

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS,
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E ALGORITMOS DE
AMOSTRAGEM INTELIGENTE PARA CONSTRUIR
MODELOS SUBSTITUTOS E CALCULAR A
PROBABILIDADE DE FALHA DE TÚNEIS URBANOS**

VINÍCIUS RESENDE DOMINGUES

**ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD
COORIENTADOR: LUAN CARLOS DE SENA MONTEIRO OZELIM, DSc**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Maio 2022

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

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS,
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E ALGORITMOS DE
AMOSTRAGEM INTELIGENTE PARA CONSTRUIR
MODELOS SUBSTITUTOS E CALCULAR A
PROBABILIDADE DE FALHA DE TÚNEIS URBANOS**

VINÍCIUS RESENDE DOMINGUES

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD
COORIENTADOR: LUAN CARLOS DE SENA MONTEIRO
OZELIM, DSc

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD 169/2022**

BRASÍLIA-DF: MAIO DE 2022

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

**UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS, INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL E ALGORITMOS DE AMOSTRAGEM INTELIGENTE
PARA CONSTRUIR MODELOS SUBSTITUTOS E CALCULAR A
PROBABILIDADE DE FALHA DE TÚNEIS URBANOS**

VINÍCIUS RESENDE DOMINGUES

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**LUAN CARLOS DE SENA MONTEIRO OZELIM, DSc (UnB)
(COORIENTADOR)**

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**NEUSA MARIA BEZERRA MOTA, DSc (FEUP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**JOSÉ ANTÔNIO SCHIAVON, PhD (ITA)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 31 de MAIO de 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

DOMINGUES, VINÍCIUS RESENDE

Utilização de Simulações Numéricas, Inteligência Artificial e Algoritmos de Amostragem Inteligente para Construir Modelos Substitutos e Calcular Probabilidade de Falha em Túneis Urbanos. [Distrito Federal] 2022.

xxii, 181 p. (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2022)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Risco em Túneis

2. Abordagem Probabilística

3. Abordagem Numérica

4. Inteligência Artificial

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DOMINGUES, V. R. (2022). Utilização de Simulações Numéricas, Inteligência Artificial e Algoritmos de Amostragem Inteligente para Construir Modelos Substitutos e Calcular Probabilidade de Falha em Túneis Urbanos. Tese de Doutorado, Publicação G-TD-169/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 181 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Vinícius Resende Domingues

TÍTULO: Utilização de Simulações Numéricas, Inteligência Artificial e Algoritmos de Amostragem Inteligente para Construir Modelos Substitutos e Calcular Probabilidade de Falha em Túneis Urbanos.

GRAU / ANO: Doutor / 2022

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

Vinícius Resende Domingues

SHIS QI 15 Conjunto 10 Casa 16, Lago Sul.

CEP: 71635-300, Lago Sul-DF-Brasil

A Deus, minha família e amigos. Estes são os que sempre me impulsionam em direção às vitórias dos meus desafios.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar força nos momentos difíceis e por estar sempre ao meu lado;

A minha esposa Patrícia Silveira de Freitas por sua maravilhosa companhia e apoio em todos os momentos;

As minhas filhas Lara Freitas Resende e Beatriz Freitas Resende por ressignificar minha vida e trazer alegria a cada amanhecer;

Aos meus pais José Renato Domingues de Souza e Ghislaine da Conceição Resende de Souza por estarem sempre presentes;

Ao eterno irmão e amigo João Paulo Resende Domingues pela amizade e por me acompanhar nos mais diversos caminhos da vida;

Ao Professor André Pacheco de Assis pela orientação, paciência e incentivo. Levarei a honra de ter sido seu aluno e a felicidade de ter convivido e aprendido tantas coisas contigo. Sou eternamente grato por toda confiança depositada e o tenho como um grande exemplo de professor, engenheiro e ser humano;

Ao meu amigo e coorientador Luan Carlos de Sena Monteiro Ozelim por ser parte fundamental na realização do sonho de concluir o doutorado. Tenho muito orgulho da nossa amizade, agradeço por toda paciência e pelas muitas lições compartilhadas. Cuidarei para mantermos as famílias sempre próximas;

A Professora Neusa Maria Bezerra Mota pelos anos de aprendizado, incentivo e amizade;

Aos meus amigos que contribuíram das mais diversas formas para a realização deste trabalho;

Ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e todos os seus professores, pela oportunidade de participar deste incrível programa e por compartilharem seus conhecimentos.

“Nenhuma grande vitória é possível sem que tenha sido precedida de pequenas vitórias sobre nós mesmos.”

L. M. Lenov

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E ALGORITMOS DE AMOSTRAGEM INTELIGENTE PARA CONSTRUIR MODELOS SUBSTITUTOS E CALCULAR A PROBABILIDADE DE FALHA DE TÚNEIS URBANOS

RESUMO

Quando é necessário avaliar, com uma abordagem probabilística, a interação dos túneis urbanos com as estruturas vizinhas, o poder computacional é um desafio importante para os modelos numéricos. Assim, algoritmos de amostragem inteligentes podem ser aliados na obtenção de um melhor conhecimento do domínio do resultado, mesmo que em posse de menos amostras. Ainda assim, quando a amostragem é limitada, a avaliação dos riscos do edifício também é restrita. É neste contexto que a inteligência artificial pode preencher uma importante lacuna na análise de risco, interpolando resultados e gerando amostras maiores em um curto espaço de tempo. Nesta tese foi utilizado um caso hipotético para validar a proposta metodológica. Trata-se da escavação sequencial, tipo NATM de um túnel, de três diâmetros de profundidade, interagindo com um edifício contendo sete pavimentos. Primeiro, o modelo numérico tridimensional (MEF) foi resolvido deterministicamente e, logo após, seu domínio e malha foram refinados. Posteriormente, outras 170 soluções foram obtidas numericamente a partir de um programa de elementos finitos, amostrando estrategicamente as variáveis aleatórias envolvidas. Sequencialmente, fundamentado em 31 técnicas de inteligência artificial, foram avaliadas quais variáveis eram de maior importância para prever a magnitude do deslocamento vertical nos elementos de fundação de um edifício afetado. Assim, uma vez selecionadas as variáveis mais importantes, as 31 técnicas de inteligência artificial foram novamente treinadas e testadas para definir aquela que apresenta um menor R-quadrado. Finalmente, usando este algoritmo de melhor ajuste, foi possível realizar o cálculo da probabilidade de falha usando amostras maciças, com tamanhos na ordem de 10^7 . Estas amostras foram utilizadas para verificar a convergência da amostragem simples de Monte Carlo e suas variações, além dos métodos semianalíticos FOSM, FORM e SORM. A principal contribuição é metodológica e, portanto, este novo procedimento pode ser utilizado em avaliações de risco, relacionados a túneis, no estado da arte.

COMBINING NUMERICAL SIMULATIONS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INTELLIGENT SAMPLING ALGORITHMS TO BUILD SURROGATE MODELS AND CALCULATE THE PROBABILITY OF FAILURE OF URBAN TUNNELS

ABSTRACT

When it is necessary to evaluate, with a probabilistic approach, the interaction of urban tunnels with neighboring structures, computational power is an important challenge for numerical models. Thus, intelligent sampling algorithms can be allies in obtaining a better knowledge of the result domain, even if in possession of a smaller number of samples. In any case, when sampling is limited, the evaluation of the building risks is also restricted. It is in this context that artificial intelligence can fill an important gap in risk analysis by interpolating results and generating larger samples in a short time. In this thesis a hypothetical case was used to validate the methodological proposal. It concerns the sequential excavation, as the NATM, of a tunnel, three-diameter deep, interacting with a building containing seven floors. First, the three-dimensional numerical model (FEM) was solved deterministically, and then its domain and mesh were refined. After that, another 170 solutions were numerically obtained from a FEM software, strategically sampling the random variables involved. Sequentially, based on the 31 artificial intelligence techniques, it was evaluated which variables were of greatest importance to predict the magnitude of vertical displacement in the foundation elements of a surrounding building. Then, once the most important variables were selected, the 31 artificial intelligence techniques were again trained and tested to define the one with the least R-squared. Finally, by using this best-fit algorithm, it was possible to perform the calculation of the probability of failure using massive samples, with sizes on the order of 10^7 . These samples were used to check the convergence of simple Monte Carlo sampling and its variations, as well as the semi-analytical FOSM, FORM, and SORM methods. The main contribution of this thesis is methodological; therefore, this new procedure can be aggregated to state-of-the-art risk assessment methodologies in tunnel-related problems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	3
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	3
2	TÚNEIS URBANOS	4
2.1	TÉCNICAS DE MELHORIA DO MACIÇO	4
2.1.1	APLICAÇÃO DE CONCRETO PROJETADO	5
2.1.2	APLICAÇÃO DE <i>JET GROUTING</i>	6
2.1.3	APLICAÇÃO DE ENFILAGENS TUBULARES INJETADAS	8
2.2	TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DO MACIÇO.....	10
2.2.1	ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL EM CALOTA-BANCADA	10
2.2.2	ESCAVAÇÃO GUIADA POR GALERIAS LATERAIS (<i>SIDE DRIFT</i>)	11
2.3	TUNELADORAS	12
2.4	INTERAÇÃO ENTRE OS TÚNEIS URBANOS E AS EDIFICAÇÕES	13
2.5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL EM TÚNEIS URBANOS	17
3	GERENCIAMENTO DE RISCOS.....	20
3.1	APLICAÇÃO NA GEOTECNIA	21
3.2	APLICAÇÃO NA ENGENHARIA TUNELEIRA.....	21
3.3	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	24
3.3.1	AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE RISCOS	24
3.3.2	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	26
3.3.3	MÉTODO DE MONTE CARLO E SUAS VARIAÇÕES	29
3.3.4	MÉTODOS SEMIANALÍTICOS: FOSM, FORM E SORM.....	39
3.4	CONSEQUÊNCIAS DA OCORRÊNCIA DO RISCO	45
4	TÉCNICAS MODERNAS DE CÁLCULO DE PROBABILIDADE DE FALHA EM TÚNEIS URBANOS.....	48

