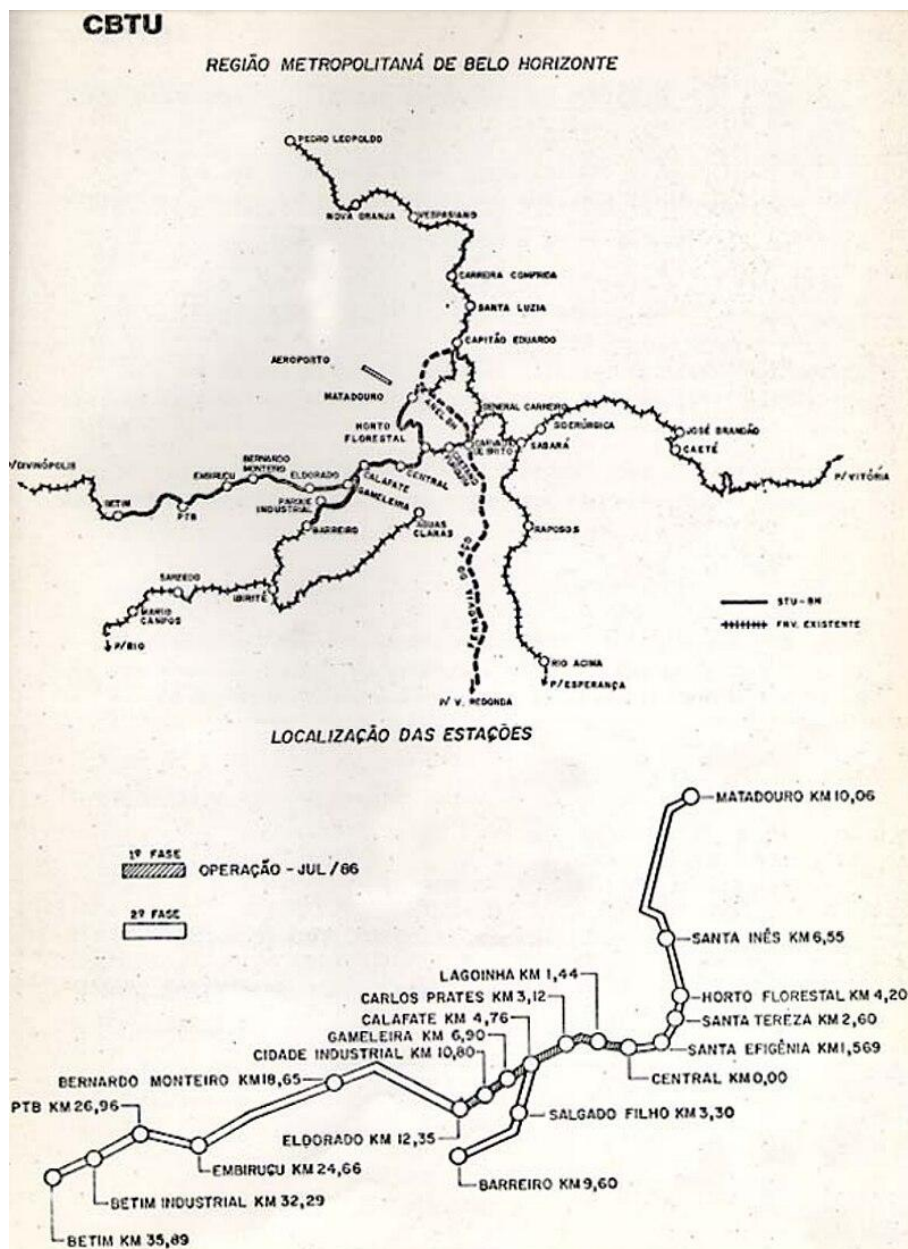


Figura 1 – Projeto do Metrô de Belo Horizonte e da rede de linhas do trem suburbano.

Fonte: CBTU (1985)

Em 1986, foi inaugurado o primeiro trecho da Linha 1 e em 2002, 24 anos antes da data da publicação deste texto, as demais estações que compõem o sistema foram abertas à população e se resumem na malha atual (MetrôBH, 2025). Em 1998, deu-

se início à implantação da Linha 2, ramal em "y" que ligaria a regional Barreiro à Linha 1, na altura do bairro Calafate, integrando com a estação de mesmo nome (CBTU, 2004). Entretanto, essa ampliação foi descontinuada e a ideia foi retomada em diversos momentos, sendo de fato concretizada em 2023 no contexto da privatização da CBTU para o Grupo Comporte, por R\$ 3,7 bilhões, com previsão para entregar a Linha 2 em 2028, com operação, inclusive, por linha singela em alguns trechos, o que pode gerar conflitos futuros e atuais (ALMG, 2025). No advento dos grandes eventos mundiais que o país estava para receber na década passada - Copa do Mundo de Futebol e Jogos Olímpicos -, discussões sobre a continuação das obras da Linha 2 e do início da então Linha 3 foram retomadas de forma mais expressiva, inclusive contando com a realização de ensaios geotécnicos na região que seria construído os túneis (Metrominas, 2013).

A Linha 3, cuja ideia inicial seria ligar a regional Pampulha com a região do bairro Savassi, na regional Centro-Sul da capital, como dito acima chegou inclusive a ter campanhas de sondagem que validaram a viabilidade técnica para a construção de uma linha subterrânea (O Tempo, 2013). Entretanto, com impasses políticos e econômicos, priorização da ampliação da Linha 1 e construção da Linha 2 (SETOP, 2015), o trecho da regional Pampulha ao Centro foi substituído por um corredor de BRT - Bus Rapid Transit, modo de transporte de média capacidade que já se encontra defasado (O Tempo, 2023). Mesmo em trecho reduzido da ideia original, a ligação do Centro, ou mais especificamente a malha existente da Linha 1, até a região da Savassi, centralidade de interesse empregatício, cultural e de serviços, continua tendo valor social (Planmob, 2010). Além disso, somente nesse trecho de cerca de 4,5 km e 5 estações da Linha 3, do Centro à Savassi, atenderia a cerca de 225 mil usuários por dia, superando os 210 mil que na data utilizavam a Linha 1 como um todo, corroborando com a validação da proposta, como pode ser observado na manchete destacada na Figura 2.



Figura 2 – Manchete com a demanda esperada da linha 3.

Fonte: Estado de Minas (2014)

Baseando-se apenas nos números da época, que atualizados após mais de 10 anos seriam certamente maiores, esses 225 mil usuários que realizam o deslocamento Lagoinha-Savassi demandam, conforme lotação máxima dos ônibus que operam em Belo Horizonte (Planmob, 2010), cerca de 2.800 viagens de ônibus. Segundo a Conferência Nacional de Transportes (2025), este valor seria o equivalente a retirar 54 mil toneladas de CO₂ do meio ambiente por dia, que equivale a cerca de 3.900 árvores ao ano.

Em 2004, um grande edital foi licitado pela CBTU, que constava com três etapas para ampliação da Linha 1, recondução da construção da Linha 2 e a construção da Linha 3, que num contexto geral, remota a ideia desenvolvida pelo Ministério dos Transportes nos anos de 1980, com uma grande malha metropolitana (CBTU, 2004), destacada na Figura 3.

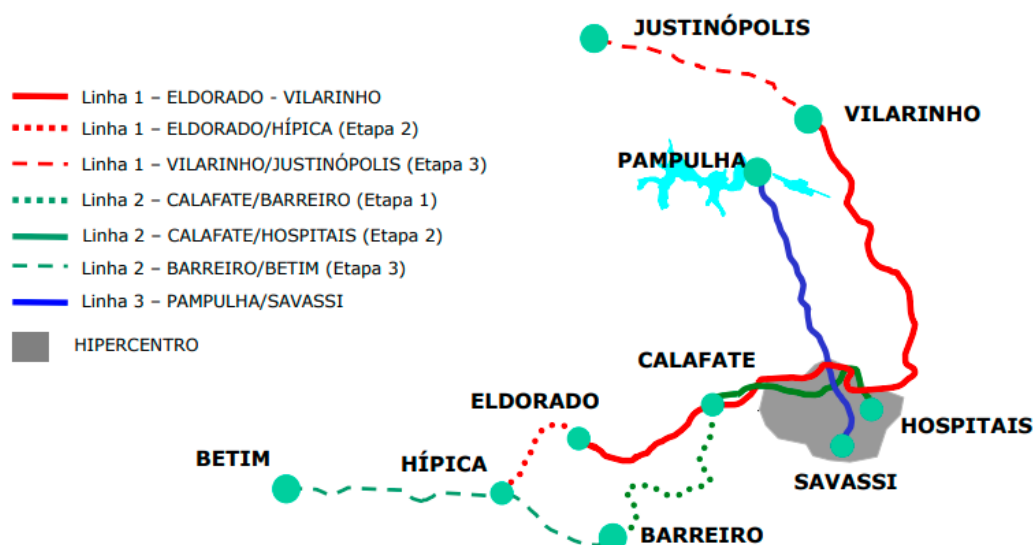


Figura 3 – Projeto de expansão por fases do Metrô de Belo Horizonte

Fonte: CBTU (2004)

Diversos cenários foram analisados, chegando ao modelo apresentado na Figura 4. Nele, a Linha 3 se encontra com a Linha 2 na Praça Sete de Setembro, hipercentro da cidade. A Linha 2 seguiria sentido Área Hospitalar reencontrando a Linha 1 na estação Santa Tereza. Enquanto a Linha 3, como discutido neste texto, sentido Savassi com início na Linha 1, na estação Lagoinha (CBTU, 2004).

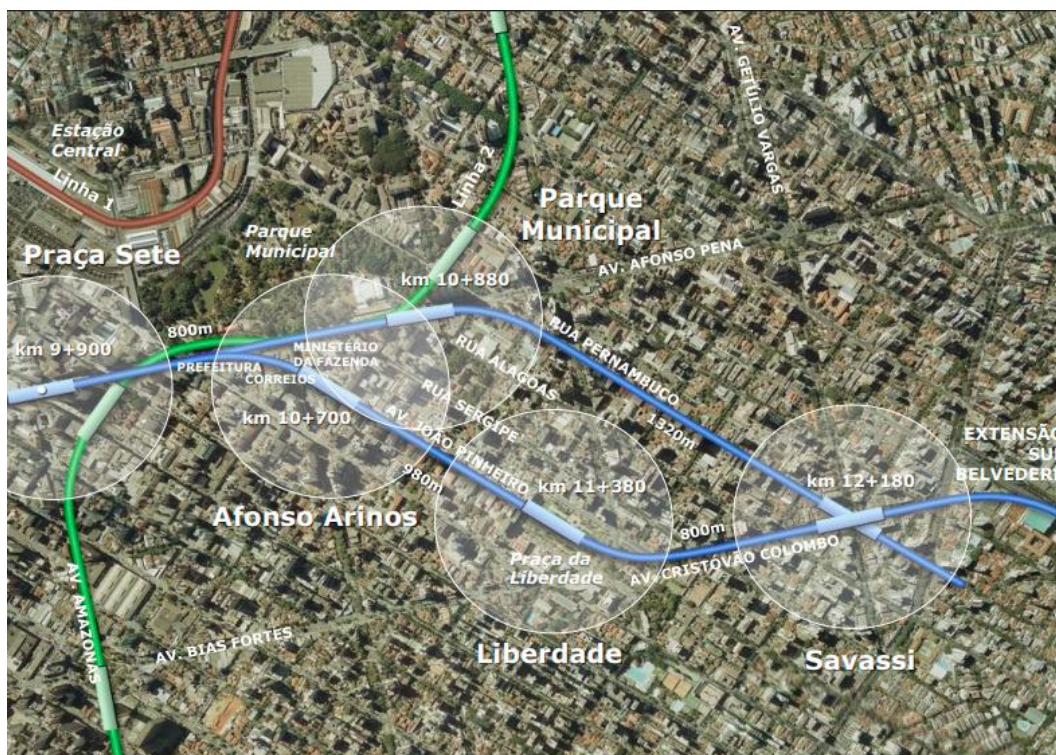


Figura 4 – Destaque na região central do projeto de ampliação do Metrô de Belo Horizonte

Fonte: CBTU, 2004

Durante a discussão apresentada pela CBTU (CBTU, 2004), diversos traçados foram avaliados, ficando indeterminado ainda qual traçado a Linha 3 seguiria da região central até a região do bairro Savassi, se seguiria pelo eixo da Avenida João Pinheiro ou pelo eixo da Rua Pernambuco. No primeiro cenário, a linha teria mais uma estação no hipercentro, com atendimento ao Campus da Faculdade de Direito da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG na Praça Afonso Arinos e outro na Praça da Liberdade, principal circuito cultural da cidade, observados na Figura 4. Na segunda opção, a Linha 3 com certo ajuste poderia ter mais uma integração com a Linha 2 na região do Palácio das Artes e do início da Área Hospitalar, diminuindo a possível demanda na única estação planejada para que ocorresse baldeação entre as Linhas 1 e 2, a Praça Sete (CBTU, 2004). Em ambos traçados há perdas e ganhos, como no caso da opção pela Rua Pernambuco, que poderia ganhar uma estação a mais com integração, mas teria uma estação a menos ao todo (CBTU, 2004).

Mesmo falhando em atender diretamente a Praça da Liberdade, contando com apenas uma única estação planejada na região, a da Praça da Savassi, devido às facilidades construtivas em relação a outra opção, especialmente na profundidade dos túneis e estações (CBTU, 2004), observadas nas Figura 5 e Figura 6, o traçado da Rua Pernambuco foi o escolhido para seguir o projeto e é onde foi realizado as campanhas de sondagem que ocorreram entre setembro de 2012 e março de 2013 (Metrominas, 2013), sintetizadas no Anexo A, onde é apresentada o perfil geológico-geotécnico da seção. Nesse sentido, para esse trabalho, as modelagens seguirão no traçado do eixo da Rua Pernambuco.

Vale ressaltar que os dados disponibilizados pela SEINFRA – Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias de Minas Gerais, relativos a essa campanha de sondagens aqui chamados de Anexo A, tiveram foco apenas em definir o perfil geológico-geotécnico da seção, tendo sido suprimidas informações importantes, em especial, o Nspt (Metrominas, 2013).