5	METODOLOGIA	53
5.1	SOLUÇÕES DETERMINÍSTICAS UTILIZADAS PARA CONSTRUIR MODELOS SUBSTITUTOS	54
5.2	SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE ENTRADA POR TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	57
5.3	TREINAMENTO E TESTES DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	58
5.4	AMOSTRAGEM MONTE CARLO PARA CALCULAR A PROBABILIDADE DE FALHA: AMOSTRAGEM SIMPLES.....	58
5.5	CONFIABILIDADE DAS TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM.....	60
6	PROBLEMA HIPOTÉTICO	63
6.1	MODELO INICIAL E SUAS CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	65
6.1.1	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E ESTRUTURAIS ADOTADOS.....	66
6.1.2	CARACTERÍSTICAS DA MALHA E DO DOMÍNIO	68
6.1.3	PROPRIEDADES DE CONTATO.....	71
6.2	MODELO NUMÉRICO OTIMIZADO.....	71
6.2.1	INFLUÊNCIA DA EDIFICAÇÃO.....	74
6.2.2	CONDIÇÃO DE CONTORNO: EMBOQUE E DESEMBOQUE.....	75
6.3	PARTICULARIDADES DO MODELO NUMÉRICO.....	77
6.3.1	ARTIFÍCIO PARA INCLUSÃO DO CONCRETO PROJETADO	77
6.3.2	SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS	79
7	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	81
7.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS.....	82
7.2	VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	84
7.3	AJUSTE DOS DADOS DE DISTORÇÃO ANGULAR.....	85
7.4	CONFIABILIDADE DAS TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM.....	86
8	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

A	SOLUÇÃO NUMÉRICA DO ESTUDO DE CASO	106
A.1	CONTEXTO DO ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO	107
A.2	SIMULAÇÃO INICIAL DO ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO	110
A.2.1	GEOMETRIA DO MODELO	110
A.2.2	PROPRIEDADES DO MODELO	118
A.2.3	MONTAGEM DO MODELO	120
A.2.4	PASSOS CONSTRUTIVOS	121
A.2.5	INTERAÇÕES	123
A.2.6	CARREGAMENTOS	126
A.2.7	MALHA	128
A.2.8	RESOLUÇÃO DO MODELO	131
A.2.9	VISUALIZAÇÃO DO RESULTADO	132
A.3	OTIMIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO INICIAL	134
A.3.1	REFINAMENTO DO DOMÍNIO	135
A.3.2	REFINAMENTO DA MALHA	141
A.3.2.1	REFINAMENTO DA MALHA DO MACIÇO	143
A.3.2.2	REFINAMENTO DA MALHA DO CONCRETO PROJETADO	152
A.3.2.3	REFINAMENTO DA MALHA DO EDIFÍCIO	157
A.4	IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS	162
A.4.1	CÓDIGO PARA ESTRUTURAR O CONJUNTO DAS AMOSTRAS	162
A.4.2	CÓDIGO PARA SER EXECUTADO NO PROGRAMA ABAQUS	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Diâmetro de coluna para cada sistema de <i>jet grouting</i> (Carletto, 2009)	8
Tabela 2.2. Danos causados a edificações segundo a proposta de Bjerrum (1963), modificada por Burland e Wroth (1974)	17
Tabela 3.1. Técnicas de amostragem para aplicação no estudo de caso hipotético	31
Tabela 3.2. Análise qualitativa das variáveis técnicas do gerenciamento de risco	46
Tabela 6.1. Resumo das dimensões da estrutura proposta para o edifício	63
Tabela 6.2. Resumo dos intervalos propostos para os parâmetros de entrada do modelo	67
Tabela 6.3. Resumo comparativo do modelo inicial e otimizado	73
Tabela 7.1. Influência entre sapatas	82
Tabela 7.2. Importância relativa de cada parâmetro	83
Tabela 7.3. Ranqueamento das variáveis aleatórias	85
Tabela 7.4. Comparativo numérico da convergência das técnicas de amostragem	93
Tabela A.1. Resumo das dimensões da estrutura proposta para o edifício	107
Tabela A.2. Resumo da condição geoestática	123
Tabela A.3. Limites estabelecidos para restrição de deslocamento	141
Tabela A.4. Malhas analisadas para o maciço.....	143
Tabela A.5. Variações nos tamanhos das subdivisões da malha.....	144
Tabela A.6. Informações sobre as malhas e os tempos de processamento na perspectiva de refinamento do maciço	146
Tabela A.7. Localização dos pontos de controle para o refinamento da malha no maciço e concreto projetado	147
Tabela A.8. Deslocamentos (U , <i>Magnitude</i>) nos pontos de controle ao final da escavação – refinamento do maciço	147
Tabela A.9. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do maciço: final da escavação.....	150

Tabela A.10. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do maciço: final da escavação.....	151
Tabela A.11. Malhas analisadas para o concreto projetado	152
Tabela A.12. Informações sobre as malhas e os tempos de processamento na perspectiva do refinamento do concreto projetado.....	153
Tabela A.13. Deslocamentos (U , $Magnitude$) nos pontos de controle ao final da escavação na perspectiva do refinamento do concreto projetado	154
Tabela A.14. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do concreto projetado: final da escavação	155
Tabela A.15. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do concreto projetado: final da escavação	156
Tabela A.16. Malhas analisadas para o edifício.....	157
Tabela A.17. Informações sobre as malhas e os tempos de processamento na perspectiva do edifício.....	158
Tabela A.18. Deslocamentos (U , $Magnitude$) nos pontos de controle ao final da escavação – refinamento do edifício	159
Tabela A.19. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós – refinamento do edifício: final da escavação	160
Tabela A.20. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do edifício: final da escavação	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Curva de reação do maciço com e sem aplicação de melhoria (Oreste & Peila, 2001 <i>apud</i> Domingues, 2016).	5
Figura 2.2. Processo executivo do <i>jet grouting</i> em condições sub-horizontais (Koshima, 2013).	7
Figura 2.3. Sistemas de aplicação do <i>jet grouting</i> (modificado de Vergara, 2013).	8
Figura 2.4. Ilustração esquemática da execução de enfilagens tubulares longitudinais (Keller Tecnogeo, 2020).	9
Figura 2.5. Ilustração esquemática da escavação sequencial em calota-bancada (Cecílio Júnior, 2009).	11
Figura 2.6. Execução da técnica de galerias laterais (<i>side-drift</i>). (a) avanço da escavação piloto; (b) instalação do sistema de suporte parcial (Sauer, 1992).	12
Figura 2.7. EPB utilizada na abertura dos túneis da Linha 4 do metrô de São Paulo (Assis, 2014a).	13
Figura 2.8. Comportamento da plastificação da seção de escavação do túnel até a superfície (Wong e Kaiser, 1991 <i>apud</i> Guerrero, 2014).	14
Figura 2.9. Influência da escavação de túneis nas edificações construídas sobre a linha de superfície (Burland <i>et al.</i> , 1974 <i>apud</i> Guerrero, 2014).	15
Figura 2.10. Categorias de dano para edifícios com largura igual a altura e submetidos a esforços de tração (modificado de Burland, 1995 <i>apud</i> Mair <i>et al.</i> , 1996).	16
Figura 2.11. Concentração de deslocamentos verticais no emboque: a) Perspectiva 1; b) Perspectiva 2 (modificado de Lu <i>et al.</i> , 2018).	19
Figura 3.1. Fluxograma proposto para o processo de avaliação dos riscos (ISO 31.000 1999 <i>apud</i> Holický <i>et al.</i> 2007).	22
Figura 3.2. Esquema de aplicação prática do conceito de risco (Assis, 2014b).	23
Figura 3.3. Consolidação das etapas necessárias para a determinação da confiabilidade das estruturas	25
Figura 3.4. Função densidade de probabilidade $f_R(r)$ e $f_Q(q)$ (Ang e Tang, 1984).	26

Figura 3.5. Ilustração do conceito de estado-limite e densidade de probabilidade conjunta (Modificado - Du, 2005).	28
Figura 3.6. Histograma de frequência: a) Amostragem simples; b) Amostragem por variáveis antitéticas; e c) Amostragem por hipercubo latino (modificado de Santos, 2014).	31
Figura 3.7. Convergência da probabilidade de falha pela simulação de Monte Carlos Bruto, em um exemplo abstrato apresentado em Santos (2014).	32
Figura 3.8. Ilustração da aplicação da técnica de amostragem estratificada para duas variáveis aleatórias (Hurtado e Barbat, 1998 <i>apud</i> Santos, 2014).	34
Figura 3.9. Ilustração da aplicação da técnica de amostragem por hipercubo latino para duas variáveis aleatórias (Hurtado e Barbat, 1998 <i>apud</i> Santos, 2014).	35
Figura 3.10. Exemplificação da amostragem por hipercubo latino para duas variáveis aleatórias e cinco realizações (Olsson <i>et al.</i> , 2003 <i>apud</i> Santos, 2014).	36
Figura 3.11. Comparativo da convergência do Monte Carlo Bruto com a Amostragem por Importância utilizando pontos de projeto: a) Ambas as técnicas no mesmo gráfico; e b) Ênfase nos resultados obtidos para a amostragem inteligente (modificado de Santos, 2014).	38
Figura 3.12. Definição do índice de confiabilidade (Alves, 2014).	41
Figura 3.13. Transformação aplicada ao método FORM (Modificado - Sakamoto, 2016).	42
Figura 3.14. Iteração proposta pelo algoritmo HLRF (Santos, 2012).	43
Figura 3.15. Comparação entre FORM e SORM (Modificado - Du, 2005).	45
Figura 4.1. Construção de modelos substitutos como alternativa a resoluções numéricas robustas.	51
Figura 5.1. As quatro macro etapas da metodologia proposta.	53
Figura 5.2. Detalhamento da proposta metodológica com a combinação do programa ABAQUS®, de um código do Python® e técnicas de inteligência artificial.	54
Figura 5.3. Estruturação para solução determinística do caso hipotético.	56
Figura 5.4. Ilustração do método da transformação inversa para uma distribuição exponencial.	59
Figura 6.1. Geometria da estrutura proposta para o edifício.	64
Figura 6.2. Seção transversal do túnel proposto para o caso hipotético.	65

Figura 6.3. Modelo inicialmente proposto para o caso hipotético.	66
Figura 6.4. Subdivisão do domínio proposta para o refinamento da malha.	69
Figura 6.5. Caminhos de controle atribuídos para otimização do domínio no Eixo X.	70
Figura 6.6. Pontos de controle atribuídos para otimização do domínio no Eixo Y.....	71
Figura 6.7. Modelo otimizado do caso hipotético.	72
Figura 6.8. Comparação visual entre o modelo inicial e a versão otimizada.	73
Figura 6.9. Deslocamentos verticais obtidos no modelo inicial e na versão otimizada.	74
Figura 6.10. Condições prévias a escavação: (a) condição geoestática; e (b) inclusão do edifício e do carregamento de 1 kPa nas lajes.	75
Figura 6.11. Análise da influência do emboque e desemboque.	76
Figura 6.12. Inclusão de uma nova camada de concreto projetado no maciço escavado.	78
Figura 6.13. Ilustração da camada de sacrifício com 0,50 m de espessura.	78
Figura 6.14. Processo construtivo com o uso da camada de sacrifício: (a) passo de escavação intermediário; (b) escava-se 1,50 m e libera o maciço para deformar; e (c) substitui a camada de sacrifício deformada por uma nova, similar, junto ao concreto projetado.	79
Figura 7.1. Identificação dos elementos de fundação de tempo.....	81
Figura 7.2. Relevância das variáveis aleatórias no deslocamento vertical das Sapatas A e D. 83	83
Figura 7.3. Calibração e teste da inteligência artificial para previsão dos deslocamentos verticais da Sapata A.....	84
Figura 7.4. Calibração e teste da inteligência artificial para previsão dos deslocamentos verticais da Sapata D.....	85
Figura 7.5. Distribuição mais adequada para os dados de distorção angular.....	86
Figura 7.6. Probabilidade de falha aferida por diferentes técnicas de amostragem.	88
Figura 7.7. Calibração e teste da inteligência artificial simplificado para previsão dos deslocamentos verticais da Sapata A.....	89
Figura 7.8. Probabilidade de falha aferida pelas técnicas de Monte Carlos e suas variações.. 89	89
Figura 7.9. Probabilidade de falha com ajuste fundamentado na distribuição normal.	90

Figura 7.10. Diferença percentual das técnicas de amostragem para o resultado assintótico..	91
Figura 7.11. Diferença percentual das técnicas de Monte Carlo e suas variações.	92
Figura 7.12. Diferença percentual das técnicas de Monte Carlo e suas variações.	92
Figura A.1. Macro etapas realizadas para obtenção de soluções determinísticas.	106
Figura A.2. Estruturação proposta para este apêndice.	106
Figura A.3. Geometria da estrutura proposta para o edifício.	108
Figura A.4. Seção transversal do túnel proposto para o caso hipotético.....	108
Figura A.5. Modelo inicialmente proposto para o caso hipotético.	109
Figura A.6. Módulos utilizados no programa ABAQUS ® e detalhados no Apêndice A.	110
Figura A.7. Importação de desenho em formato “.sat”.	111
Figura A.8. Configuração das <i>Parts</i> importadas.	111
Figura A.9. Gerenciador das <i>Parts</i> importadas.	112
Figura A.10. <i>Set</i> atribuído ao concreto projetado completo.....	113
Figura A.11. <i>Sets</i> para as condições de contorno do concreto projetado: a) faces impedidas de deslocar no Eixo X; e (b) faces impedidas de deslocar no Eixo Y.	113
Figura A.12. Área de contato entre o concreto projetado e o maciço.	113
Figura A.13. Exemplo de <i>Sets</i> para inclusão parcial do concreto projetado e da camada de sacrifício: a) Ilustração do <i>Set</i> a ser acionado na escavação da primeira calota; e (b Ilustração do <i>Set</i> a ser acionado na escavação do primeiro arco invertido.	114
Figura A.14. <i>Set</i> atribuído ao edifício completo.	114
Figura A.15. <i>Sets</i> para as condições de contorno do edifício: faces impedidas de deslocar no Eixo X.	115
Figura A.16. <i>Set</i> atribuído para a base dos elementos de fundação do edifício.	115
Figura A.17. <i>Set</i> atribuído para as lajes do edifício submetidas ao carregamento.	115
Figura A.18. <i>Sets</i> para as condições de contorno do maciço: a) faces impedidas de deslocar no Eixo X; (b) faces impedidas de deslocar no Eixo Y; e c) face engastada.	116
Figura A.19. Exemplo de <i>Set</i> atribuído ao Horizonte 1 do maciço.....	116

Figura A.20. <i>Set</i> atribuído à superfície do maciço que terá contato com o edifício.....	116
Figura A.21. <i>Set</i> do maciço para o contato com o concreto projetado.....	117
Figura A.22. Exemplo dos <i>Sets</i> atribuídos à escavação parcializada do maciço: a) escavação da primeira calota; (b) escavação do primeiro núcleo; e c) escavação do primeiro arco invertido.	117
Figura A.23. Opções para criação de <i>Sets</i> e <i>Surfaces</i>	117
Figura A.24. Opções para atribuição do modelo constitutivo ao material.	118
Figura A.25. Exemplo de atribuição das propriedades para um material com o comportamento guiado pelo modelo de Mohr Coulomb.....	119
Figura A.26. Atribuição de seção sólida e homogênea aos materiais.	119
Figura A.27. Atribuição de seção aos <i>Sets</i> pré-estabelecidos.	120
Figura A.28. Montagem do modelo no módulo <i>Assembly</i>	120
Figura A.29. Criação de um novo passo construtivo com destaque aos tipos <i>Geostatic</i> e <i>Static General</i>	121
Figura A.30. Ilustração das 264 partições (P) de escavação do túnel, dentro das 88 seções transversais (ST).....	122
Figura A.31. Exemplo de atribuição das condições geoestáticas ao Horizonte 1.....	123
Figura A.32. Contato entre o concreto projetado e o maciço.....	124
Figura A.33. Contato entre o edifício e o maciço.	124
Figura A.34. Comportamento tangencial para o contato entre o edifício e o maciço.....	125
Figura A.35. Comportamento normal para o contato entre o edifício e o maciço.	125
Figura A.36. Adição da interação no <i>Step</i> 1 “ <i>Initial</i> ”.	126
Figura A.37. Definição da atuação da gravidade.	126
Figura A.38. Aplicação de 1.000 Pa nas lajes do edifício.....	127
Figura A.39. Ilustração dos carregamentos impostos ao modelo.....	127
Figura A.40. Definição das restrições de deslocamento e rotação nas fronteiras.	128

Figura A.41. Formas dos elementos adotados na simulação inicial: (a) elementos hexaédricos ao concreto projetado e a camada de sacrifício; e (b) elementos tetraédricos atribuídos adotados maciço e edifício.	129
Figura A.42. Características atribuídas aos elementos: (a) elementos hexaédricos; e (b) elementos tetraédricos.	129
Figura A.43. Definição do tamanho global dos elementos geométricos.	130
Figura A.44. Visão geral da malha gerada na simulação inicial.	130
Figura A.45. Atribuição das condições para resolução do modelo.	131
Figura A.46. Opções do <i>Job</i> criado.	131
Figura A.47. Função <i>Monitor</i> do <i>Job</i>	132
Figura A.48. Opções de visualização dos resultados de tensão-deslocamento.	133
Figura A.49. Aba de ferramentas do módulo <i>Visualization</i>	133
Figura A.50. Configurações do computador utilizado nas simulações de otimização.	134
Figura A.51. Caminhos de controle avaliados na direção do Eixo X.	135
Figura A.52. Criação dos caminhos de controle no Eixo X.	136
Figura A.53. Obtenção dos resultados de deslocamento para o caminho criado.	136
Figura A.54. Exemplo de obtenção dos resultados do <i>Path</i> em planilha eletrônica.	137
Figura A.55. Deslocamentos ao longo dos caminhos de controle do Eixo X.	137
Figura A.56. Pontos de controle atribuídos para otimização do domínio no Eixo Y.	138
Figura A.57. Criação dos pontos de controle para o Eixo Y.	139
Figura A.58. Deslocamentos ao longo dos pontos de controle do Eixo Y.	139
Figura A.59. Controle para otimização do Eixo Y: ilustração das 264 partições (P) de escavação do túnel, dentro das 88 seções transversais (ST).	140
Figura A.60. Geometria após otimização do domínio.	141
Figura A.61. Divisão da geometria otimizada em quatro quadrantes.	142
Figura A.62. Seleção das regiões de interesse para refinamento da malha.	143
Figura A.63. As sete malhas analisadas para o maciço com domínio otimizado.	145

Figura A.64. Tempo de cálculo e número de nós para as sete diferentes malhas do maciço.	146
Figura A.65. Deslocamentos (U , $Magnitude$), no refinamento do maciço, com destaque para as variações de 1 mm: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.....	148
Figura A.66. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós – refinamento do maciço: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.....	150
Figura A.67. Desvios percentuais em avanço do deslocamento, para o refinamento do maciço, nos pontos de controle: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.....	151
Figura A.68. Tempo de cálculo e número de nós para as seis diferentes malhas do concreto projetado.....	153
Figura A.69. Deslocamentos (U , $Magnitude$), no refinamento do concreto projetado, com destaque para as variações de 1 mm: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.	154
Figura A.70. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós – refinamento do concreto projetado: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.	155
Figura A.71. Desvios percentuais em avanço do deslocamento, para o refinamento do maciço, nos pontos de controle: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.....	156
Figura A.72. Tempo de cálculo e número de nós para as cinco diferentes malhas do edifício.	158
Figura A.73. Deslocamentos (U , $Magnitude$), no refinamento do edifício, com destaque para as variações de 1 mm.....	159
Figura A.74. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do edifício.	160
Figura A.75. Desvios percentuais em avanço do deslocamento, para o refinamento do edifício, nos pontos de controle.....	161
Figura A.76. Modelo com geometria e malha otimizada.	162