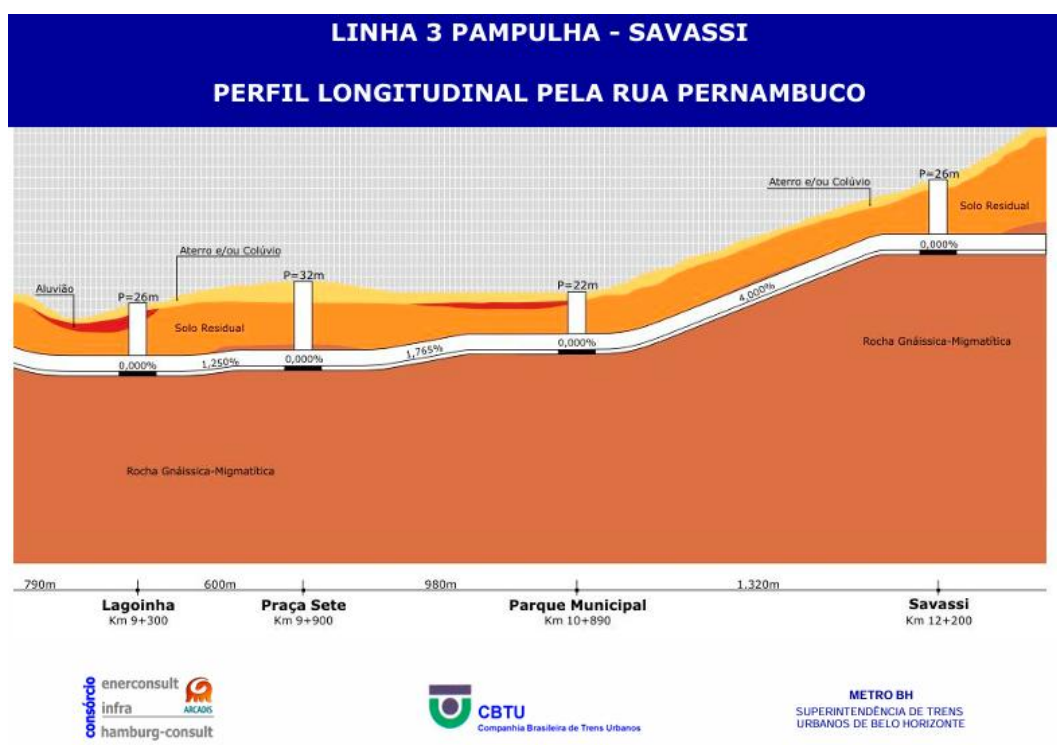


Figura 5 – Perfil longitudinal da Linha 3, da estação Lagoinha a estação Savassi pela Rua Pernambuco.

Fonte: CBTU (2004)

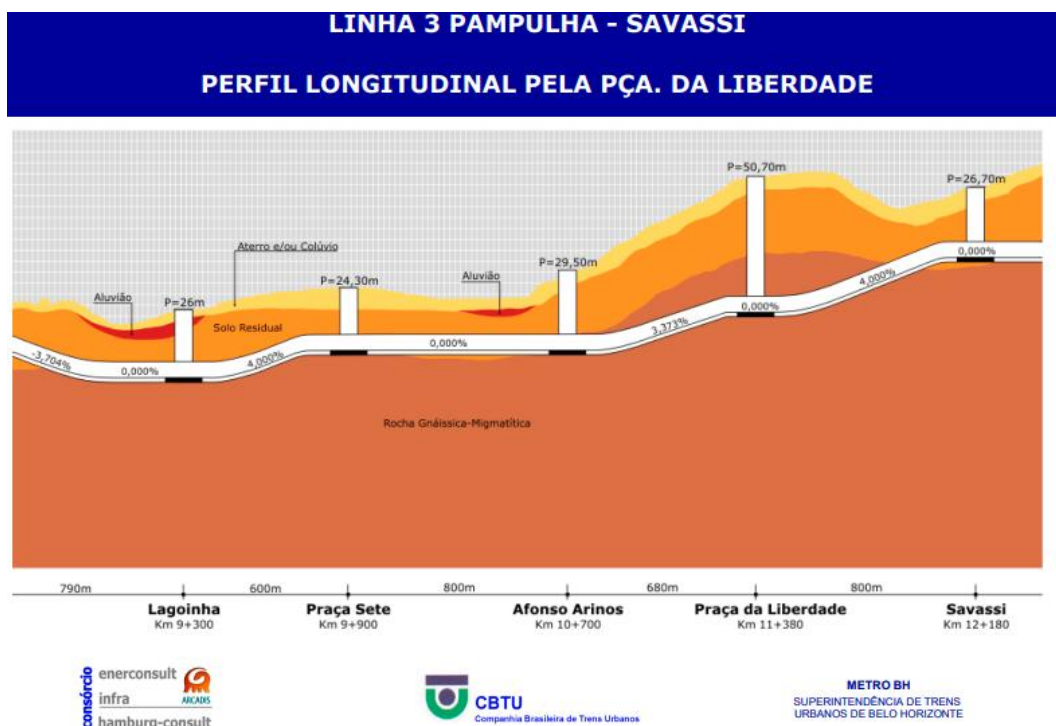


Figura 6 – Perfil longitudinal da Linha 3, da estação Lagoinha a estação Savassi pela Avenida João Pinheiro

Fonte: CBTU (2004)

2.3 Caracterização geológica-geotécnica

Em qualquer obra de infraestrutura, especialmente as subterrâneas, é necessária uma adequada caracterização geológica-geotécnica. Ainda assim, por melhor que seja a campanha de aquisição de dados para produção do perfil geológico-geotécnico, por métodos diretos como o ensaio SPT – *Standart Penetration Test*, e/ou incursões geofísicas, como a eletrorresistividade, incertezas são esperadas. Nabais (2025) afirma que devido a heterogeneidade dos maciços rochosos e terrosos, o projeto sempre sofrerá alterações na frente de obra, conforme esquema observado na Figura 7.

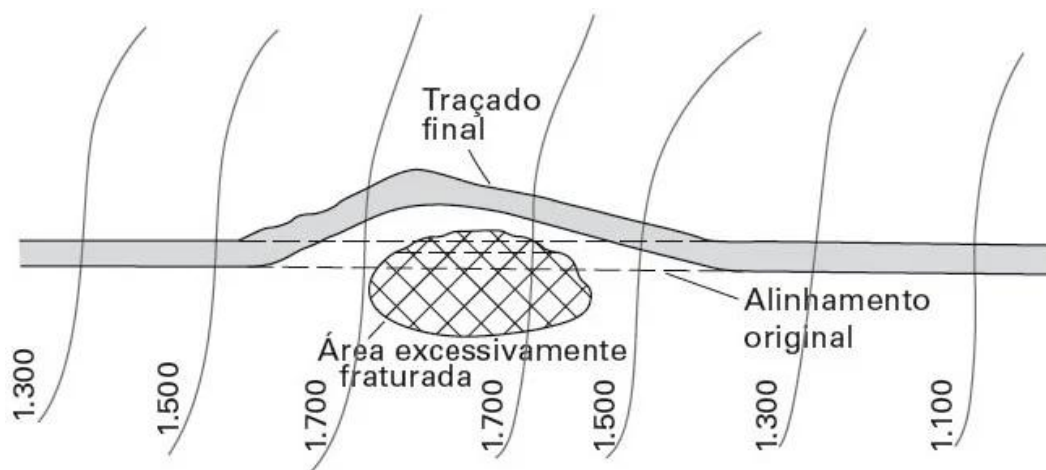


Figura 7 – Esquema da alteração do alinhamento de um túnel em razão das condições geológicas desfavoráveis.

Fonte: Chiossi, 2025

Conforme Prefeitura de Belo Horizonte (1995), CBTU (2004) e Metrominas (2013), a região de interesse é composta por rocha gnáissica-migmatítica, solo residual desta rocha, aluvião, aterro e/ou colúvio. Uma campanha de sondagem foi executada no início da década passada quando a ideia do desenvolvimento da Linha 3 entrou em destaque novamente com o advento da Copa do Mundo de Futebol e dos Jogos Olímpicos.

À época, através de nota divulgada pela SEINFRA para a mídia, foi divulgado que existia viabilidade técnica para o desenvolvimento desse projeto, como observado na Figura 8.



Figura 8 – Manchete destacando o fim das sondagens com resultado positivo para a implantação da linha subterrânea

Fonte: Hoje em Dia (2013)

Desta campanha de sondagem, conforme relatório do Metrominas (2013), foram idealizados os furos de sondagem mista SM-001 a SM-155 e desse montante apenas 134 foram realizados. Destes, 42 furos não encontraram o topo rochoso, indicando elevada camada de solo em alguns trechos. Nesta campanha e em revisão bibliográfica, como dito acima, foi identificado predominantemente dois domínios tipos de domínios geológicos: filitos e gnaisses. A profundidade do nível d'água pode ser vista na Tabela 3:

Tabela 3 – Nível d'água por domínio geológico

Trecho	Nível d'água mínimo (m)	Nível d'água máximo (m)	Nível d'água médio (m)
Filito	7,18	18,49	12,30
Gnaisse	0,85	16,00	6,77

Fonte: Adaptado de Metrominas, 2013

Assim, independentemente da escolha em se desenvolver túneis rasos ou profundos, túneis duplos ou singulares para este projeto, a influência da água será considerável. Tal condição influencia na definição, por exemplo, dos parâmetros de projeto, se será uma análise drenada ou não drenada.

2.4 Métodos construtivos de túneis de metrô

Para Chiossi (2025), túneis tem por objetivo permitir uma passagem direta através de obstáculos, seja para passagem de água, como em complexos hidrelétricos ou de drenagem urbana, infraestrutura de telecomunicações enterradas, ou até mesmo pessoas e veículos diversos. Os obstáculos podem ser anteparos diversos, como no caso de túneis rodoviários ou simplesmente áreas densamente povoadas. O autor ainda atribui que um fator que incentiva o desenvolvimento de obras subterrâneas é a relativa falta ou limitação de áreas na superfície, que justifica o dimensionamento de uma linha subterrânea na região central da capital e não a ampliação no modelo em superfície existente na Linha 1.

A colocação de Chiossi (2025) é corroborada por Andrade *et al.* (2025, p. 361), que afirmam que "A alta demanda por transportes públicos de grande capacidade, bem como a escassez de espaço disponível nos grandes centros urbanos, tem requisitado cada vez mais a necessidade da construção de estruturas subterrâneas". Em seguida serão destacados alguns dos métodos construtivos comuns para esse tipo de obra para o material geológico-geotécnico da região. É importante enfatizar que o método construtivo, assim como qualquer outro fator dimensionado neste trabalho, para definição final carece um desenvolvimento completo durante a fase do projeto executivo e os métodos ilustrados abaixo foram escolhidos por já terem sido executados no país, visto que a expertise da indústria deve ser levada em consideração visando a qualidade no processo de gestão de obras (Chiossi, 2025).

A escolha do método de escavação de túneis está diretamente relacionada às características geológicas e geotécnicas do maciço, à finalidade da obra, às condições urbanas e ambientais do entorno, bem como aos aspectos econômicos e de segurança (Castro, 2025). De modo geral, segundo Chiossi (2025), esses métodos podem ser agrupados em duas categorias principais: escavação em rocha (método

tradicional ou mecanizado) e escavação em solos ou materiais moles (método a céu aberto ou por *shield*/couraça).

2.4.1 Método *Cut-and-Cover*

Este é um dos métodos mais simples, utilizados em camadas superficiais de solo, chamado de *cut-and-cover*, trincheira/vala a céu aberto (Chiossi, 2025). Constitui-se em cavar sob o eixo da via, estabilizar as paredes laterais e piso e posteriormente a construção da laje superior, recobrando novamente e liberando a via. É um método relativamente rápido e econômico, principalmente por ser uma estrutura em baixa profundidade, conforme descreve Chiossi (2025). Mas, como desvantagem principal, há o transtorno temporário na superfície por interditar a via, algo a ser estudado com cautela se tratando do hipercentro de Belo Horizonte. Entretanto, na construção da Linha 1 – Azul do Metrô de São Paulo, como destaca Chiossi (2025), esse método foi utilizado em áreas densamente povoadas, conforme esquema da Figura 9. A Figura 10 ilustra o esquema construtivo desse método e a Figura 11, sua aplicação.

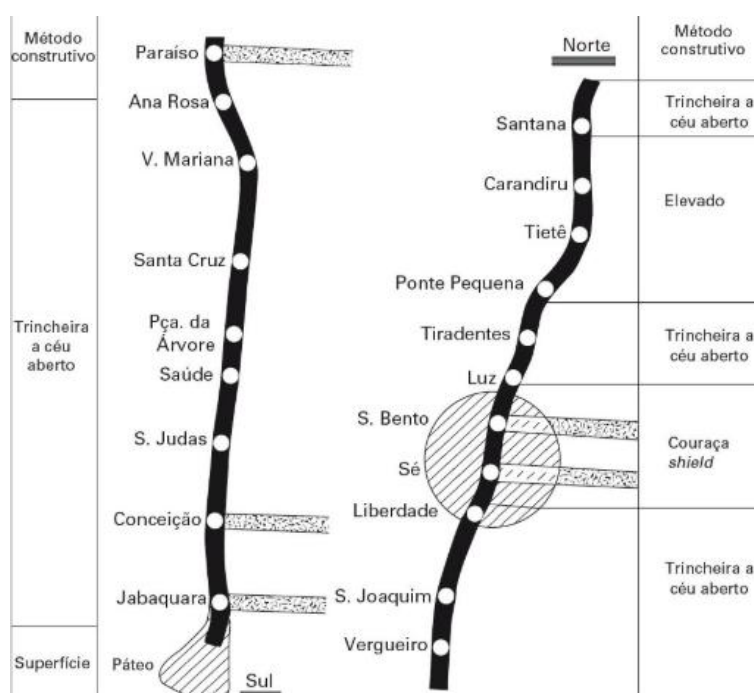


Figura 9 – Métodos construtivos por trecho da Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo.