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIATURAS

Ø – Diâmetro;
β – Índice de confiabilidade;
2D – Duas dimensões;
3D – Três dimensões;
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AI – Amostragem Inteligente;
CCPH – *Cement Churning Pile Horizontal*;
CHILE – Contínuo, Homogêneo, Isotrópico, Linear e Elástico;
CRM – Curva de Reação do Maciço;
CV – Coeficiente de Variação;
ELS – Estado Limite de Serviço;
ELU – Estado Limite Último;
EPB – *Earth Pressure Balance*;
FORM – *First-Order Reliability Methods*;
FOSM – *First-Order Second-Moment*;
IA – Inteligência Artificial;
IC – Índice de Confiabilidade;
Jet 1 – Jato Simples;
Jet 2 – Jato Duplo;
Jet 3 – Jato Triplo;
LHS – *Latin Hypercube Sampling*;
MC – Amostragem por Monte Carlo;
MEF – Método dos Elementos Finitos;
NATM – *New Austrian Tunnel Method*;
NBR – Norma Brasileira;
N_{SPT} – Índice de resistência à penetração;
PMBOK – *Project Management Body of Knowledge*;
PMI – *Project Management Institute*;
P_F – Probabilidade de falha;
SORM – *Second-order reliability method*;
SPB – *Slurry Pressure Balance*;
SPT – *Standard Penetration Test*;
TBM – *Tunnel Boring Machines*.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a concentração nos centros urbanos aumentaram os desafios relacionados à compreensão da interação ideal entre as pessoas e as cidades. É consentimento que, para um bom funcionamento das cidades, necessita-se ter sucesso na mobilidade urbana (pessoas, carros, água, esgoto, eletricidade, dentre outros) e na logística de bens. Somado a isso, aparece também a necessidade de obter uma boa relação entre o crescimento urbano e a preservação do meio ambiente.

Para proporcionar mobilidade e uma boa condição logística no meio urbano, são necessárias intervenções para a construção de obras de infraestrutura. Em um primeiro momento, as construções desordenadas foram predominantes e resultaram na segregação de áreas importantes anteriormente habitadas pela população. Como exemplo dessas intervenções, é possível mencionar a substituição de praças por viadutos e estacionamentos.

Considerando esse cenário e a necessidade de restauração do espaço de superfície, o crescimento da demanda por obras subterrâneas é evidenciado. Esse tipo de obra tem sido utilizado tanto para restauração de áreas desordenadamente ocupadas quanto para ampliar as obras de infraestrutura existentes.

As obras subterrâneas envolvem todas as estruturas construídas abaixo da linha de superfície e podem ser subdivididas em quatro grandes categorias, sendo elas: túneis, galerias, cavernas e poços. Os túneis, objeto de estudo desta tese, podem ser definidos como escavações abaixo da linha de superfície, geralmente com tendência horizontalizada, com a existência de dois portais e área de seção transversal de escavação mínima de 2 m². Entretanto, para esse tipo de obra subterrânea, quando a área escavada é menor que 2 m², a nomenclatura passa a ser de micro túneis, que por limitações executivas devem ser escavados por tecnologia não tripulada. Com base nas definições citadas acima, extraídas de Assis (2014a), a pesquisa atribui ênfase aos túneis, em especial aos túneis urbanos.

Os túneis urbanos, em geral, são escavados em maciços de baixa competência geomecânica e muito rasos, apresentando relevante influência recíproca entre o túnel e as estruturas lindeiras. Nestes casos, a interação da escavação com o maciço costuma ser problemática. Assim, dentre outros fatores, as técnicas construtivas devem levar em conta a estabilidade do túnel e os recalques aceitáveis nas estruturas vizinhas afetadas.

Os impactos causados pela escavação devem ser medidos por um sistema de monitoramento, permitindo a identificação de riscos decorrentes do processo de escavação. Mair *et al.* (1996) propõem uma metodologia para a classificação dos perigos nas estruturas vizinhas. Com base nessa proposta, é possível adotar medidas preventivas que levem a maior segurança e probabilidade de sucesso. Como contribuições adicionais, Ghorbani *et al.* (2012), Pamukcu (2015) e Huang e Zhang (2015) enfatizam a importância de monitorar as escavações em áreas urbanas. Mais recentemente, Liu *et al.* (2017) propõem uma abordagem numérica e probabilística em um estudo de caso do metrô de Wuhan, na China.

O risco é inerente a todas as obras de engenharia e pode ser entendido como a chance de um acontecimento, benéfico ou danoso, impactar nos objetivos propostos inicialmente. Para esta tese, o enfoque será dado às consequências negativas de um determinado evento. Ademais, em termos práticos, a métrica de risco é definida como o produto entre a probabilidade de falha e as subsequentes consequências que decorrem desse evento.

As consequências de uma falha em uma obra tuneleira estão estritamente relacionadas às condições locais e, portanto, devem ser analisadas caso a caso. É necessário avaliar os impactos diretos e indiretos da falha e, posteriormente, quantificá-los em forma de impacto financeiro.

Por outro lado, a avaliação da probabilidade de ocorrência é relativamente independente do caso em análise, permitindo a proposta de metodologias que podem ser adaptadas com apenas ligeiras modificações. Nesse contexto, esta tese apresenta uma nova metodologia de análise de risco para túneis urbanos, dando especial ênfase ao processo de cálculo da probabilidade de falha.

Considerando que as soluções analíticas raramente são aplicáveis a casos práticos, o ponto de partida foi a realização de simulações numéricas pelo método dos elementos finitos. Em uma estrutura de avaliação de risco, ao considerar o grande esforço computacional requerido pela combinação das análises numéricas e dos métodos estatísticos, abordagens de otimização desse fluxo de cálculo, com inteligência artificial, serão objeto de estudo e tratados com maior profundidade nos capítulos seguintes.

Por fim, para consolidar os conhecimentos teóricos e ilustrar a aplicação da metodologia desenvolvida, é analisada uma aplicação prática dos conceitos em um caso hipotético. Analisa-se, com especial ênfase, a nova proposta de metodologia e como ela permite uma análise quantitativa de riscos que equilibra esforço computacional (tempo de processamento) com precisão e acurácia.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A infraestrutura existente na maior parte dos grandes centros urbanos foi sendo remodelada, em carácter emergencial, à medida que a população ali presente crescia em maior escala. Em diversos casos, essas construções desordenadas segregaram áreas de convivência social.

Ao se deparar com este tipo de ambiente urbano complexo, a solução de restauração que se mostrou globalmente eficiente é a concentração das obras de infraestrutura no espaço subterrâneo. Assim, a superfície permanece disponível para ser utilizada, especialmente, para fins de moradia e trabalho.

O êxito nessa solução de restauração de grandes cidades acarretou, como consequência, um notório aumento na demanda por túneis urbanos. O desafio na definição da solução construtiva destas obras tuneleiras usualmente está relacionado às características geomecânicas desfavoráveis, à necessidade de execução em pequenas profundidades e ao impacto em estruturas lindeiras. Ao somar estes três fatores, as consequências do insucesso são comumente altas e, por isso, o conhecimento de técnicas de análise de risco é relevante.

Como contribuição a engenharia de túneis, a partir da combinação de análises numéricas com ferramentas estatísticas e inteligência artificial, aplicadas a um problema hipotético, este trabalho servirá de referência aos que buscam garantir maior confiabilidade nas obras subterrâneas. Isto mediante a possibilidade de analisar, com uma profundidade estatística desejável, casos complexos de túneis urbanos.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa é propor uma nova metodologia de cálculo de probabilidade de falha de túneis urbanos que seja capaz de equilibrar esforço computacional (tempo de processamento) com precisão e acurácia. Isto é relevante ao considerar que os problemas numéricos de túneis urbanos podem ter como impedimento a capacidade computacional, quando da necessidade de gerar uma elevada amostragem de resultados.

Os objetivos específicos, por sua vez, são: compilar metodologias de cálculo de probabilidade de falha aplicadas as obras de túneis urbanos com intervenções na vizinhança; propor metodologia de cálculo de probabilidade de falha com modelos substitutos que são fundamentados no uso de um programa comercial de elementos finitos, inteligência artificial e algoritmos de amostragem inteligente; analisar a convergência dos métodos de amostragem ao resultado de Monte Carlo Bruto.

2 TÚNEIS URBANOS

A construção de túneis em ambientes urbanos geralmente está relacionada a escavações em maciços de baixa competência geomecânica, rasos e com relevante influência sobre as estruturas lindeiras. Por este motivo, especialmente em escavações por métodos convencionais ou sequenciais, tipo o NATM (*New Austrian Tunnelling Method*), a solução construtiva usualmente inclui técnicas de estabilização e melhoria provisória e/ou permanente do maciço que sofrerá a intervenção.

No que se refere à melhoria do maciço, destacam-se técnicas exitosas e consagradas na construção de túneis urbanos, tais como: aplicação de concreto projetado, aplicação de *jet grouting* e execução de enfilagens tubulares injetadas. Com relação às técnicas de estabilização, será atribuída ênfase a escavação sequencial e a galerias laterais (*side drift*). Além disso, também é importante mencionar a possibilidade de utilização de métodos mecanizados, com emprego de tuneladoras, para construção de túneis urbanos.

Por fim, unindo os conhecimentos teóricos e a aplicação prática, destaca-se a exposição de casos históricos nas publicações de Valdenebro e Gimena (2018), Wu e Huang (2020), Hao *et al.* (2021), Wei *et al.* (2021), Zhou *et al.* (2021) entre outros.

2.1 TÉCNICAS DE MELHORIA DO MACIÇO

Na escavação de túneis, a aplicação das técnicas de melhoria das propriedades mecânicas dos solos e/ou rochas tem estreita relação com a Curva de Reação do Maciço (CRM). A CRM está relacionada aos parâmetros físicos e mecânicos, ao nível de tensões na profundidade de escavação e ao raio do túnel. Como pode-se observar na Figura 2.1, ao aplicar-se uma técnica de melhoria do maciço é esperada uma diminuição dos recalques na zona de intervenção.



Figura 2.1. Curva de reação do maciço com e sem aplicação de melhoria (Oreste & Peila, 2001 *apud* Domingues, 2016).

Dentre as diversas técnicas de melhoria que podem ser utilizadas com o intuito de reduzir os recalques na zona de intervenção do maciço e, como já mencionado, destacam-se: aplicação de concreto projetado, aplicação de *jet grouting* e execução de enfilagens tubulares injetadas. Essas técnicas são descritas na sequência, com enfoque na aplicação em obras tuneleiras.

2.1.1 APLICAÇÃO DE CONCRETO PROJETADO

A aplicação de concreto projetado é um método consagrado de melhoria do maciço para construção de túneis e tem como característica relevante a facilidade de fabricação e execução. A técnica construtiva consiste na aplicação do material na superfície do túnel escavado, com auxílio de um mangote. Este método abrange dois sistemas distintos de projeção, que são: o processo via seca e o processo via úmida. No processo via seca tem-se uma mistura, com pouca umidade, de cimento e agregados que é transportada até o bico de projeção, onde é acrescentada a água e os aditivos. Com relação ao processo via úmida, a mistura é previamente acrescida de água e, no bico de projeção, acrescenta-se o aditivo acelerador de pega líquido (Domingues, 2016).

O concreto projetado pode ser utilizado como uma rápida solução para o suporte do maciço. Este material pode exercer a função de revestimento primário e/ou definitivo de túneis. Com

relação à escolha do método a ser aplicado (via seca ou úmida), ambos apresentam vantagens e desvantagens. Ainda assim, pode-se dizer, de forma genérica e resumida, que o método de aplicação por via seca é adequado à aplicação de pequenos volumes, enquanto por via úmida é preferível à utilização em necessidades de médios a grandes volumes, além de gerar um produto mais homogêneo, de menor índice de reflexão e ambientalmente favorável (menor emissão de poluentes durante a aplicação). Em geral, como armadura convencional do concreto projetado, pode ser utilizada tela eletrossoldada ou a adição de fibras metálicas de aço.

O emprego dessa técnica no Brasil deve ser embasado na norma brasileira de especificação de concreto projetado ABNT NBR 14026 (ABNT, 2012). Dentre outros itens, a norma designa as responsabilidades atribuídas ao projeto, à execução e ao controle de qualidade, além de atribuir quesitos de aceitabilidade e rejeição do material empregado na obra. Por fim, dentre as etapas de fiscalização do serviço, ressalta-se a importância do reconhecimento da resistência do concreto aplicado (f_{ck}), a fim de obterem-se valores que atendam aos requisitos de projeto.

2.1.2 APLICAÇÃO DE *JET GROUTING*

A aplicação de *jet grouting* tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas do solo, atuando também na diminuição da deformabilidade e permeabilidade do maciço. Essa técnica consiste no jateamento a alta velocidade de um fluido composto por calda de cimento, feito por meio de bicos de pequeno diâmetro dispostos lateralmente na extremidade de uma composição de hastes. Devido à elevada pressão a que o processo é submetido, o fluido é capaz de afastar o solo e formar colunas cimentantes que apresentam propriedades mecânicas melhores que as do maciço antes de sofrer a intervenção. A forma geométrica de uma coluna cilíndrica é justificada pelo movimento das hastes de maneira rotacional, a velocidade constante, que origina corpos de prova de solo-cimento. Dessa forma, denomina-se *jet grouting* as novas estruturas que passam a compor o maciço.

O tratamento do maciço pela aplicação do *jet grouting* pode ser executado em diversas inclinações, incluindo as injeções verticais e horizontais. Este método não apresenta restrições com relação à granulometria e, tampouco, às condições hidráulicas do maciço. Portanto, além de ser uma técnica consagrada no segmento tuneleiro, o *jet grouting* apresenta uma relevante versatilidade e é também utilizado em diversas áreas da geotecnia. Na Figura 2.2 apresenta-se, de forma genérica, o processo construtivo do *jet grouting* em condições sub-horizontais.

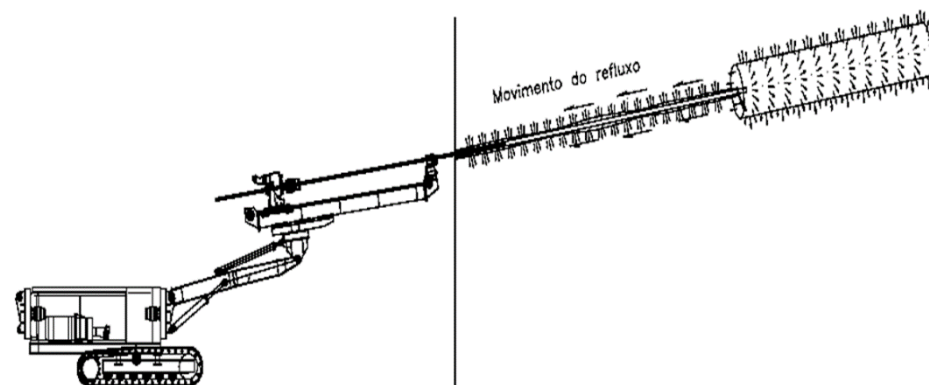


Figura 2.2. Processo executivo do *jet grouting* em condições sub-horizontais (Koshima, 2013).

De forma genérica, o processo executivo pode ser subdividido nas seguintes fases: corte, mistura, substituição parcial e cimentação. Em um contexto generalizado, a técnica de *jet grouting* levou ao desenvolvimento de três sistemas que se diferem, essencialmente, nos elementos e parâmetros utilizados para desagregação do solo e mistura deste com a calda de cimento. A particularidade da obra irá definir o sistema que será utilizado, sendo eles: jato simples (Jet 1), jato duplo (Jet 2) e jato triplo (Jet 3) (Domingues, 2016).

O sistema de jato simples (Jet 1) é executado com a ação de um ou mais injetores horizontais que bombeiam a calda de cimento a altas velocidades (na ordem de 200 m/s) para desagregar e misturar o solo com a calda. Esse tratamento é indicado para solos com baixa resistência a penetração do amostrador do ensaio SPT, em linhas gerais com N_{SPT} menor que 10 golpes/30 cm, pois o desempenho pode ser prejudicado na ocorrência de materiais densos.

O sistema de jato duplo (Jet 2) difere-se do sistema de jato simples devido à utilização de ar comprimido ou água juntamente a calda de cimento. Essa combinação proporciona colunas com maiores dimensões e podem ser empregados em solos não coesivos sem restrição de compactidade ($N_{SPT} < 50$ golpes/30 cm). Com relação ao emprego do jato duplo (Jet 2) em solos coesivos, este é usualmente restrito a valores de N_{SPT} inferiores a 10 golpes/30 cm.

Com relação ao jato triplo (Jet 3), este pode ser tido como o mais complexo dos três e é capaz de separar o processo de erosão do terreno do processo de preenchimento e mistura da calda com o solo desagregado. São utilizadas três varas coaxiais diferentes por onde circulam separadamente a água, o ar e a calda de cimento. No Jet 3, os bicos de injeção são posicionados

em níveis diferentes. A aplicabilidade deste sistema é condizente com solos não coesivos ou coesivos de baixa resistência à penetração ($N_{SPT} < 15$ golpes/30 cm).

Por fim, para ilustrar os conceitos supracitados, na Figura 2.3 apresentam-se de forma esquemática os sistemas de jato simples (Jet 1), jato duplo (Jet 2) e jato triplo (Jet 3).

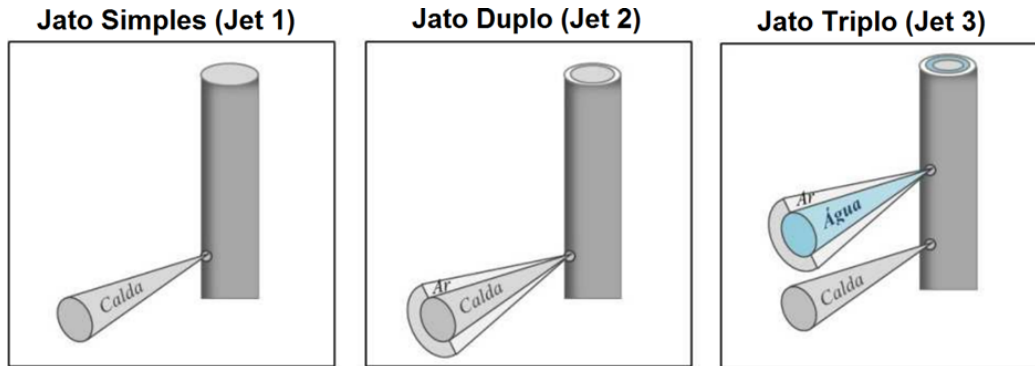


Figura 2.3. Sistemas de aplicação do *jet grouting* (modificado de Vergara, 2013).

Na Tabela 2.1 apresenta-se uma síntese da ordem de grandeza da dimensão das colunas executadas com cada um dos métodos supracitados.

Tabela 2.1. Diâmetro de coluna para cada sistema de *jet grouting* (Carletto, 2009)

Sistema de	Jato Simples (Jet 1)	Jato Duplo (Jet 2)	Jato Triplo (Jet 3)
<i>Jet Grouting</i>	0,4 – 0,8 m	0,9 – 1,8 m	1,9 – 3,0 m

2.1.3 APLICAÇÃO DE ENFILAGENS TUBULARES INJETADAS

A melhoria do maciço por meio da inserção de enfilagens tubulares injetadas consiste na formação de um sistema de pré-suporte para as zonas do maciço que apresentam resistência mecânica aquém da que foi designada em projeto. Este tratamento é comumente utilizado em áreas de emboque de túneis, pois é consenso no meio técnico que emboques devem sempre ser objetos de atenção especial e projetos específicos. A peculiaridade destas regiões, basicamente, é decorrente do inevitável desconfinamento promovido pelas escavações anteriores (acessos) e devido à baixa cobertura, que resultam em carregamentos assimétricos e/ou concentrados. Além

disso, acrescenta-se o fato natural e inevitável de que, no início da obra, as equipes não se encontram plenamente preparadas e, sobretudo, familiarizadas com o comportamento do maciço.