Fonte: Chiossi (2025)

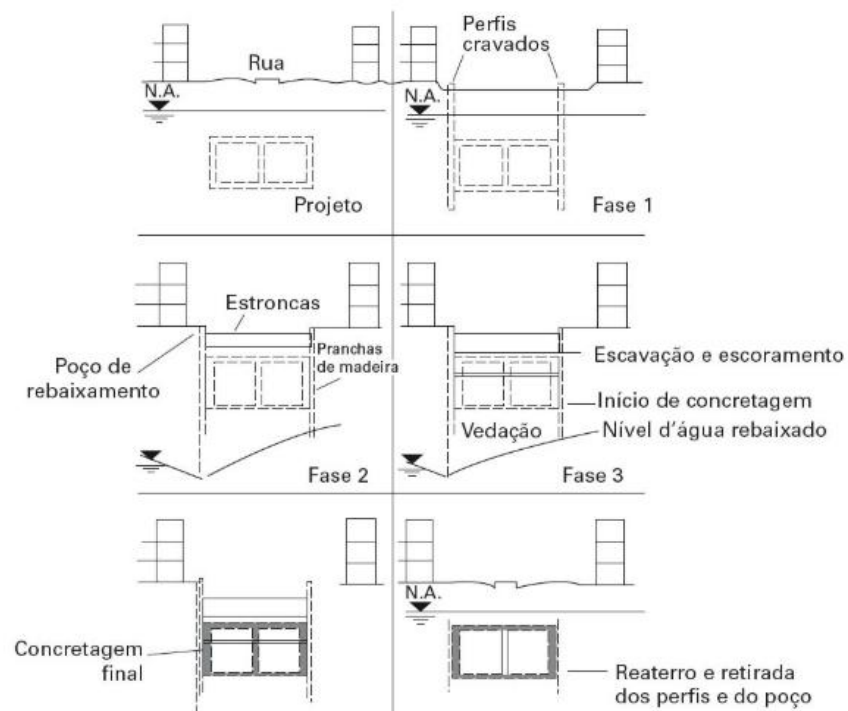


Figura 10 – Esquema de construção de túneis pelo método *cut-and-cover*.

Fonte: Chiossi (2025)



Figura 11 – Construção de túnel pelo método *cut-and-cover*, na Linha 1 - Azul do Metrô de São Paulo.

Fonte: Chiossi (2025)

2.4.2 Método NATM

Método revolucionário que modificou a indústria de túneis, nas palavras de Nabais (2025, p. 74) o *New Austrian Tunnelling Method* (NATM) “viabilizou a expansão da utilização de túneis em obras viárias em qualquer tipo de terreno, aumentando a segurança e a velocidade de execução dessas obras e reduzindo seus custos”. O método foi inovador ao permitir seccionar a seção do túnel, onde o empreendedor consegue adaptar sua frente de escavação com as ferramentas disponíveis e para os mais diversos tipos de solo, podendo se readaptar a todo momento, com seu devido tempo. A Figura 12 demonstra o esquema evolutivo de avanço, em que cada número é referente ao momento que aquela porção de material é escavado, permitindo que as tensões se redistribuam mais uniformemente do que se tivesse sido escavado por completo ao mesmo tempo toda a área da seção (Liu *et al.*, 2020).

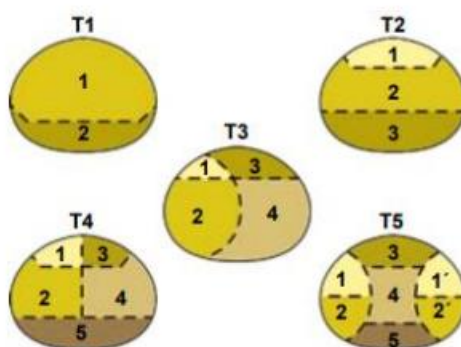


Figura 12 – Diversas sequências construtivas de um túnel pelo método NATM.

Fonte: Solotrat (2014)

As Figura 13 e Figura 14, extraídas do trabalho de Liu *et al.* (2020) apresentam, respectivamente, o modelo 3D in loco e a seção transversal dessa escavação.

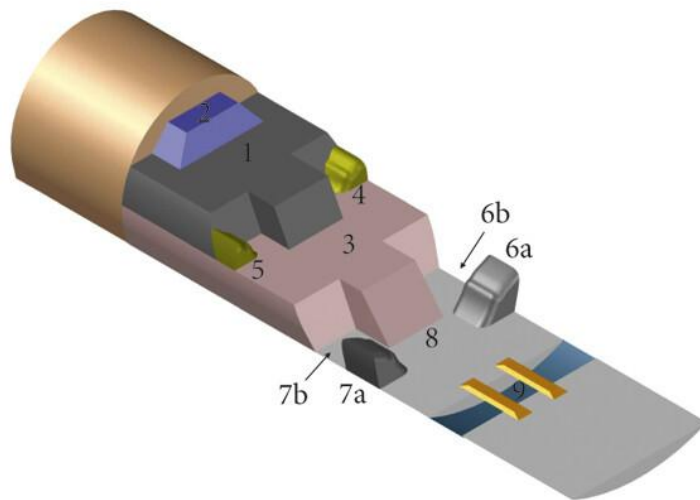


Figura 13 – Modelo 3D de uma escavação em NATM

Fonte: Liu *et al.* (2020)

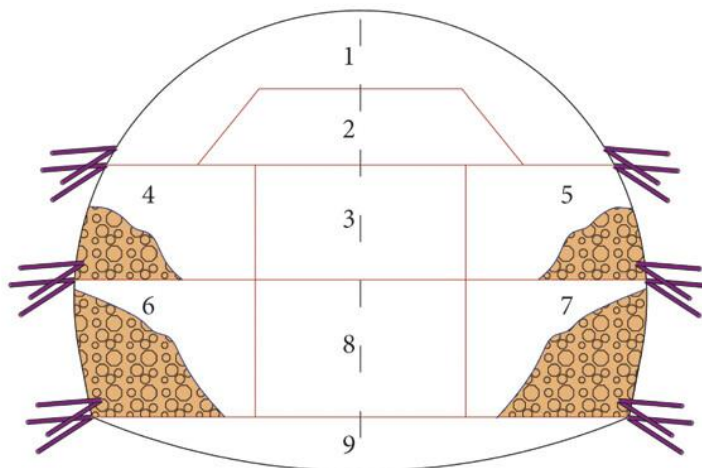


Figura 14 – Seção transversal de uma escavação em NATM

FONTE: Liu *et al.* (2020)

2.4.3 Método Shield

É considerado um método moderno e eficiente em ambientes urbanos, sendo utilizado pela primeira vez sob o Rio Tâmbisa, em Londres no séc. XIX (Chiossi, 2025). O método shield consiste na utilização de uma estrutura metálica, chamado de escudo ou simplesmente shield, que protege o ambiente durante o avanço progressivo da

frente de escavação e garante a segurança do túnel com escoramento contínuo do maciço.

Essa característica reduz significativamente o risco de colapsos, recalques excessivos e interferências na superfície, fator essencial em áreas urbanas densamente ocupadas. O método apresenta elevada adaptabilidade, podendo ser aplicado em solos moles, solos rígidos e condições abaixo do nível freático, inclusive com utilização de ar comprimido quando necessário (Chiossi, 2025). Assim como o método cut-and-cover, é utilizado para solos mas tem a vantagem de já trabalhar completamente em subsolo. Entretanto, há uma nova preocupação em estabilizar o teto enquanto escava, ação executada pelo próprio shield, preocupação que não existia no método descrito anteriormente pois seu teto era uma laje construída e depois reaterrada (Chiossi, 2025). Na Figura x é observado dois métodos semimecanizados de escavação *Shield*.

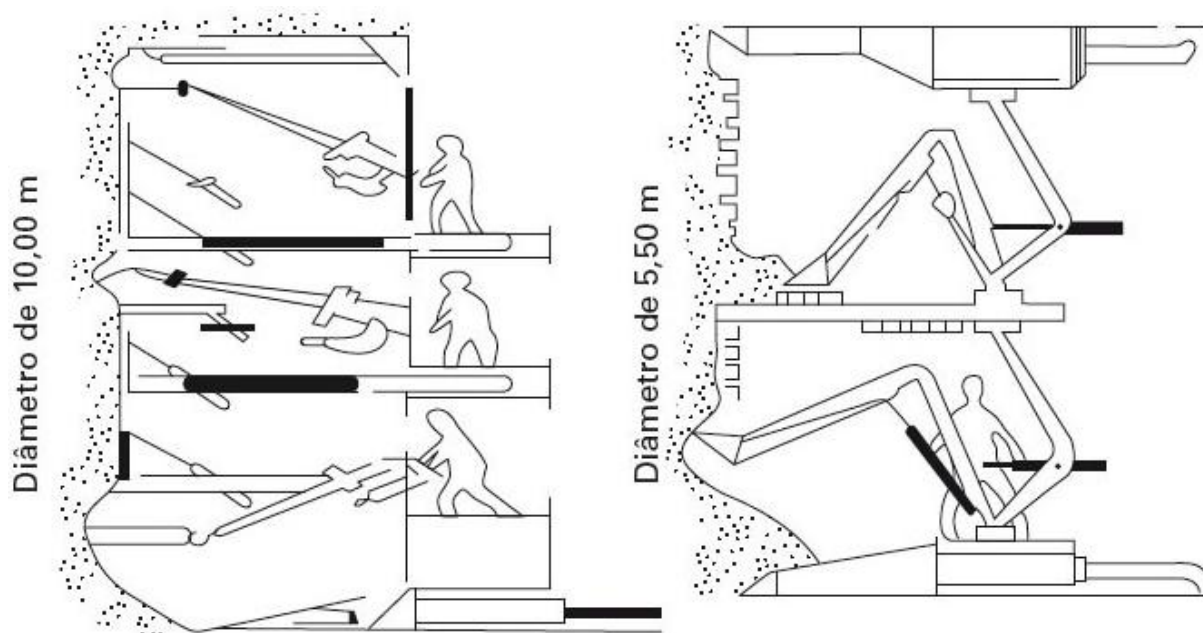


Figura 15 - Método *shield* de escavação semimecanizada

FONTE: Chiossi (2020)

2.4.4 Método TBM

Pode ser visto como a evolução do método shield mecanizado e considerado o método construtivo mais moderno que se tem atualmente (Nabais, 2025). Tal condição se dá pela elevada segurança e velocidade de avanço da frente de escavação, e especialmente por já, durante o avanço, finalizar o túnel com a colocação dos suportes, conforme o autor. O *Tunnel Boring Machine* é adequado principalmente para ambiente rochoso e pode ser adaptado para solo. O autor afirma, ainda, que o desenvolvimento do TBM e a evolução que esse método trouxe permitiu expansão das linhas de metrô pelo mundo. A Figura 16 demonstra a chegada de uma tuneladora no poço da escavação de uma estação da Linha 6 do metrô de São Paulo.



Figura 16 - Tuneladora desembocando em um poço de ventilação

FONTE: Metrô de São Paulo (2025)

2.5 Geometria da escavação: um ou dois túneis?

A definição da geometria do túnel constitui uma etapa fundamental do projeto, pois impacta diretamente na definição de outros parâmetros de segurança operacional, viabilidade construtiva, custos de implantação e efeitos geotécnicos na vizinhança (Nabais, 2025). A escolha entre túneis independentes por via (*twin tube*) e túnel único com duas vias lado a lado (*single tube*) deve ser fundamentada em critérios técnicos que considerem não apenas o desempenho ferroviário, mas também a segurança contra incêndio, a evacuação de passageiros, a interação com o maciço e, como enfatizado acima, a interferência urbana (Anagnostou, Benardos e Marinos, 2023).

Historicamente, as linhas de metrô mais antigas utilizavam o sistema de dois túneis paralelos (Anagnostou, Benardos e Marinos, 2023). Atualmente, devido aos avanços do método TBM e do próprio NATM, como feito no maior túnel do país, o T3/4 na Rodovia dos Tamoios em São Paulo, é mais comum a adoção de um túnel só, de grandes dimensões (Concessionária Tamóios, 2022; Anagnostou, Benardos e Marinos, 2023). Vale ressaltar que no caso do túnel T3/4, há um túnel secundário de menor dimensões para serviço, característica dos projetos rodoviários. Mas o túnel de interesse, onde se trafega os veículos, trata-se de um túnel de grandes dimensões perfurado pelo método NATM (ITA, 2015).

2.5.1 Normativas e definições

O projeto de túneis metroviários deve atender simultaneamente requisitos de geometria e de segurança. No Brasil, não existe uma norma NBR ABNT específica para túneis de metrô. Desse modo, o dimensionamento baseia-se em um conjunto de referências técnicas internacionais consolidadas. Do ponto de vista do transporte, a geometria da seção deve respeitar os parâmetros mínimos definidos por normas como a *NFPA 130 – Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems* (NFPA, 2023), os *códigos da UIC (International Union of Railways)* (UIC, 2019) e diretrizes da *AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association)* (AREMA, 2022). Essas normas estabelecem requisitos mínimos de:

folgas laterais e verticais de segurança, passarelas de evacuação, ventilação de emergência, espaçamento entre trilhos, acessibilidade para manutenção dentre outros.

Quanto à segurança geotécnica, o projeto segue princípios estabelecidos pela *International Tunnelling Association (ITA)* (ITA, 2015) e pelo *Eurocode 7 – Geotechnical Design* (Eurocode, 2004), que tratam de: estados limites, estabilidade da escavação, dimensionamento do suporte primário, controle de recalques e monitoramento instrumental. Essas diretrizes asseguram que o túnel atenda simultaneamente aos requisitos estruturais, operacionais e de segurança.

Assim, além de cumprir os requisitos de espaço físico para comportar toda a infraestrutura (trens, trilhos, tubos de infraestrutura elétrica, entre outros), as normativas internacionais acima citadas trazem definições quanto a formas de estabelecer requisitos mínimos de proteção e segurança de vida nos sistemas de ferrovias de passageiros, incluindo estações, veículos, vias e pátios (NFPA, 2023). Assim, de forma direta, é necessário dimensionar o diâmetro com um espaço mínimo para ventilação, manutenção e rotas de fuga (NFPA, 2023). Na Figura 17, é observado tipologias construtivas comuns, com seus diâmetros médios.

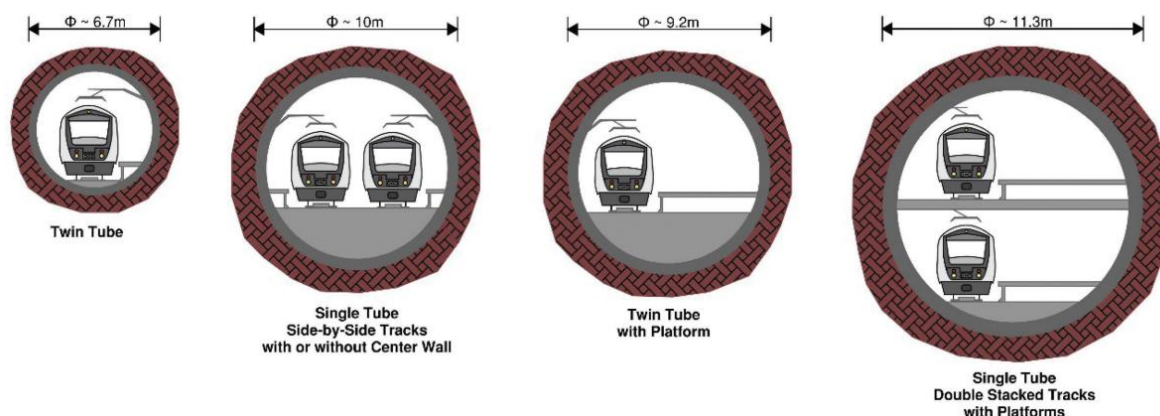


Figura 17 – Tipologias de seções típicas de túneis de metrô

Fonte: Anagnostou, Benardos e Marinos, 2023

Anagnostou, Benardos e Marinos (2023) afirmam, ainda, que apesar de seu diâmetro nominal menor, a influência na vizinha por túneis duplos fica na faixa de 20 m ao somar suas influências individuais. Segundo os autores, optar por túneis maiores,

como os *single tube* trazem um custo maior em relação ao sistema de ventilação durante a operação, mas possuem um custo menor de construção em relação ao volume de material escavado.