As enfilagens são compostas por perfurações sub-horizontais de tubos preenchidos por calda de cimento. Estas perfurações são executadas acima da abóbada do túnel e acarretam em uma redistribuição das cargas na direção longitudinal, diminuindo as deformações induzidas pela escavação. No caso do emprego desta técnica em escavações NATM é possível executar uma sobreposição sucessiva de enfilagens, ou seja, cada etapa de escavação pode ser precedida pela inserção de enfilagens caso o maciço requeira este tratamento. De acordo com Peila e Pelizza (2005) *apud* Vergara (2013), a enfilagem trabalha combatendo, principalmente, os esforços de flexão e cortante. Na Figura 2.4 apresenta-se uma ilustração esquemática da execução de enfilagens tubulares longitudinais.

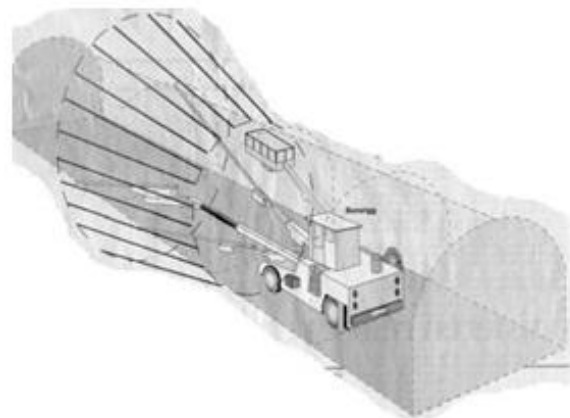


Figura 2.4. Ilustração esquemática da execução de enfilagens tubulares longitudinais (Keller Tecnogeo, 2020).

Domingues (2016) descreve o processo executivo das enfilagens tubulares longitudinais, em túneis, detalhando a ação ilustrada na Figura 2.4. Segundo o autor, a perfuração é executada por perfuratriz hidráulica ou pneumática capaz de executar estruturas sub-horizontais, em diversas direções, com força de avanço suficiente para penetrar o maciço. Após a execução do furo, a abertura é limpa por meio da inserção de água ou ar comprimido. Em seguida, a enfilagem é cravada manualmente e o operador deve evitar flexão excessiva, atrito ou quaisquer outras intervenções que venham a danificar a estrutura. Com este procedimento concluído, é realizada a injeção da calda de cimento que irá permear até o maciço circundante. Como

estrutura final, obtém-se uma enfilagem preenchida por calda de cimento, que interage com o material circundante, com melhores condições mecânicas que o maciço inicialmente escavado.

2.2 TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DO MACIÇO

Em condições de escavação cujo maciço apresenta comportamento mecânico desfavorável, diversas são as soluções de estabilização plausíveis para viabilizar a construção de túneis. O avanço e parcialização da seção de escavação, além do fechamento provisório e da utilização do suporte adequado no momento oportuno, são tidos como mecanismos padrões para enfrentar este tipo de situação. Ainda assim, a definição da concepção a ser adotada depende dos equipamentos disponíveis, prazo e custo da obra.

Dentre as diversas técnicas de estabilização do maciço, destacam-se: escavação sequencial em calota-bancada e galerias laterais (*side drift*). Essas técnicas são descritas na sequência, com enfoque na aplicação em obras tuneleiras.

2.2.1 ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL EM CALOTA-BANCADA

A subdivisão da seção de escavação pode ser realizada de acordo com as particularidades da obra, desde que o maciço esteja sempre possibilitado a redistribuir os esforços a camadas competentes. Um dos métodos de parcialização da seção de escavação mais utilizados na construção de túneis é conhecido como escavação sequencial em calota e bancada.

Na escavação em calota e bancada, escava-se primeiramente a zona subjacente à abóbada do túnel (calota) e estabiliza-se a escavação parcialmente pela bancada. Esta estrutura proverá sustentação do maciço até que as demais técnicas se encarreguem do suporte permanente. Por fim, logo após, é liberada a escavação da bancada e se inicia outro passo de escavação. Na Figura 2.5 ilustram-se as sequências construtivas dessa técnica.

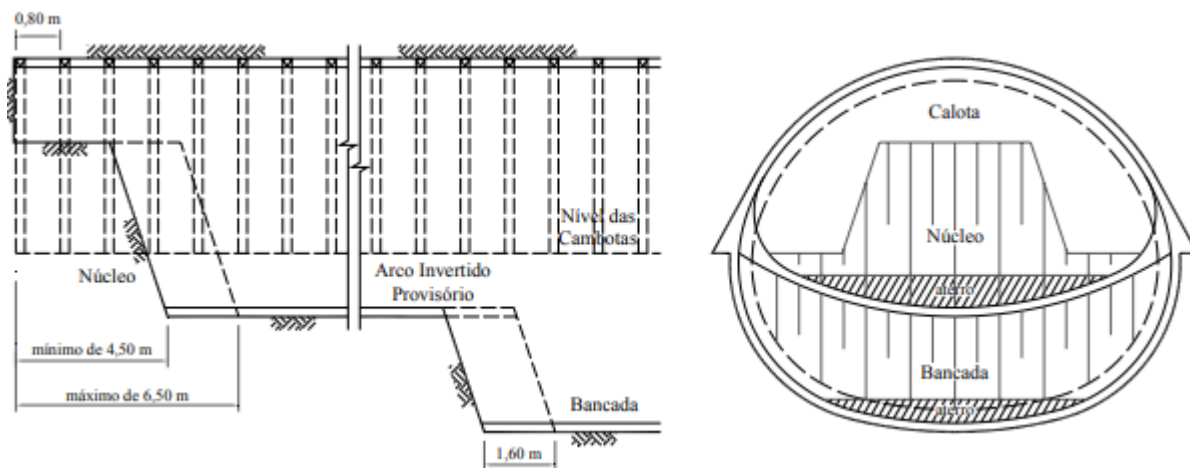


Figura 2.5. Ilustração esquemática da escavação sequencial em calota-bancada (Cecílio Júnior, 2009).

2.2.2 ESCAVAÇÃO GUIADA POR GALERIAS LATERAIS (*SIDE DRIFT*)

A técnica de galerias laterais (*side drift*) consiste em uma metodologia de parcialização da seção com intuito de estabilizar a escavação e obter maior controle sob a relaxação do maciço. Devido aos preceitos da técnica, que busca reconhecer o real comportamento do maciço, é comum que este tipo de parcialização seja executado nas regiões de emboque. Após os primeiros avanços na escavação e conseqüente reconhecimento do subsolo, o túnel poderá ser executado com as melhorias e/ou estabilizações necessárias.

O método de escavação por galerias laterais consiste na utilização de uma escavação menor que a seção projetada para que essa primeira abertura exerça função de piloto. Essa técnica pode ser aplicada por meio da inserção de galerias, localizadas nas laterais da seção plena projetada ou pela execução de uma única seção em menor proporção. O avanço destas frentes de escavação pode ser realizado de forma alternada no terreno, ou seja, primeiro escava-se uma seção e depois se executa a segunda abertura. Nesta técnica, o maciço deve receber tratamento análogo aos procedimentos que serão realizados na seção plena, portanto, as seções escavadas de acordo com a técnica de galerias laterais geralmente são estabilizadas com concreto projetado e cambotas metálicas (Domingues, 2016).

Na Figura 2.6 apresenta-se o processo executivo da parcialização da seção de acordo com a técnica de galerias laterais.

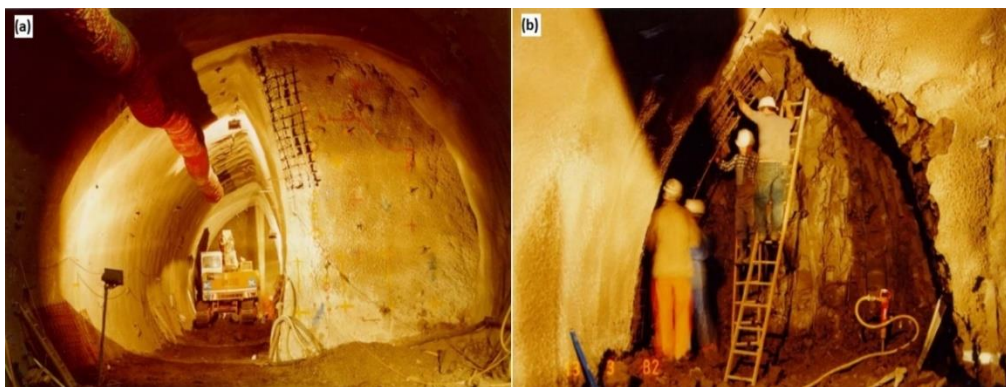


Figura 2.6. Execução da técnica de galerias laterais (*side-drift*). (a) avanço da escavação piloto; (b) instalação do sistema de suporte parcial (Sauer, 1992).

2.3 TUNELADORAS

As tuneladoras são utilizadas como alternativa de método mecanizado para escavação de túneis. Esses equipamentos, também conhecidos como TBM (*Tunnel Boring Machines*), são capazes de auxiliar a execução de túneis extensos com rigoroso controle de recalque em, praticamente, quaisquer tipos de meio geológico e ambiente urbano. Uma particularidade desse método construtivo é a necessidade de o traçado geométrico apresentar grandes raios de curvatura, uma vez que o uso deste tipo de equipamento não permite mudanças acentuadas de direção.

Em linhas gerais, Castro (2013) elenca os principais benefícios e malefícios provenientes da adoção de TBM para execução de obras tuneleiras. As principais desvantagens são o alto investimento inicial e a falta de flexibilidade em admitir alterações em fase de obra. Em túneis urbanos de curta extensão, esses equipamentos podem apresentar um elevado custo unitário. Em contrapartida, usualmente, esta técnica apresenta baixo custo global para obras extensas, menor impacto no maciço, menor carga de trabalho, maior segurança, maior produtividade, além das estimativas de custos e prazos serem mais precisas.