2.6 Alternativas de suporte

O princípio fundamental do projeto de túneis modernos é permitir que o próprio maciço participe do equilíbrio da escavação, conceito amplamente discutido por Hoek e Brown (1980). Esse comportamento está associado ao controle das deformações e à redistribuição das tensões induzidas pela escavação, fenômeno descrito na abordagem da interação maciço–suporte explorada no métodos de escavação NATM (ITA, 2007). Entretanto, especialmente em túneis urbanos rasos, onde predominam solos heterogêneos, maciços fraturados e influência de carregamentos superficiais, a estabilidade natural raramente é suficiente, exigindo a aplicação de sistemas de suporte complementares (Hoek e Brown, 1980).

2.6.1 Concreto projetado

O concreto projetado é um dos sistemas de suporte mais difundidos em escavações subterrâneas modernas (ITA, 2007). Sua aplicação consiste na projeção em alta pressão de concreto sobre a superfície escavada, promovendo confinamento imediato e redução das deformações iniciais do maciço. Segundo EFNARC (2006), o concreto projetado apresenta elevada aderência ao substrato e rápida capacidade resistente, podendo ser aplicado por via seca ou úmida, frequentemente com incorporação de fibras metálicas ou sintéticas para melhoria do desempenho mecânico e da ductilidade. Traz, ainda, que em túneis urbanos, atua majoritariamente como suporte primário, podendo integrar o sistema definitivo quando associado a revestimentos estruturais complementares. Na Figura 18 observa-se a execução de concreto projetado no emboque de um túnel.



Figura 18 – Aplicação de concreto projetado

Fonte: PROGEO, 2025

2.6.2 Cambotas

As cambotas consistem em arcos estruturais, geralmente metálicos, instalados transversalmente à seção do túnel, acompanhando sua geometria. Historicamente, estruturas similares eram executadas em madeira nas primeiras escavações subterrâneas; com o avanço da engenharia, passaram a ser confeccionadas em aço estrutural, aumentando significativamente sua capacidade resistente (Hoek e Brown, 1980). De acordo com a International Tunnelling Association (2007), as cambotas são empregadas principalmente em maciços de baixa qualidade geomecânica, onde há necessidade de suporte estrutural imediato. Podem atuar isoladamente ou em conjunto com concreto projetado, formando um sistema composto que combina rigidez estrutural e confinamento superficial. Na Figura 19, observa-se a utilização de cambotas em conjunto a concreto projetado.

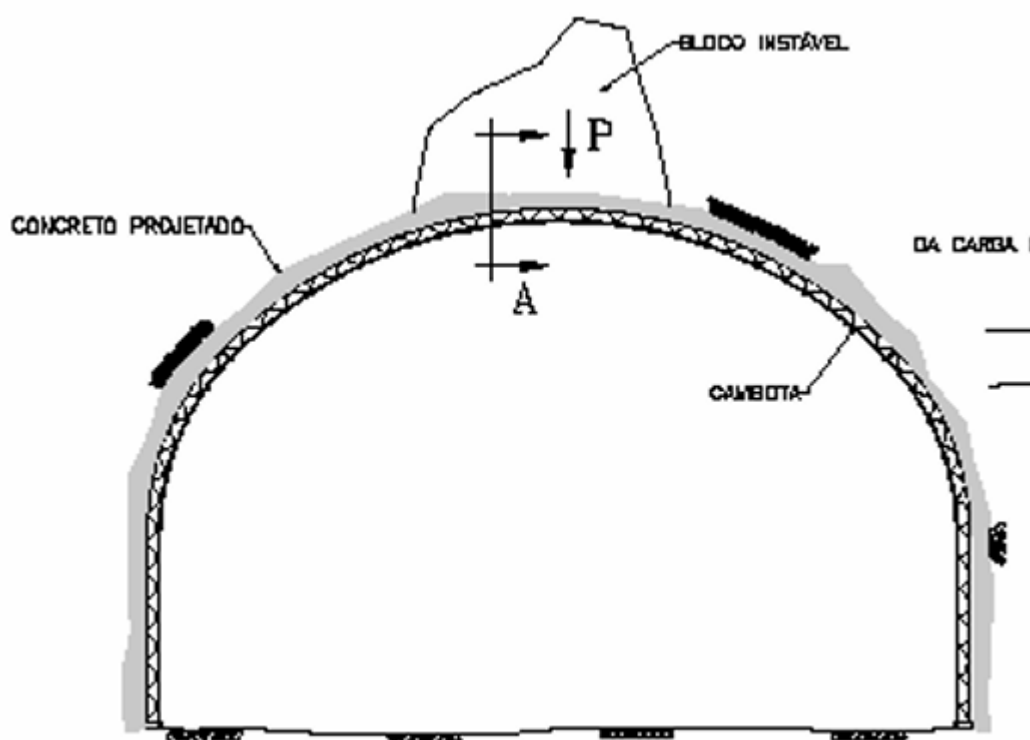


Figura 19 – Seção de túnel com suporte de cambota

Fonte: Mani *et al.*, 2009

2.6.3 Enfilagens

As enfilagens, também conhecidas como forepoling ou pipe roofing, consistem na instalação de barras ou tubos metálicos inclinados à frente da escavação, criando uma estrutura prévia de sustentação da face. Esse sistema é amplamente empregado em solos moles ou maciços pouco competentes, especialmente em túneis urbanos rasos sob áreas sensíveis (ITA, 2007). Segundo Hoek e Brown (1980), a estabilização da frente de escavação é um dos pontos críticos para o controle global de deformações. Nesse contexto, as enfilagens funcionam como um sistema preventivo, reduzindo riscos de colapso localizado e minimizando recalques superficiais, aspecto particularmente relevante em ambientes urbanos densamente ocupados (Nabais, 2025). Na Figura 20 observa-se um sistema de enfilagens.

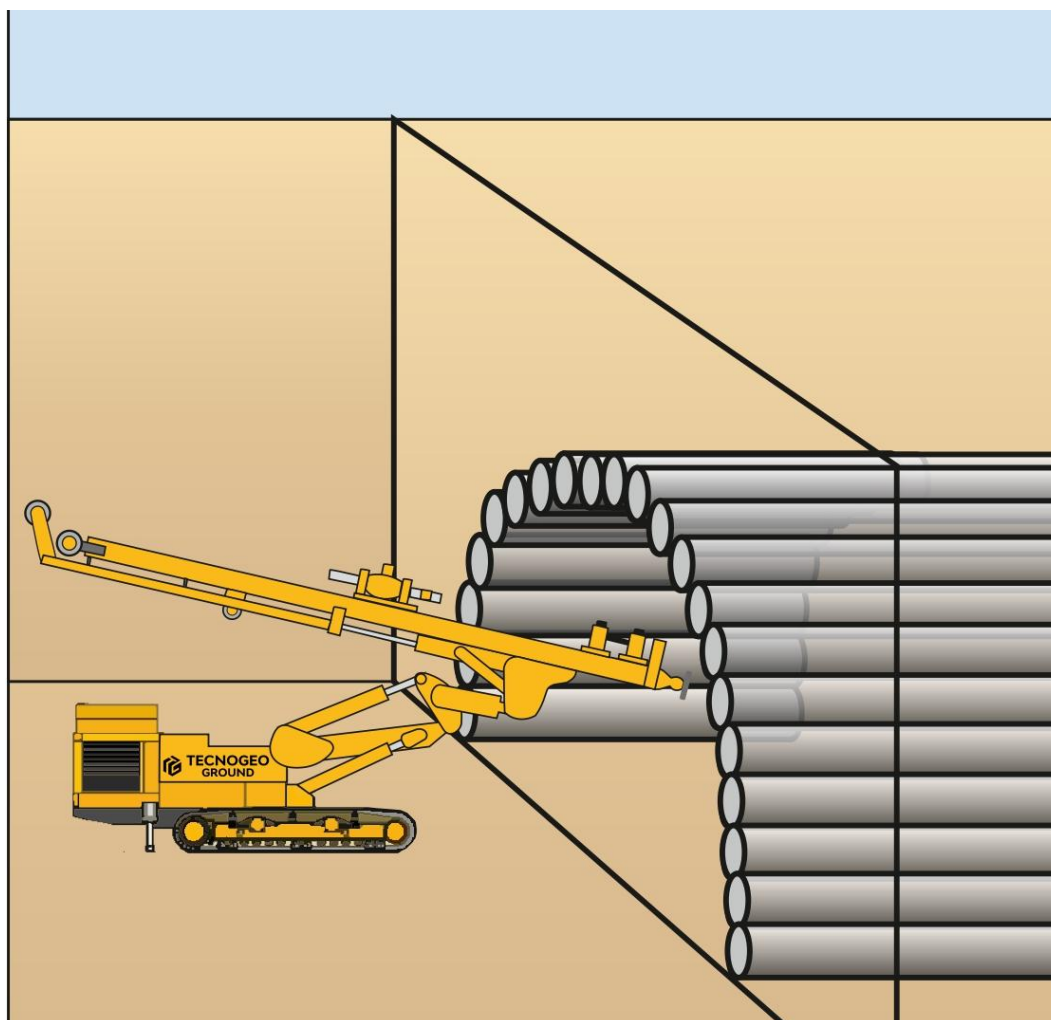


Figura 20 – Sistema de enfilagens para avanço de escavação

Fonte: Tecnogeo (2025)

2.6.4 Tirantes e chumbadores

Por fim, dentre os mecanismos de suporte discutidos estão os tirantes e chumbadores, entendidos como os sistemas mais modernos de suporte (ITA, 2007). A máxima de que são os sistemas mais modernos vem do fato de que eles atuam a todo momento em prol da estabilidade da estrutura, por estarem com uma tensão de instalação mobilizando forças contrárias ao movimento de preenchimento da cavidade (Hoek e Brown, 1980). Enquanto os outros aqui discutidos são sistemas passivos, que agem contendo o movimento quando ele venha a ocorrer, ao contrário desse sistema ativo que a todo momento está impedindo que o movimento ocorra (Hoek e Brown,

1980). Na Figura 21, observa-se o sistema de tirantes sendo instalados. Este pode ficar livre, como na imagem ou posteriormente revestido de concreto.



Figura 21 – Aplicação de Tirantes

Fonte: Pedra Branca Escavações (2025)

2.7 Métodos numéricos

Os métodos numéricos se tratam de uma ferramenta matemática e computacional, essencial na análise do comportamento de maciços rochosos em obras geotécnicas, especialmente em situações onde métodos analíticos simplificados não conseguem representar adequadamente deformações, redistribuições de tensão e mecanismos complexos de ruptura (Read e Stacey, 2022). Em escavações subterrâneas, como túneis, o processo construtivo envolve alterações significativas no estado de tensões do maciço, exigindo abordagens capazes de simular interações entre geometria, condições de contorno, propriedades do material e sequências de escavação (Nabais, 2025).

Em especial nesse projeto, por se tratar de uma escavação em face mista em alguns pontos, item a ser discutido posteriormente.

Chapra e Canale (2011) trazem que diferentemente de métodos tradicionais que avaliam apenas condições de equilíbrio, os métodos numéricos permitem modelar o comportamento mecânico do maciço ao longo do tempo, incorporando efeitos de não linearidade tensão–deformação, anisotropia, heterogeneidade e evolução de zonas plastificadas. Essa capacidade torna possível investigar mecanismos de instabilidade, redistribuição de tensões ao redor da escavação e a interação entre o maciço e sistemas de suporte.

2.7.1 Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma das abordagens contínuas para o estudo de tensão-deformação. Tem por objetivo, no geral, representar fenômenos físicos em modelos matemáticos. Neste método, são “desmembradas” em partes menores e mais simples sistemas que seriam resolvidos por soluções de equações diferenciais complexas, sendo resultado dessa divisão os chamados elementos (Chapra e Canale, 2011). Assim, permitindo a solução simultânea das equações dos campos de tensão e deslocamento induzidos pela escavação.

Nas análises geotécnicas via MEF, o comportamento dos materiais é descrito por modelos constitutivos que combinam leis de deformabilidade e critérios de ruptura (Chapra e Canale, 2011). Os modelos constitutivos mais utilizados em análises geotécnicas com elementos finitos são do tipo elástico–perfeitamente plástico, como no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, modelo adotado neste trabalho para solos residuais, junto ao critério de Hoek e Brown, para maciços rochosos.

Embora os modelos contínuos não representem explicitamente as descontinuidades presentes no maciço, eles são eficazes na avaliação do comportamento global da escavação, permitindo estimativas de deslocamentos, redistribuição de tensões e resposta do sistema de suporte, parâmetros compatíveis com o nível de detalhamento requerido neste estudo. A Figura 22, representa a discretização do método de elementos finitos.

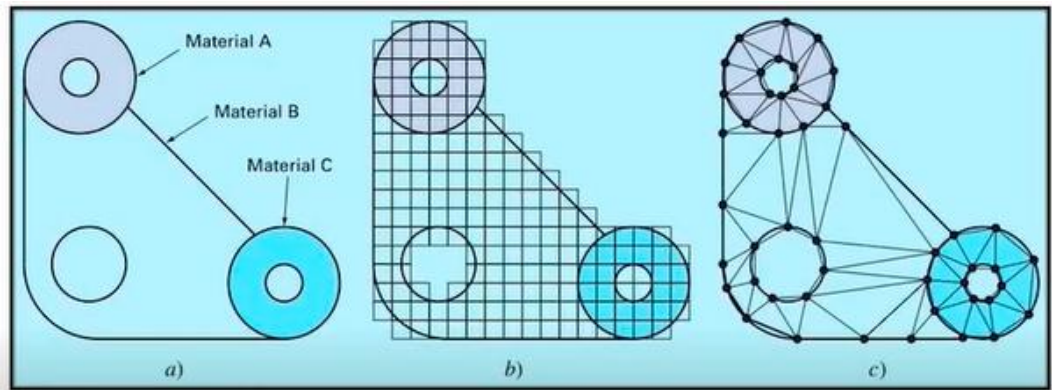


Figura 22 - Discretização de elementos finitos

Fonte: Chapra e Canale (2011)

3 METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em duas frentes complementares: (i) análise documental e revisão técnica para caracterização do contexto e (ii) modelagem numérica (RS2) para avaliação preliminar de estabilidade.