Os principais tipos de tuneladoras são denominados: *Gripper TBM*, *Single Shield TBM*, *Double Shield TBM*, *Earth Pressure Balance (EPB)* e *Slurry Pressure Balance (SPB)*. Para os meios urbanos, que frequentemente apresentam em seus horizontes superficiais camadas de solo com baixa resistência geomecânica, é comum a utilização de equipamentos com frente pressurizada, do tipo EPB e SPB. As possibilidades e limitações desses equipamentos, em ambientes urbanos, são detalhadamente discutidas em Dammyr (2017). De maneira ilustrativa, na Figura 2.7

apresenta-se a tuneladora EPB utilizada na abertura dos túneis da Linha 4 do metrô de São Paulo.



Figura 2.7. EPB utilizada na abertura dos túneis da Linha 4 do metrô de São Paulo (Assis, 2014a).

Ao considerar que a utilização de tuneladoras em escavações urbanas não é escopo detalhado nesta tese, destacam-se, em ordem de atualidade, os trabalhos de Mohammadi *et al.* (2016), ElMouchi *et al.* (2018) e Cheng *et al.* (2019), para a aplicação de EPB. De maneira análoga, considerando as obras tuneleiras em ambientes urbanos com a utilização de SPB, destacam-se as publicações de Park *et al.* (2018), Ye *et al.* (2019) e Cui *et al.* (2020). Ademais, Fang *et al.* (2014) sintetizam outros quatorze casos históricos de utilização de EPB e SPB em áreas urbanizadas, entre os anos de 1990 e 2011, com o foco no controle de recalques gerados pelas escavações.

2.4 INTERAÇÃO ENTRE OS TÚNEIS URBANOS E AS EDIFICAÇÕES

A interação entre os túneis e as edificações é frequente nas escavações em meios urbanos. Na revisão dos casos históricos, é notável que um ponto sensível para o sucesso dessas obras tuneleiras é bom comportamento das estruturas lindeiras. Os edifícios podem ser diretamente afetados quando sofrem impacto em seu Estado Limite Último (ELU) ou Estado Limite de

Serviço (ELS) e, por esse motivo, uma escavação não deve atentar-se exclusivamente para a ruptura. Foá (2005) detalha esse assunto ao atribuir ênfase a interação de túneis e edifícios, exemplificando com casos históricos.

Os túneis rasos são os mais comuns em ambientes urbanos e apresentam diferentes características quando comparados aos túneis profundos, ainda que estejam em ambientes geotécnicos similares. Como referência, Yang e Huang (2011) citam que os túneis rasos influenciam diretamente desde a seção de escavação até a linha de superfície, enquanto os túneis profundos formam arcos de colapso sobre o teto da escavação. Guerrero (2014) complementa afirmando que há controvérsias na definição de um túnel raso pela sua profundidade, entretanto, cita que normalmente é aceitável o entendimento de que este deve ter profundidade inferior a quatro diâmetros. De maneira didática, na Figura 2.8 apresenta-se a progressão típica de plastificação do maciço.

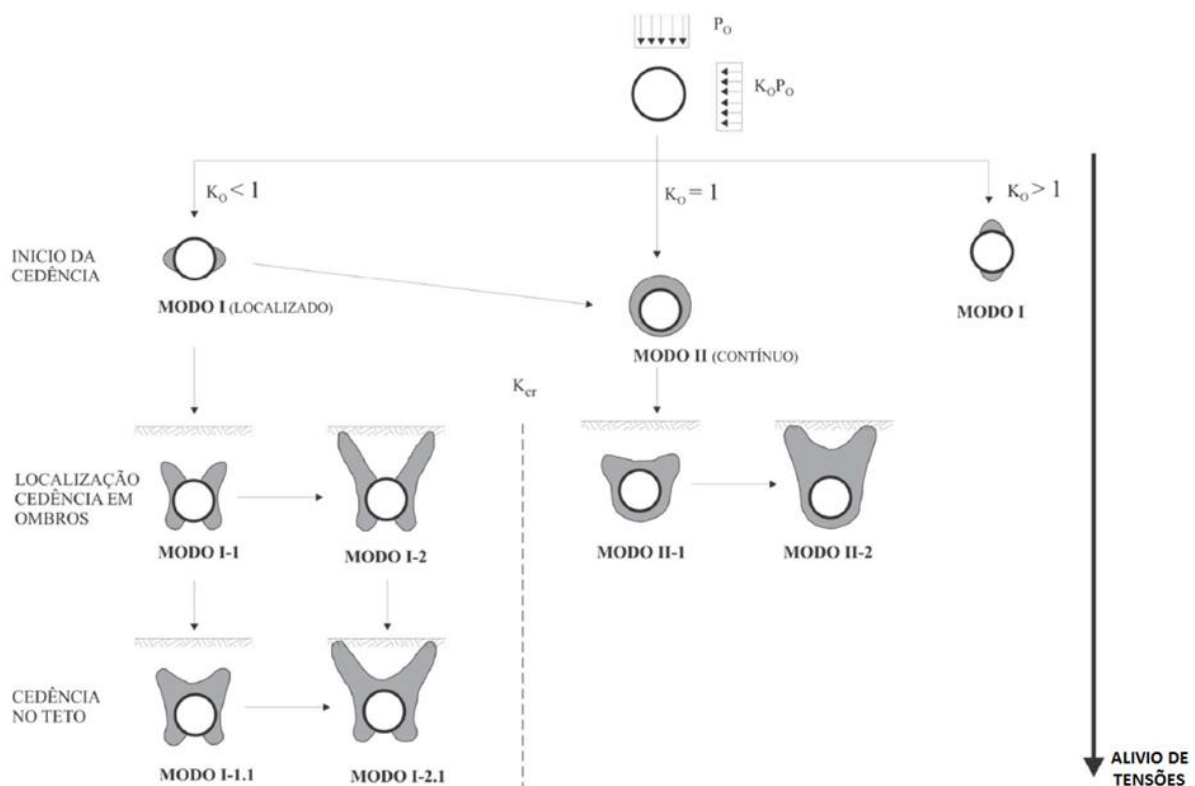


Figura 2.8. Comportamento da plastificação da seção de escavação do túnel até a superfície (Wong e Kaiser, 1991 *apud* Guerrero, 2014).

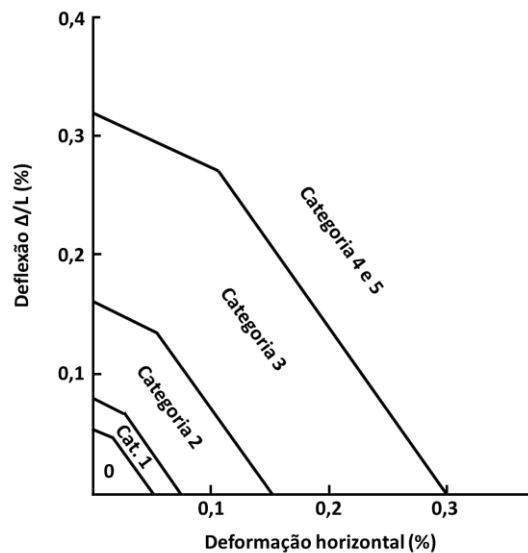


Figura 2.10. Categorias de dano para edifícios com largura igual a altura e submetidos a esforços de tração (modificado de Burland, 1995 *apud* Mair *et al.*, 1996).

Em linhas gerais, os danos das categorias 0 a 2 não costumam ser problemáticos, enquanto os demais devem ser analisados em maiores detalhes. Ainda assim, destaca-se que a categorização do dano deve estar sempre relacionada as condições locais para uma adequada análise de risco.

Além da aplicação limitada às proporções geométricas pré-estabelecidas, o estudo de Mair *et al.* (1996) também foi atribuído a um maciço CHILE (Contínuo, Homogêneo, Isotrópico, Linear e Elástico), em um contexto bidimensional e com a edificação sendo tratada como uma viga simples. Sendo assim, os autores recomendam limitar o uso para avaliações preliminares e/ou para situações enquadradas até a Categoria 2. Para casos de maior importância, classificados como categoria 3 ou superior, são aconselhadas por Mair *et al.* (1996) análises tridimensionais e com maiores detalhamentos estruturais da edificação.

De maneira geral, considerando os indicadores de desempenho das edificações propostos por Guerrero (2014), destaque deve ser atribuído à distorção angular (β) que é definida pela relação entre o recalque diferencial e a distância entre os pontos que serviram de referência para medição, dado por:

$$\beta = \frac{\delta}{L} \quad 2.1$$

O parâmetro de distorção angular é utilizado por diversos autores, elencados em Foá (2005), para estudar os impactos nas edificações. Para os estudos dessa tese, destaca-se a proposta de Bjerrum (1963) que foi modificada por Burland e Wroth (1974), exposta na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Danos causados a edificações segundo a proposta de Bjerrum (1963), modificada por Burland e Wroth (1974)

Categoria de potencial de danos	Distorção Angular ($\beta = \frac{\delta}{L}$)
Perigo para máquinas sensíveis a recalques	1/750
Perigo para pórticos com diagonais	1/600
Inadmissibilidade de fissuras em edificações	1/500
Primeiras fissuras em painéis	1/300
Dificuldades com pontes rolantes	1/300
Rotações em edifícios altos tornam-se visíveis	1/250
Fissuras consideráveis em paredes de painéis e tijolos	1/150
Danos estruturais em qualquer edifício	1/150
Limite para paredes de tijolos flexíveis $L/H > 4$	1/150

Com base nos valores supracitados, a presente tese irá conduzir a categorização da influência das escavações nas edificações afetadas. Esta proposta está em linha com o previamente publicado por Domingues *et al.* (2022).