Esta pesquisa se desenvolveu a partir da revisão bibliográfica sobre o tema, tanto em aspectos urbanísticos sobre a influência da ampliação da rede de transportes de massa por este modo de transporte, quanto em questões técnicas no que diz respeito a métodos construtivos. Em ambos os modos de pesquisa se utilizou de livros, artigos, teses e dissertações, além de trabalhos jornalísticos, usados apenas para contextualização histórica e cronologia, não para parâmetros técnicos. Foram utilizados dados primários, como o mapa geológico, e secundários, como a previsão da demanda de usuários por dia e outros estudos da época da idealização da Linha 3. A partir desses dados, inclusive, foram feitas correlações da literatura para determinar os parâmetros geotécnicos locais.

Para a determinação do traçado e geometria do túnel, foi adotado o estabelecido por Metrominas em 2013, estatal que ficou responsável à época pelo desenvolvimento deste projeto. O desenvolvimento da modelagem numérica do pré-dimensionamento seguiu os parâmetros de Mohr-Coulomb para os trechos em solo e de Hoek-Brown, para os trechos em rocha. A modelagem se deu por elementos finitos para os estágios construtivos (escavação e instalação de suporte), pelo software RS2, da RocScience.

Neste trabalho, adotou-se um modelo elástico–perfeitamente plástico, no qual o material se comporta de forma elástica linear até o início da plastificação, e a ruptura é definida por critérios de resistência. Para os solos residuais, foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb, que estabelece a condição de ruptura ao cisalhamento. Para os maciços rochosos, adotou-se o critério de Hoek–Brown, adequado à representação da resistência de maciços fraturados

Nos sistemas de metrô atuais, como visto nas obras de ampliação do Metrô de São Paulo (Metrô de São Paulo, 2025), tem-se utilizado prioritariamente o método TBM para abertura dos túneis. Entretanto seu elevado custo pode inviabilizar sua adoção para esse projeto por se tratar de um trecho curto, tal como ocorreu no Metrô

de Fortaleza, situação destacada por Nabais (2025) onde optaram pelo método shield mais simples e não já a TBM.

3.1 Dados trabalhados

Um dos motivos deste trabalho se tratar apenas do projeto conceitual de um pré-dimensionamento e não do dimensionamento em si, é a falta de dados primários locais: acesso ao boletim de sondagem caracterizando pontualmente as camadas de solo e rocha, com o dado de Nspt. Para tal, será correlacionado parâmetros para determinação dos parâmetros geotécnicos.

Devido a dissolução da CBTU em Belo Horizonte no contexto da sua privatização, o acesso livre a dados dessa época é dificultado. Para viabilizar a construção deste trabalho, via Lei de Acesso à Informação, foi solicitado a SEINFRA o acesso aos boletins de sondagem, que resulta aqui o chamado Anexo A, referenciado neste trabalho como Metrominas de 2013.

Todavia, mesmo recebendo dentro do prazo legal estipulado os documentos solicitados, o que foi recebido não necessariamente foi o que fora solicitado. Para a modelagem numérica mais realista, era necessário informações locais, como o Nspt e ensaios de laboratório. Entretanto, o documento recebido pela SEINFRA consta “boletins de sondagem” com informações apenas sobre o nível d’água e profundidade em que se encontra o topo rochoso fraturado e topo de rocha sã, quando atingido. Com essa limitação, a ideia inicial de correlacionar o Nspt para obtenção de parâmetros geotécnicos, como ângulo de atrito e coeficiente de coesão será substituído por correlações da geologia local e de informações que podem ser extraídas do Anexo A, que como dito, consta com informações parciais do subsolo, além de uma interpretação geral dos trechos amostrados pela empresa projetista nestes documentos.

3.1.1 Correlações

Ao longo das últimas décadas, os estudos geotécnicos evoluíram a ponto do desenvolvimento e aperfeiçoamento de correlações sejam válidas para casos em que

os ensaios tradicionais, que trazem como resultados diretos os parâmetros geotécnicos, estejam com limitações de serem executados. Lama *et al.* (Lama *et al.* 1974, apud Read e Stacey, 2022) trazem, inclusive, que a resistência a tração em rochas é dado por ensaios indiretos devido a dificuldade de se realizar o ensaio direto. Assim, tabelas para as correlações são fundamentais. Abaixo na Tabela 4, adaptada de Read e Stacey (2022), Silva (2015) e Cecílio Júnior e Futai (2023), consta os parâmetros geotécnicos médios das litologias presentes no ambiente de estudo. A saber, este trabalho focou apenas nos trechos em gnaiss. Tal decisão partiu do ponto de que nas sondagens não foi possível atingir a profundidade do topo rochoso no trecho em filito, como também pois na grande parte desse projeto se encontra na litologia de gnaiss, ficando apenas um pequeno trecho, justamente no final da linha sob filitos.

Tabela 4 – Parâmetros geotécnicos

Litologia	Gnaiss	Solo residual
Resistência a compressão uniaxial - σ_c (MPa)	160	18,49
Resistência a tração - σ_t (MPa)	4	1,66
Módulo de Young – E (GPa)	40	40
Coeficiente de Poisson – ν	0,2	0,2
Ângulo de atrito – Φ (°)	27	32,8
Peso específico seco - γ (kN/m³)	26	26
Coesão – c (kPa)	10500	17,1
m_i	28	-
Qualidade do maciço - GSI	45	-
Fator de distúrbio - D	0,5	-

Litologia	Gnaisse	Solo residual
m_b	3,376	-
S	$1,13 \times 10^{-12}$	-
a	0,0323	-

FONTE: Adaptado de Read e Stacey, 2022; Silva, 2015; Cecílio Júnior e Futai, 2023; Hoek-Brown, 2002

De modo que para elaboração deste trabalho não foi obtido acesso a dados a nível micro, assunto abordado no item 3, para a modelagem foram adotados os dados da Tabela 4 (Read e Stacey, 2022; Silva, 2015; Cecílio Júnior e Futai, 2023 e Hoek-Brown, 2002). Em seus valores mínimos, para a formação rochosa definidos por Read e Stacey (2022) utilizando o critério não-linear de Hoek-Brown, enquanto no trecho de solo residual foi adotado os valores médios definidos nos trabalhos de Silva (2015) e de Cecílio Júnior e Futai (2023) de cada faixa, sendo estes os valores saturados, devido a presença de nível freático próximo a superfície, como observado no Anexo A. Para o trecho em solo, foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb, com uma abordagem linear. Para o parâmetro de Hoek-Brown, na ausência de amostragem de sondagens e ensaios laboratoriais específicos, como acima discutido, os parâmetros foram estimados a partir de valores típicos de resistência da rocha intacta e classificação geomecânica baseada em GSI, conforme metodologia proposta por Hoek e Brown (2002).

Para o parâmetro GSI, que aborda sobre a qualidade do maciço rochoso, foi adotado o valor inferior da faixa “Fraturado moderado” (Read e Stacey, 2022). Para casos como este, em prol do conservadorismo e segurança (Read e Stacey, 2022) é comumente adotado o limite inferior da faixa reportada na literatura para os parâmetros resistentes, e valores compatíveis com condição saturada, no caso na faixa “Rocha triturada”. Entretanto, como no boletim de sondagem a informação de topo rochoso são e fraturado é definido, foi possível adotar esse valor médio, o valor inferior de “Fraturado moderado”. Já para o parâmetro D, que discorre acerca do fator

de distúrbio devido à escavação no maciço, foi adotado o valor máximo do método NATM.

Assim, a classificação aqui apresentada deve ser entendida como uma estimativa preliminar, suficiente e se limitando apenas para o pré-dimensionamento e análise conceitual da Linha 3 do Metrô de Belo Horizonte, para os trechos em face mista da litologia gnaisse com seu solo residual.

Quanto a modelagem numérica, como abordado anteriormente utilizou-se o Método dos Elementos Finitos, com a análise por *Plane Strain* sendo resolvida via *Gaussian Elimination*, com *tensile failure* sendo *reduces shear strenght*. As análises probabilísticas se valeram pelo método de Monte-Carlo com 1000 *samples*, configuração convencional sugerida pelo software RS2 para início das análises (RocScience, 2025), Itens detalhados no Anexo B.

3.1.1.1 Equações

Os parâmetros de Mohr-Coulomb, para os trechos em solo residual e Hoek-Brown, para os trechos em rocha, são calculados seguindo as Equação 1 e Equação 2 abaixo, respectivamente.

$$\tau = C + \sigma * \tan * \phi \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2)$$

Os parâmetros para resolução da Equação 2 são dados pelas Equação (3), Equação (4) e Equação (5) abaixo:

$$m_b = m_i \exp \frac{(GSI-100)}{(28-14D)} \quad (3)$$

$$s = \exp \frac{(GSI-100)}{(9-3D)} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (5)$$

4 RESULTADOS

Com o software RS2, da RocScience, foi realizado o pré-dimensionamento teórico, com os dados resumidos na Tabela 4, decisão tomada a partir da interpretação do Anexo A, que se trata da consolidação dos dados do relatório das sondagens desenvolvidas pela estatal Metrominas entre 2012 e 2013.

4.1 Modelagem

Um dos principais condicionantes tecnológicos dos sistemas ferroviários convencionais refere-se à limitação de inclinação longitudinal, a qual não ultrapassa 4%, em função de restrições de aderência aço-aço, desempenho operacional e segurança (Union Internationale des Transports Publics, 2018). Em contraste, sistemas rodoviários admitem declividades significativamente superiores, podendo atingir valores de 15% (DNIT, 2010). Essa diferença impõe condicionantes relevantes ao traçado metroviário, especialmente em cidades de topografia acidentada, como Belo Horizonte.

No contexto topográfico da capital mineira, associado à elevada densidade construtiva da região central com a presença de edificações acima de 20 andares que possuem fundações profundas, é tecnicamente esperado que o traçado subterrâneo atravessasse diferentes litologias ao longo de seu percurso. Dessa forma, a escavação tende a ocorrer em trechos inseridos em solo residual, rocha gnáissica sã e em condições de face mista, caracterizadas pela presença simultânea de solo e rocha na frente de escavação (Liu *et al.*, 2020). Tal expectativa é corroborada por estudos anteriores desenvolvidos pela Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), cujo projeto conceitual de 2004 já indicava a ocorrência de túneis atravessando múltiplas estratigrafias ao longo do traçado proposto (CBTU, 2004).

A condição de face mista é definida quando a seção de escavação intercepta materiais distintos, como solo residual e rocha ao mesmo tempo. Trata-se de uma situação de elevada complexidade técnica, envolvendo diferentes respostas tensão-deformação, contrastes de permeabilidade e mecanismos de ruptura distintos (Hoek e Brown, 1980). Estudos recentes demonstram que escavações em face mista exigem controle rigoroso da pressão na frente, do avanço da máquina e da injeção de calda

de preenchimento, a fim de minimizar recalques diferenciais e instabilidades locais (LIU *et al.*, 2020). Diante dessas considerações, o presente estudo foi estruturado contemplando três cenários geotécnicos: Trecho A, escavação em solo residual; Trecho B, escavação em face mista e Trecho C, escavação em rocha gnaisse.

No que se refere ao dimensionamento geométrico, adotou-se diâmetro de escavação de 10 metros, considerando a tipologia de túnel único com via dupla, solução amplamente empregada em sistemas metroviários contemporâneos no Brasil e no exterior (Anagnostou, Benardos e Marinos, 2023). O valor adotado encontra-se dentro da faixa usualmente empregada para túneis singelos de duas vias, compatível com requisitos de envelope dinâmico, ventilação e segurança operacional. A opção por essa configuração fundamenta-se na busca por padronização tecnológica, favorecendo a integração futura com outras linhas e o aprimoramento da capacidade técnica nacional no setor de infraestrutura metroviária. Quanto à geometria da seção transversal, adotou-se a forma circular, reconhecida por sua eficiência estrutural frente às pressões geostáticas e hidrostáticas e por sua compatibilidade com métodos mecanizados de escavação (Hoek e Brown, 1980). A discussão comparativa com outras geometrias é apresentada no Item 5.1.

4.1.1 Litologias do tipo A, B e C

As condições para a construção de túneis de metrô na região central de Belo Horizonte induzem que haja a interação das estruturas com ao menos três litologias conhecidas: totalmente em solo residual, sendo o chamado trecho do tipo A, a em face mista, chamada de trecho do tipo B e, por fim, totalmente na litologia em gnaisse, chamada de trecho do tipo C (CBTU, 2004). Na Figura 23 observa-se um croqui adaptado do projeto da CBTU de 2004 (CBTU, 2004) com a separação em cada um desses trechos, em tipo A, tipo B e tipo C:

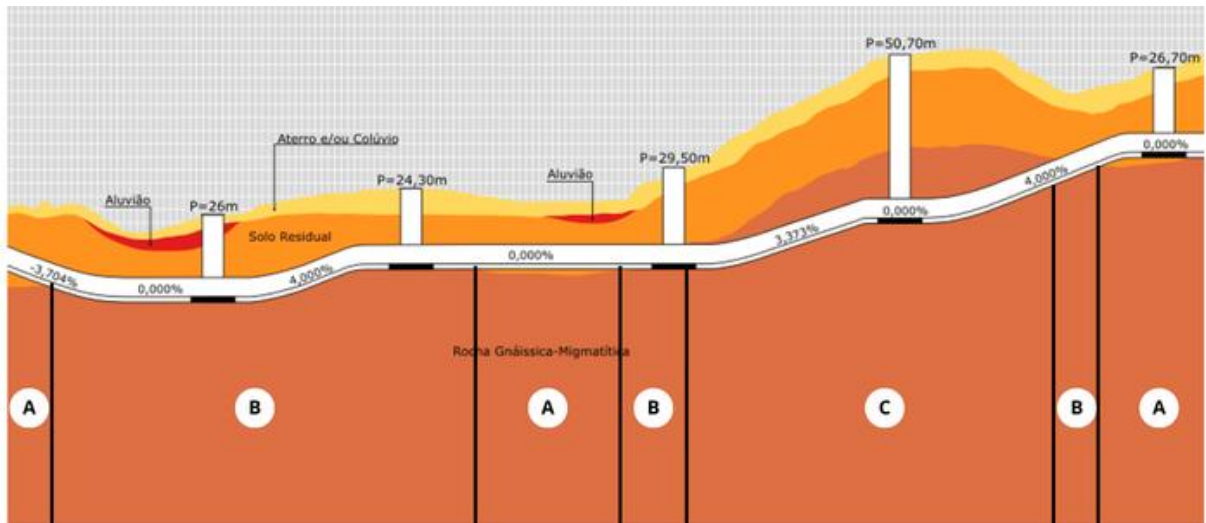


Figura 23 - Croqui dos trechos de modelagem na litologia

Fonte: Adaptado de CBTU, 2004

4.2 Local modelo

Para a parte da modelagem numérica, foi adotado o furo SM-068, final do trecho da Avenida Afonso Pena iniciando a curva para a Rua Pernambuco, onde é possível encontrar todas as litologias em questão, sendo ideal para extrapolar e representar o que ocorre em toda a extensão do projeto (Metrominas, 2013). Na Figura 24 é destacado o local de estudo.

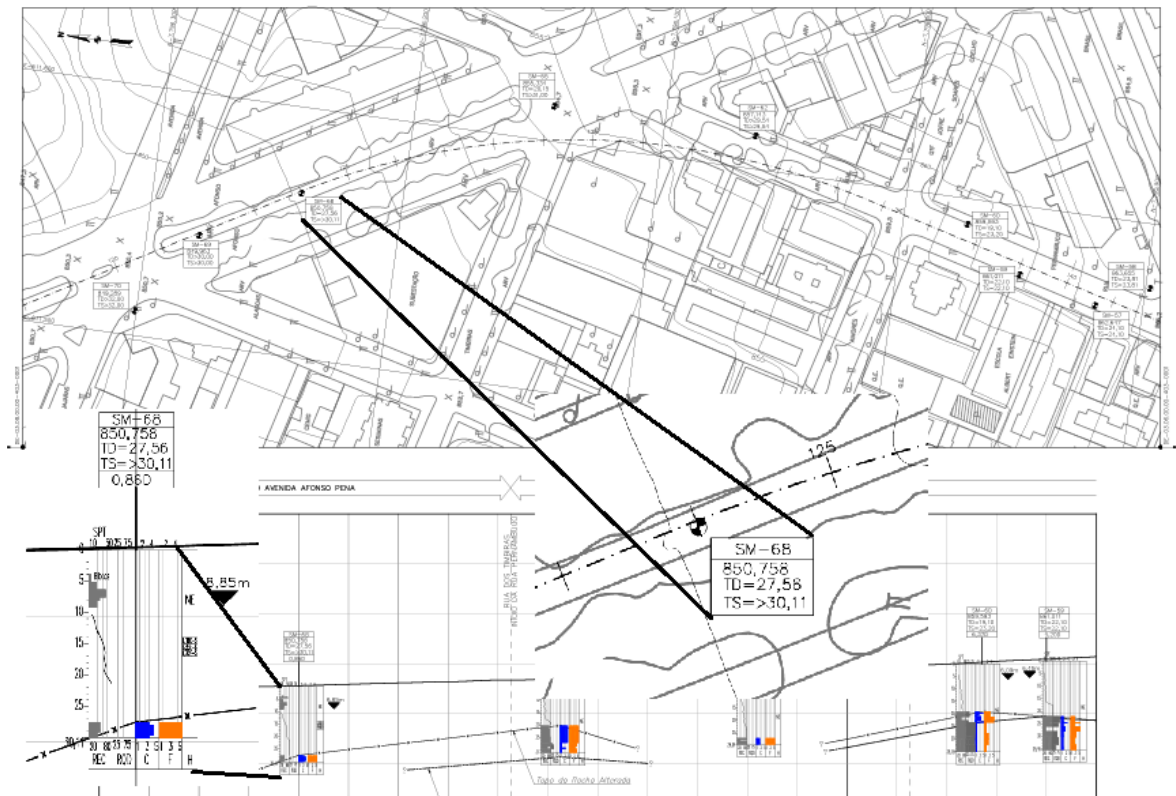


Figura 24 - Local de estudo

Fonte: Adaptado de Metrominas, 2013

4.2.1 Dimensionamento A: Solo residual

No dimensionamento que se deu completamente em solo residual, foi observado o menor fator de segurança. Em geral, essa característica poderia ser esperada, visto que solos são menos competentes que rochas ao serem escavados.

Abaixo na Figura 25 pode-se observar a escavação na região definida e a malha discretizada para o cálculo de elementos finitos.

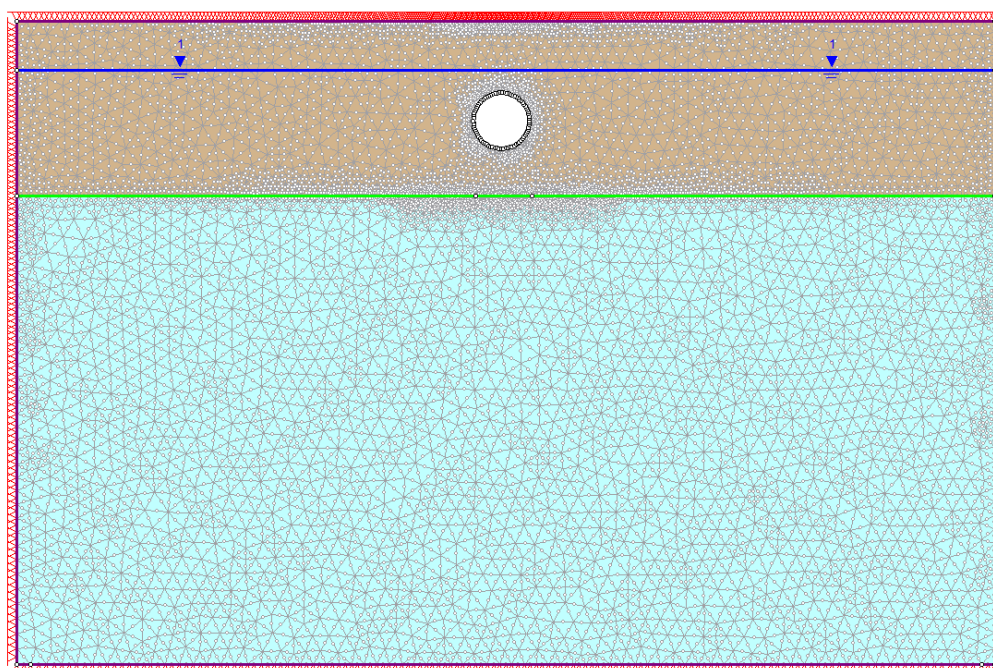


Figura 25 - Litologia, escavação e malha discretizada em solo residual

FONTE: O Autor, 2026

Na Figura 26, a distribuição do campo de tensões de Sigma 1 e o Fator de Segurança da escavação, atingindo o valor de 0,83. Na Figura 27, igualmente, mas para Sigma 3. Evidenciando a necessidade de um esquema de estabilização imediato. Sugere também que o avanço em metros por dia nessa escavação seja mais lento, como boa prática da engenharia para manter a segurança da empreitada.

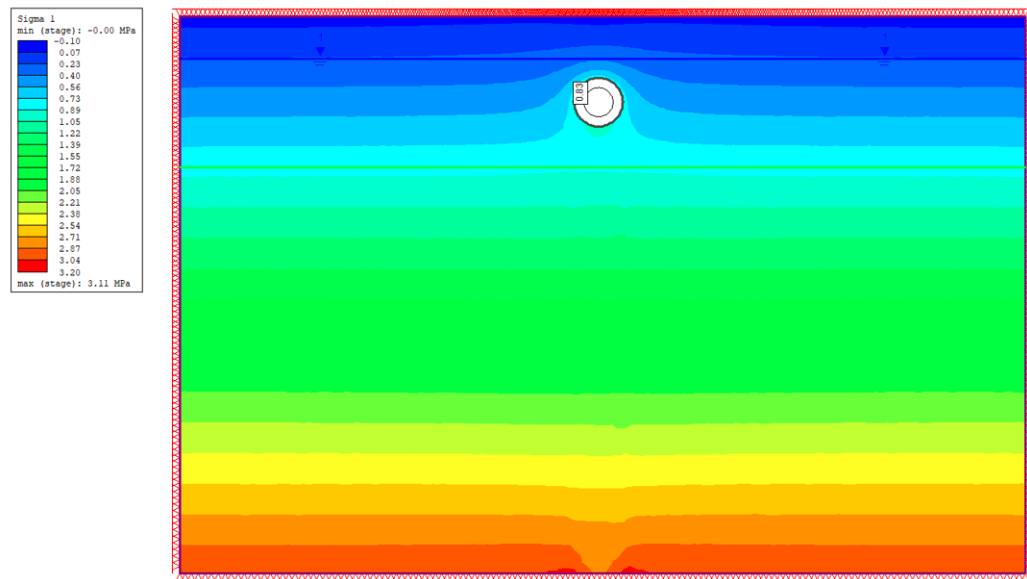


Figura 26 - Estado de tensões Sigma 1 em solo residual

FONTE: O Autor, 2026

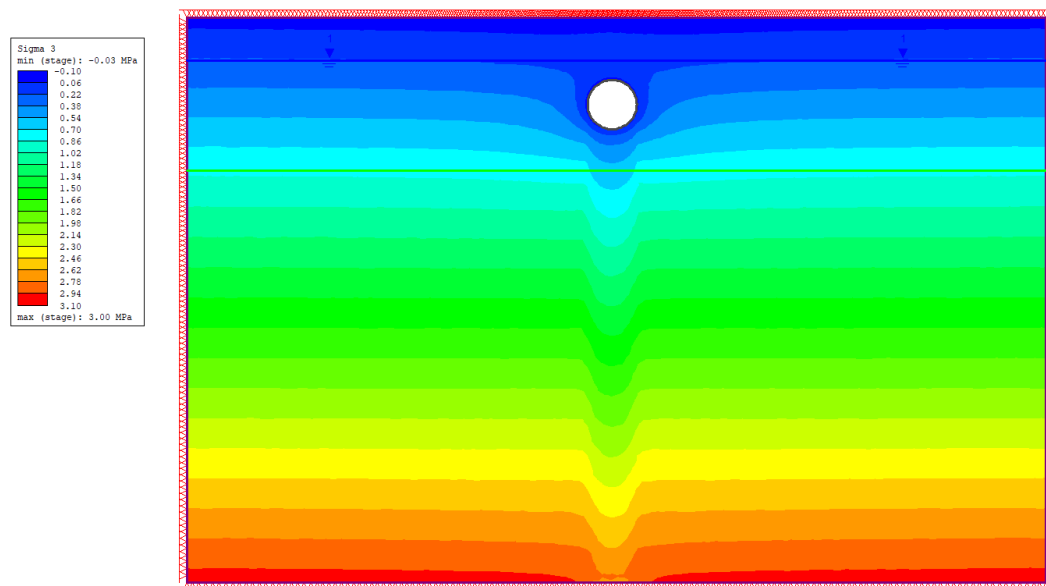


Figura 27 - Estado de tensões Sigma 3 em solo residual

FONTE: O Autor, 2026

4.2.2 Dimensionamento B: Face mista

Já no dimensionamento em face mista, os padrões de segurança atingidos superaram $FS = 1$, o que indica que, de forma geral, a escavação nesse meio será de modo mais coeso. Todavia, não pode-se inferir que não precise de suporte, visto que o trecho superior dessa seção é em solo, que se demonstrou sem competência na análise anterior. Assim como na análise do dimensionamento A, será apresentado abaixo Figura 28, com a malha discretizada, a escavação e a litologia e a Figura 29, com o estado de tensões Sigma 1 e o fator de segurança, que nesse caso deu 1,54. E, por fim, Figura 30 com o estado de tensões Sigma 3.

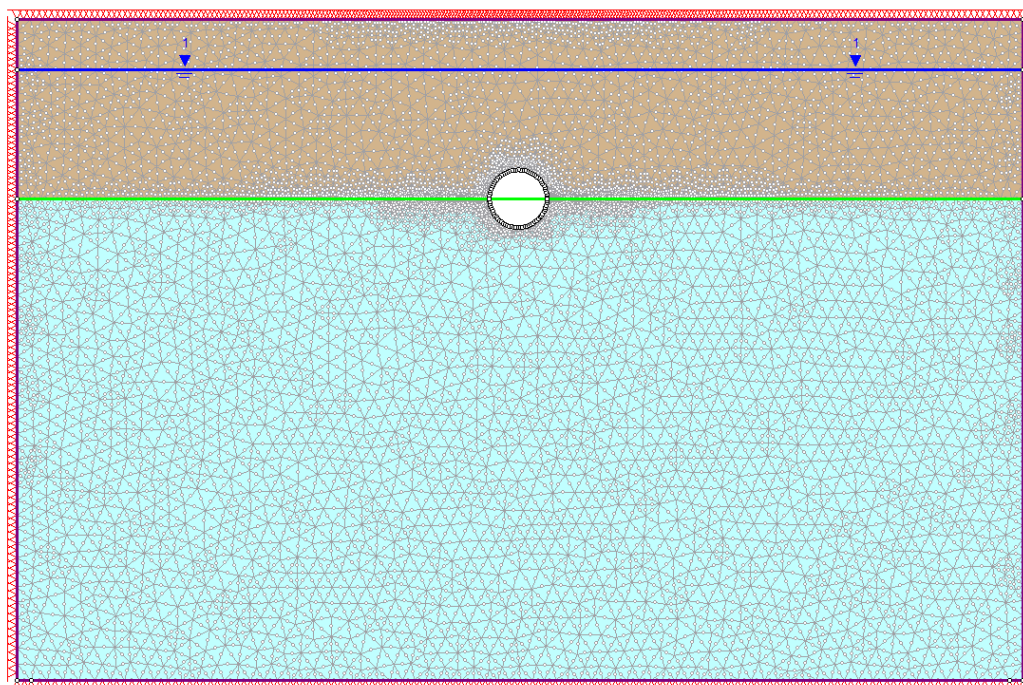


Figura 28 - Litologia, escavação e malha discretizada em face mista

FONTE: O Autor, 2026

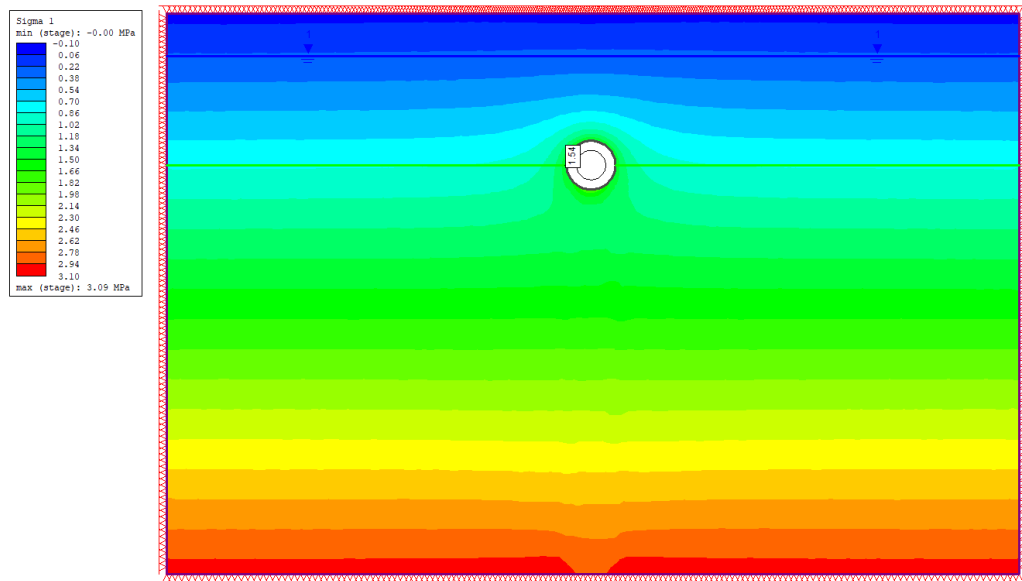


Figura 29 - Estado de tensões Sigma 1 em face mista

FONTE: O Autor, 2026

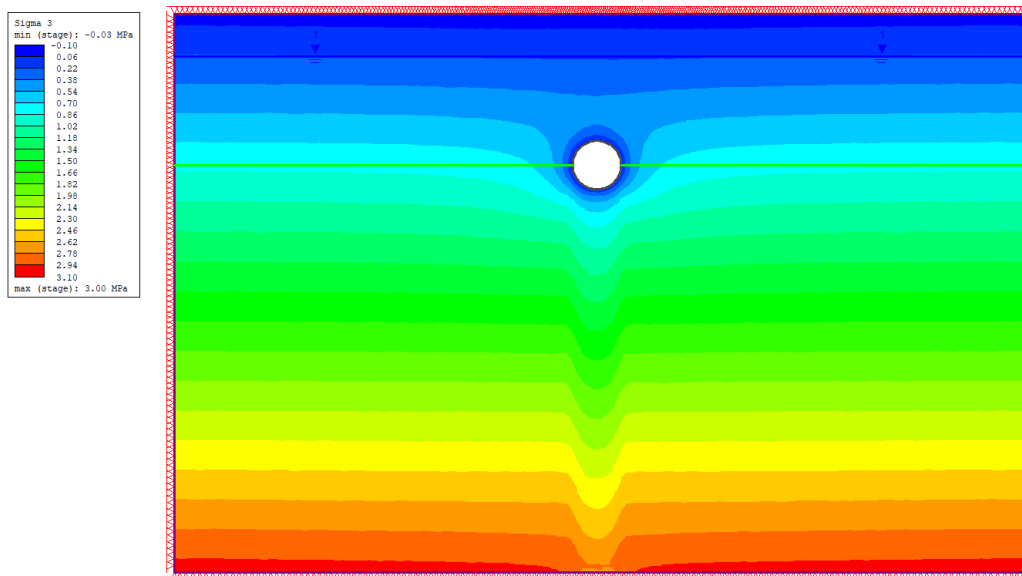


Figura 30 - Estado de tensões Sigma 3 em face mista

FONTE: O Autor, 2026

Em todos os cenários e neste em especial, há a possibilidade da ocorrência de *rock bursts*, devido a tensão induzida a mais advinda da diferença de litologias, em especial com grande diferença entre elas. Na Figura 31 abaixo, esta condição é

ilustrada com assistência das setas vetores de deformação em Sigma 1, que mostra a tendência natural do maciço preencher a região perturbada com a retirada de material, causando a possibilidade tanto de quedas de blocos quanto o soerguimento da superfície inferior. Isso é visto na Figura 32 se tratando dos vetores de deformação em Sigma 3.

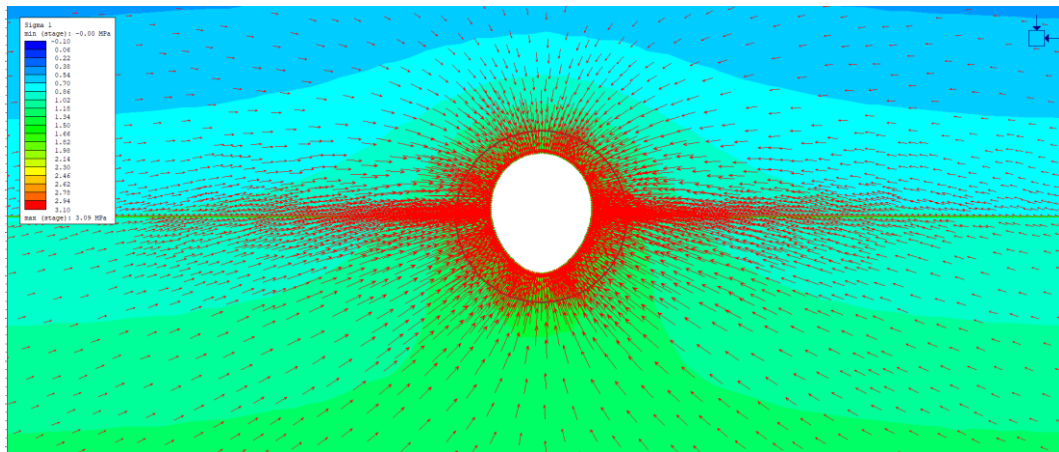


Figura 31 - Vetores de deformação em Sigma 1

FONTE: O Autor, 2026

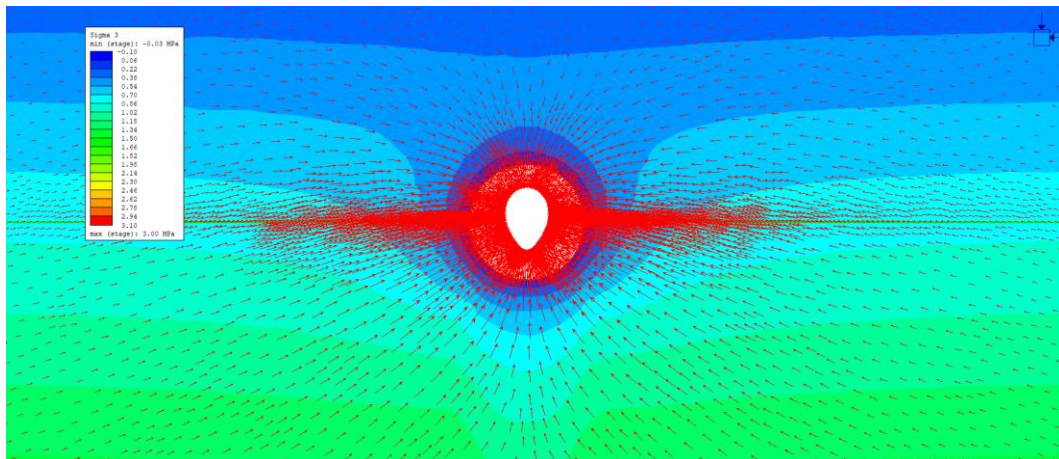


Figura 32 - Vetores de deformação em Sigma 3

FONTE: O Autor, 2026

4.2.3 Dimensionamento C: Gnaiss

Por fim, no dimensionamento na litologia gnaiss é onde se encontrou o melhor fator de segurança, sendo de 2,64. Esse valor consideravelmente maior que dos outros casos é esperado, ao se levar em consideração que a rocha sã, mesmo que adotado os parâmetros geotécnicos extremos agindo de modo conservador em prol da segurança, seria mais eficiente que as demais que são parcialmente ou totalmente escavadas em solo residual. Assim como nas demais análises, a Figura 33 representa essa escavação com a malha discretizada e a litologia. Enquanto a Figura 34, mostra o estado de tensões Sigma 1 e o fator de segurança e, por fim, a Figura 35, com o estado de tensões Sigma 3.

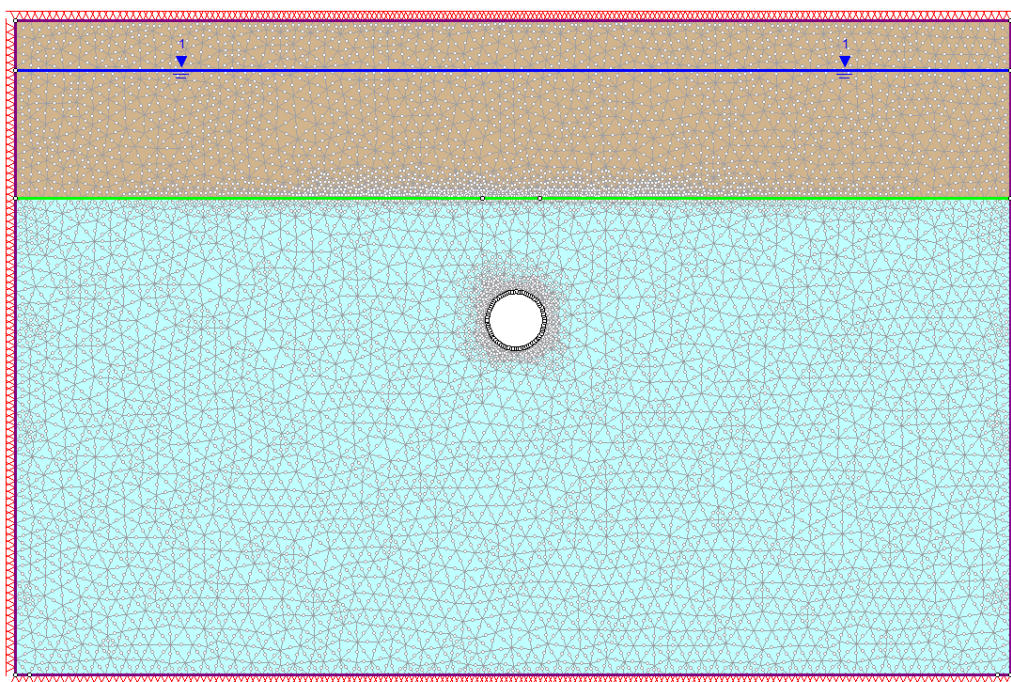


Figura 33 - Litologia, escavação e malha discretizada em gnaiss

FONTE: O Autor, 2026

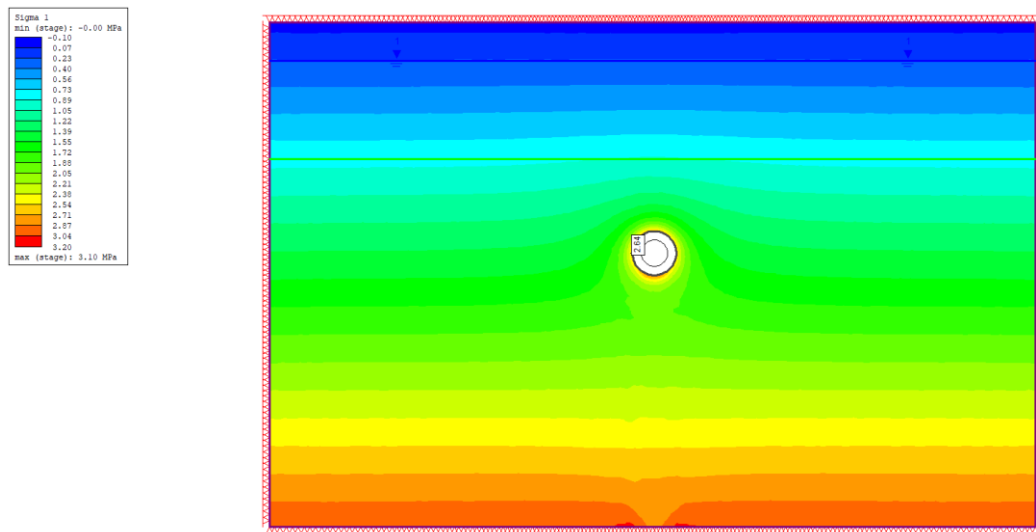


Figura 34 - Estado de tensões Sigma 1 em gnaissse

FONTE: O Autor, 2026

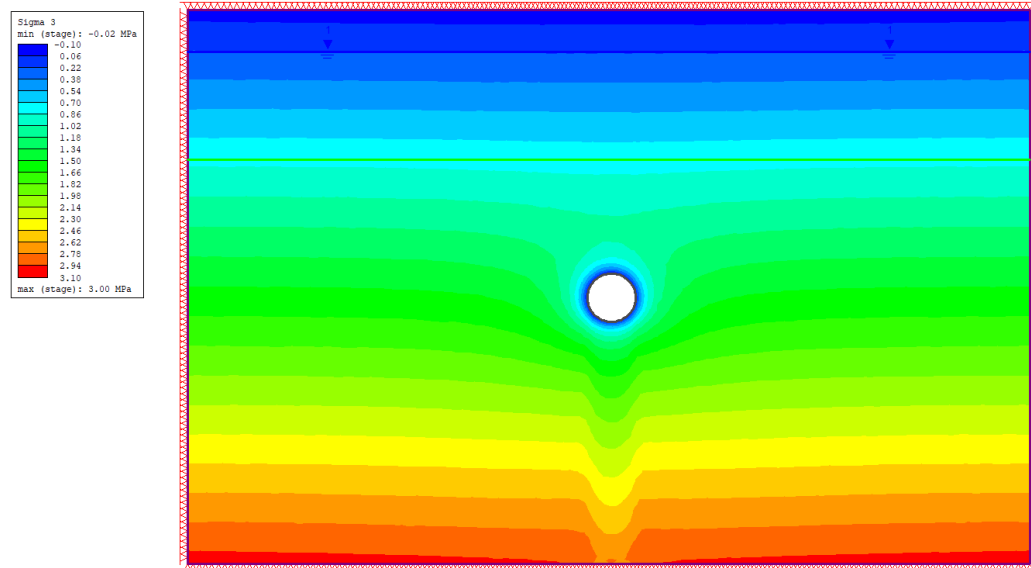


Figura 35 - Estado de tensões Sigma 3 em gnaissse

FONTE: O Autor, 2026

5 CONCLUSÃO

A ampliação do sistema metroviário de Belo Horizonte é intervenção de reconhecida relevância econômica, ambiental e social. Este trabalho teve como foco discutir as condições de implantação da Linha 3, com ênfase nos aspectos geotécnicos e construtivos. Considerando os avanços tecnológicos na última década, buscou-se revisitar sua viabilidade sob abordagem atualizada, em nível de pré-dimensionamento.

De uma forma geral, o ambiente apresentou estados de tensão não críticos, o que viabiliza tecnicamente em termos de economicidade esta implantação. Os resultados também permitiram indicar a posição mais favorável para o traçado dos túneis. Destaca-se, contudo, que os trechos em face mista, na transição entre solo residual e rocha gnaiss, apresentam maior complexidade e incerteza quanto à redistribuição de tensões, exigindo aprofundamento investigativo em fases posteriores.

Se tratando de uma obra permanente urbana, o coeficiente de segurança exigido é maior, além de que movimentações elevadas e eventos extremos como o soerguimento do solo nos eventos de *rock bursts* não são aceitáveis. Por isso, é necessário ainda discutir mais profundamente os tipos de suporte que serão adotados. Esta decisão caminha junto com uma das principais decisões deste trabalho: o método construtivo. É entendido que para as dimensões deste projeto, com cerca de 4,5 km de extensão, e levando também em consideração a experiência nacional nesta atividade, os métodos que melhor se adaptam são o Shield, para o trecho do tipo A em solo e o método NATM, para os trechos B e C, em face mista e rocha, respectivamente.

Assim, é entendido tecnicamente que este projeto possui viabilidade e sendo agora necessário revisitar este projeto com objetivo de, com acesso a informações de modo micro, seja possível uma modelagem condizente com a realidade. Especialmente se tratando de contenções e suportes, item discutido apenas na teoria neste trabalho, sem a devida parte de pré-dimensionamento.

A ampliação dessa infraestrutura é estratégica para a mobilidade urbana e o desenvolvimento sustentável de Belo Horizonte e sua Região Metropolitana. Do ponto

de vista do transporte, a nova linha contribuirá para redistribuição da demanda, redução do tempo de deslocamento e integração entre modos, aumentando a eficiência do sistema e diminuindo a dependência do transporte individual e de ônibus, que operam acima da capacidade, são mais poluentes e menos efetivos.

Em termos ambientais, a ampliação do transporte de alta capacidade tende a reduzir emissões, consumo de combustíveis fósseis e ruído urbano. Com base nos dados consolidados, os 225 mil usuários atendidos por dia eliminariam cerca de 2.800 viagens de ônibus e, conseqüentemente, 54 mil toneladas de CO₂ diárias, equivalendo a evitar o corte de cerca de 3.900 árvores ao ano. Atualmente, esses números certamente são mais elevados devido ao aumento populacional.

Sob a perspectiva social, a melhoria da acessibilidade e conectividade promove inclusão e eleva a qualidade de vida, reduzindo estresse, congestionamentos e desigualdades no acesso à cidade. A Linha 3 configura-se, portanto, não apenas como obra de infraestrutura, mas como instrumento estruturador de desenvolvimento urbano, ambiental e social de longo prazo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, é sugerido recalibrar o modelo utilizando, na melhor hipótese, valores obtidos em ensaios de laboratório. Não sendo possível, utilizar as correlações equivalentes, mas desta vez com os valores de N_{spt} e não somente correlações com base na litologia.

Como recomendação para trabalhos futuros, fica o teste de outras geometrias ovais, outras formas de contenção e suporte e, principalmente, avaliar o estado de tensões ao se definir etapas de escavação do método NATM, entendido como o mais adequado para este projeto.

Além disso, é de extremo valor uma nova pesquisa de Origem-Destino (OD) para determinar a demanda atualizada de usuários desta linha, visto que as pesquisas que moldaram esse pré-dimensionamento datam de mais de uma década.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, R. R. de; *et al.* Análise crítica de um projeto executivo de contenções em solo grampeado com base nos parâmetros de projeto e de execução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. Anais... Goiânia: ABMS, 2014. Disponível em: <https://sites.usp.br/geoinfrausp/wp-content/uploads/sites/714/2021/10/2014-Cobramseg-Aguiar-et-al.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

AMARAL, Pedro Henrique Campos. Melhoria da qualidade de vida com o uso de transportes em massa na cidade de São Paulo - SP. Orientadora: Luzenira Alves Brasileiro. 2025. 53 f. : il. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha solteira, 2025.

American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. AREMA Manual for Railway Engineering. Lanham: AREMA, 2022. Disponível em: <https://www.arena.org/publications/manual>. Acesso em: 14 fev. 2026.

Anagnostou, G., Benardos, A., Marinos, V., P. Expanding Underground - Knowledge and passion to make a positive impact on the world - Single and double tube configuration for transit systems. 1º ed. CRC Press. Nova York

ANDRADE, G. G.; YAMAGUTI, P.; AKAMINE, I. Análise numérica de túneis com seções ovalizadas em solos da Bacia Sedimentar de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 6., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: CBT, 2025. Disponível em: <https://6cbt.tuneis.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Anais-PDF.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

ANP TRILHOS. Benefícios socioeconômicos do transporte de passageiros sobre trilhos. Brasília: ANP Trilhos, 2018. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/beneficios-socioeconomicos-do-transporte-de-passageiros-sobre-trilhos/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/comunicacao/noticias/arquivos/Via-singela-no-metro-de-BH-preocupa-moradores-do-Barreiro/>. Acesso em: 29 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112587.htm. Acesso em: 8 ago. 2025.

BRITANNICA. London Underground. History, Routes, & Facts. Encyclopædia Britannica. Disponível em: <https://www.britannica.com/topic/London-Underground>. Acesso em: 14 fev. de 2026.

CARVALHO, N. S. Projeto conceitual – Metrô L3 RJ - Trecho Carioca 2 – Barreto – Estudo geológico geotécnico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 6., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: CBT, 2025. Disponível em: <https://6cbt.tuneis.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Anais-PDF.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

CASTRO, J. C. P. S.; CIRIADES, J. P.; BILFINGER, W.; MINICUCCI, L. A. Considerações sobre investigações para o desenvolvimento de projeto de túneis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 6., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: CBT, 2025. Disponível em: <https://6cbt.tuneis.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Anais-PDF.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

CERVERO, R. Transport infrastructure and the environment: Sustainable mobility and urbanism. Working Paper, n. 2013-03, University of California, Institute of Urban and Regional Development (IURD), Berkeley, CA. Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/92377/1/770747167.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Métodos numéricos para engenharia. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CHIOSSI, Nivaldo. Geologia de Engenharia. 3. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p. 99. ISBN 9788579751660. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751660/>. Acesso em: 5 ago. 2025.

COBLI. Smart city: o que é cidade inteligente e como funciona. Disponível em: <https://www.cobli.co/blog/smart-city/>. Acesso em: 14 fev. 2026.

COMPANHIA BRASILEIRA DE TRENS URBANOS. Relatório Anual 1985. Brasília: CBTU, 1985.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. Construção subterrânea. São Paulo: Metrô, [s. d.]. Disponível em: https://www.metro.sp.gov.br/pt_BR/tecnologia/construcao/subterraneo/. Acesso em: 8 ago. 2025.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. Métodos construtivos – Linha 2 Verde. São Paulo: Metrô, [s. d.]. Disponível em: https://www.metro.sp.gov.br/pt_BR/obras/linha-2-verde/metodos-construtivos/. Acesso em: 8 ago. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. Transporte coletivo: solução estratégica para reduzir emissões. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/transporte-coletivo--soluo-estratgica-para-reduzir-as-emisses-do-brasil-aponta-cnt>. Acesso em: 04 fev. 2026

DW. 10 de janeiro de 1863 – Londres inaugura o primeiro metrô do mundo. Deutsche Welle. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/1863-londres-inaugura-o-primeiro-metrô-do-mundo/a-297312>. Acesso em: 14 fev. de 2026.

ESTADÃO. Transporte de passageiros sobre trilhos economizou cerca de R\$ 12 bilhões no Brasil em 2024. Estadão Mobilidade, 2025. Disponível em: https://mobilidade.estadao.com.br/frota-e-logistica/transporte-de-passageiros-sobre-trilhos-economizou-cerca-r-12-bilhoes-no-brasil-em-2024/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 8 ago. 2025.

ESTADO DE MINAS. Linha Lagoinha-Savassi atenderá 225 mil passageiros por dia. Estado de Minas, 2014. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/politica/2014/05/17/interna_politica,529721/linha-lagoinha-savassi-atendera-225-mil-passageiros-por-dia.shtml. Acesso em: 8 ago. 2025.

European Committee for Standardization. Eurocode 7: Geotechnical Design – EN 1997-1. Brussels: CEN, 2004. Disponível em: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=137>. Acesso em: 17 fev. 2026.

FUNDAÇÃO CLÓVIS SALGADO. Circuito da Liberdade. Belo Horizonte, [s. d.]. Disponível em: <https://fcs.mg.gov.br/circuito-da-liberdade/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. Benefícios da mobilidade urbana baseada em trens e metrô. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://portal.fgv.br/artigos/beneficios-mobilidade-urbana-baseada-trens-e-metros?nid=14974>. Acesso em: 8 ago. 2025.

G1. CBTU ainda não tem prazo para reajuste de tarifa de metrô em BH. G1 Minas Gerais, 24 abr. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/04/24/cbtu-ainda-nao-tem-prazo-para-reajuste-de-tarifa-de-metro-em-bh.ghml>. Acesso em: 8 ago. 2025.

G1. Fora dos trilhos: ampliação do metrô de BH ainda não virou realidade. G1 Minas Gerais, 19 nov. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2018/11/19/fora-dos-trilhos-ampliacao-do-metro-de-bh-ainda-nao-virou-realidade.ghml>. Acesso em: 8 ago. 2025.

GEIPOT. Estudo do trem de subúrbio da região metropolitana de Belo Horizonte: concepção do sistema. Brasília: Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, 1980. Disponível em: <http://www.bibliotecavirtual.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=75818>. Acesso em: 8 ago. 2025.

HEMASREE, R.; SUBRAMANIAN, C. V. Understanding the impacts and the influences of Metro rail on urban environment Case studies and the Bengaluru scenario. Working Paper, n. 2013-03, Cornell University, Ithaca, NY. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2209.14210>. Acesso em: 8 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Belo Horizonte. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-horizonte.html>. Acesso em: 8 ago. 2025.

ITDP BRASIL. Boletim 4 - MobiliDADOS: Dados sobre mobilidade por bicicleta nas cidades brasileiras. Rio de Janeiro: ITDP Brasil, 2019. Disponível em: https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2019/10/Boletim4_MobiliDADOS.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY (ITDP). The BRT Standard. 4. ed. New York: ITDP, 2019.

INTERNATIONAL TUNNELLING ASSOCIATION. Guidelines for mechanized tunnelling. Lausanne: ITA, 2015. Disponível em: <https://about.ita-aite.org/publications/wg-publications>. Acesso em: 14 fev. 2026.

International Union of Railways. UIC Code – Railway Infrastructure Standards. Paris: UIC, 2019. Disponível em: <https://uic.org/rail-system/publications/>. Acesso em: 14 fev. 2026.

LIU *et al.* New Construction Technology of a Shallow Tunnel in Boulder-Cobble Mixed Grounds. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 5686042, 20 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5686042>

MACEDO, M. M. de. Avaliação de métodos construtivos de túneis com enfoque no método austríaco. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/items/72d4ea23-d27c-4662-b6d6-94a6d71a1fe4>. Acesso em: 8 ago. 2025.

MELO, R. Estudo metrô. [S. l.]: Renato Melo, [s. d.]. Disponível em: <https://renatomelo.com/project/estudo-metro/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

NABAIS, Rui José da S. Manual Básico de Engenharia Ferroviária. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p. 74-76. ISBN 9788579752087. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752087/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

National Fire Protection Association. NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. Quincy: NFPA, 2023. Disponível em: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-130-standard-development/130>. Acesso em: 14 fev. 2026.

O GLOBO. Transporte urbano é ruim ou péssimo para 63% dos brasileiros; especialistas dizem o que precisa mudar. O Globo, 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/esg/noticia/2022/11/transporte-urbano-e-ruim-ou-pessimo-para-63percent-dos-brasileiros-especialistas-dizem-o-que-precisa-mudar.ghtml>. Acesso em: 8 ago. 2025.

O TEMPO. Caos nos ônibus de BH é efeito da falta de políticas públicas, diz especialista. O Tempo, 2023. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/caos-nos-onibus-de-bh-e-efeito-da-falta-de-politicas-publicas-diz-especialista-1.2874492>. Acesso em: 8 ago. 2025.

O TEMPO. Declínio do transporte coletivo em BH exige reformulação de modelo. O Tempo, 2025. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/politica/2025/6/9/declinio-do-transporte-coletivo-em-bh-exige-reformulacao-de-modelo>. Acesso em: 22 jan. 2026.

O TEMPO. MetrôMinas conclui sondagem da Linha 3 do metrô. O Tempo, 2013. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/metrominas-conclui-sondagem-da-linha-3-do-metro-1.390809>. Acesso em: 8 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/ods/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

PALMA FILHO, E. A. O uso de sistema de custos referenciais na contratação de obras públicas subterrâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 6., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: CBT, 2025. Disponível em: <https://6cbt.tuneis.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Anais-PDF.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

PLANO DIRETOR DE TRANSPORTE SOBRE TRILHOS DAS LINHAS 2 E 3 DO METRÔ DE BELO HORIZONTE. [S. l.]: [s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://pt.scribd.com/presentation/118058406/Plano-Diretor-de-Transporte-sobre-Trilhos-das-Linhas-2-e-3-do-Metro-de-Belo-Horizonte>. Acesso em: 8 ago. 2025.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. BHGeo – Acervo cartográfico. Belo Horizonte: PBH, [s. d.]. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo/acervo-cartografico>. Acesso em: 8 ago. 2025.

ROCHA, H. C. Aspectos gerais e condicionantes do projeto básico da Linha 19 – Celeste do Metrô de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 6., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: CBT, 2025. Disponível em: <https://6cbt.tuneis.org.br/wp-content/uploads/2025/03/Anais-PDF.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2025.

VASCONCELLOS, E. A. Transporte Urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas. São Paulo: Annablume, 2001.

UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS (UITP). Metro systems around the world: capacity and performance. Brussels: UITP, 2018.

ANEXOS

Anexo A – Consolidação dos dados do relatório de sondagem do Metrominas

Anexo B – Relatório do RS2