2.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL EM TÚNEIS URBANOS

As simulações tridimensionais de túneis urbanos, naturalmente, seguem dois caminhos distintos, já sintetizados no início da Seção 2 “Túneis Urbanos”, são eles: por métodos convencionais ou sequenciais, tipo o NATM ou métodos mecanizados. Farias *et al.* (2004) destacam que as simulações numéricas de escavações em NATM apresentam particularidades que tornam sua resolução mais complexa que aquelas realizadas por métodos mecanizados. Isso porque, com emprego de tuneladoras, os deslocamentos conhecidos são geralmente impostos aos limites de escavação, enquanto em métodos convencionais ou sequenciais, tipo o NATM,

requer-se a liberação de forças calculadas a partir das tensões do maciço. Ademais, para simulações numéricas de escavações convencionais ou sequenciais são necessários diversos passos construtivos para que o modelo esteja apto a prever o comportamento da escavação e do maciço circundante.

Considerando o escopo deste trabalho, enfoque é atribuído às escavações NATM, dissertando, assim, sobre suas particularidades. Os pontos de atenção em simulações numéricas tridimensionais de túneis urbanos devem incluir, minimamente, os seguintes aspectos: ponderação do avanço livre (balanço); parcialização da seção de escavação; e os efeitos do emboque/desemboque. Além disso, para que a simulação numérica tenha aderência ao real comportamento da estrutura, Farias *et al.* (2004) destacam a importância de considerar a não linearidade do problema e um modelo constitutivo adequado. A aplicação prática destes conceitos e a sua significância no resultado podem ser identificadas na publicação de Masín (2009).

No que tange ao avanço livre, também identificado como balanço, Farias *et al.* (2004) relatam que este é o parâmetro mais relevante para o controle das deformações. Para túneis urbanos, o balanço torna-se especialmente relevante pela necessidade de controle dos recalques nas estruturas lindeiras. Em condições de campo livre, fundamentado em simulações numéricas tridimensionais e estudos de casos reais. Hayati *et al.* (2012) propõe metodologia para prever os recalques induzidos por diferentes balanços. Para estudos de caso, as simulações numéricas devem ter aprofundamento técnico compatível ao nível de risco aceitável pelo empreendimento. Destaca-se que os balanços também podem ser maiores à medida que técnicas de estabilização e melhoria do maciço, sintetizadas na Seção 2 “Túneis Urbanos”, forem aplicadas com êxito.

Farias *et al.* (2004) realizaram oito sequenciamentos distintos em escavações convencionais ou sequenciais de túneis para analisar a influência da parcialização da escavação. Na Seção 2.2 apresentam-se duas técnicas consagradas que podem ser inseridas nos modelos numéricos, são elas: escavação sequência em calota bancada e escavação guiada por galerias laterais (*side drift*). As constatações provenientes de simulações numéricas genéricas apontam para manutenção da bancada durante o tunelamento como o fator mais relevante para o controle dos recalques. Em linhas gerais, a estrutura de bancada ajuda a manter a pressão horizontal na face de escavação e, conseqüentemente, reduz a indução de recalques na superfície pela extrusão da face.

Por fim, mas não menos importante, devem-se analisar particularmente as estruturas de emboque e desemboque. Isso porque, a peculiaridade destas regiões é decorrente do inevitável desconfinamento promovido pelas escavações anteriores (acessos) e devido à baixa cobertura, que resultam em carregamentos assimétricos e/ou concentrados (Figura 2.11). Assim, para as simulações numéricas que incluem a análise dessas estruturas, devem-se concentrar esforços na representação adequada dos sistemas de contenção e suporte. Considerando a importância das estruturas de emboque e desemboque, estas foram analisadas em diferentes contextos de obras tuneleiras. Isto posto, destacam-se as publicações que utilizaram simulações numéricas tridimensionais para avaliar túneis rasos e/ou em meios urbanos, tais como: por Yang *et al.* (2008), Lu *et al.* (2018), Zhong e Ma (2020) e Domingues *et al.* (2022).

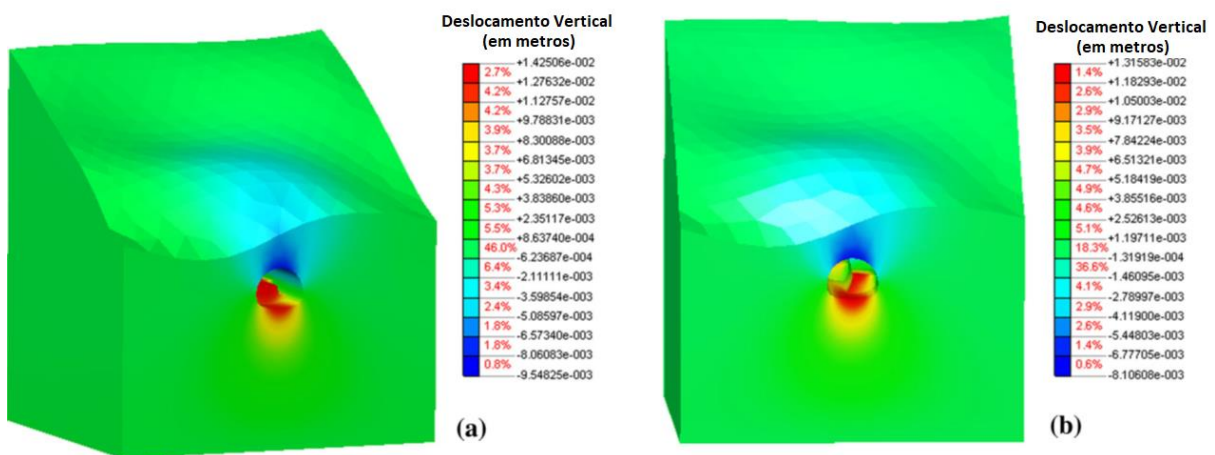


Figura 2.11. Concentração de deslocamentos verticais no emboque: a) Perspectiva 1; b) Perspectiva 2 (modificado de Lu *et al.*, 2018).

3 GERENCIAMENTO DE RISCOS

O gerenciamento de riscos é uma disciplina aplicada a projetos de diferentes segmentos, incluindo a engenharia. Esta prática tem o intuito de avaliar e gerenciar os riscos do projeto para maximizar a exposição aos eventos positivos e minimizar aos negativos. As boas práticas de gerenciamento de riscos são consolidadas no Guia PMBOK®, que atualmente está em sua sétima edição (PMI, 2021).

Em uma visão geral, o processo de gerenciamento de riscos é dividido pelo Guia em sete diferentes ações, que incluem:

- Planejar o gerenciamento de riscos: definir como conduzir as atividades de gerenciamentos de riscos para o projeto;
- Identificar os riscos: determinar quais riscos podem afetar o projeto e documentá-los;
- Realizar a análise qualitativa de riscos: avaliar a exposição ao risco para priorizar os riscos que serão objeto de análise ou ação adicional;
- Realizar a análise quantitativa de riscos: efetuar a análise numérica do efeito dos riscos identificados nos objetivos gerais do projeto;
- Planejar as respostas aos riscos: desenvolver opções e ações para aumentar as oportunidades e reduzir as ameaças do projeto;
- Implementar respostas aos riscos: implementar as respostas planejadas na ação de planejar as respostas aos riscos;
- Monitorar os riscos: monitorar os riscos durante o ciclo de vida do projeto.

Cada ação supracitada tem suas peculiaridades prescritas no Guia PMBOK®, que é um instrumento que propõe o caminho das boas práticas de gerenciamento de projetos. Dentre as ações desejáveis por este Guia está a adaptação do proposto para a realidade de cada projeto.

A contextualização do gerenciamento de riscos, aplicados nesta tese, deve incluir a aplicabilidade dos conceitos na geotecnia e na engenharia tuneleira. Posteriormente, trata-se com maior profundidade os conceitos de probabilidade de ocorrência e consequências do evento. Isto posto, é proposta a subdivisão dessa seção nas seguintes etapas:

- Seção 3.1: Aplicação na Geotecnia;
- Seção 3.2: Aplicação na Engenharia Tuneleira;
- Seção 3.3: Probabilidade de Ocorrência;
- Seção 3.4: Consequências do Evento.

3.1 APLICAÇÃO NA GEOTECNIA

O conceito de risco associado a cálculos geotécnicos é discutido no meio acadêmico há mais de 40 anos. Um importante marco foi à apresentação de Robert Van Duyne Whitman, em 1981, na 17TH *Terzaghi Lecture*, com o tema “*Evaluating calculated risk in geotechnical engineering*” (Whitman, 1984). Essa contribuição consolida diversas tratativas sobre o assunto e exemplifica como o tema risco pode ser utilizado no processo de tomada de decisão.

Nos últimos anos, as discussões têm evoluído no meio geotécnico com as publicações de Fenton e Griffiths (2008), Lacasse *et al.* (2012), Griffiths *et al.* (2012), Sartain *et al.* (2017), Spross *et al.* (2017) e Assis *et al.* (2019). Ainda que os autores supracitados tenham atribuído ênfase à geotecnia de uma maneira geral, diversas outras publicações tratam sobre o conceito e aplicação do risco em disciplinas mais específicas.

Na prática da engenharia brasileira, as últimas publicações correlacionadas à geotecnia, a exemplo da norma brasileira de procedimento para projeto geotécnico ABNT NBR 8044 (ABNT, 2018), já incluem em seu escopo uma nota de reconhecimento dos riscos inerentes à atividade. Por este motivo, já é atribuído ao engenheiro geotécnico o dever de dar o tratamento numérico necessário para alcançar um equilíbrio entre as condicionantes técnicas, econômicas e de segurança usualmente aceitas pela sociedade.

A aplicação do conceito de risco em túneis também tem sido constante objeto de estudo no meio acadêmico e prático. Holický *et al.* (2007) e Cerić *et al.* (2011) propõem uma abordagem mais genérica, com foco direcionado a metodologia de avaliação de risco. Einstein *et al.* (1999), Eskesen *et al.* (2004), Ghiasi *et al.* (2011), Spacková (2012), Goricki (2013), Guerrero (2014), Huang e Zhang (2015) e Franco (2019) atribuem prioridade ao estudo de riscos aplicados a projetos de túneis. Com relação à fase de construção, esta foi investigada por Guglielmetti *et al.* (2007) e Pamukcu (2015) em obras escavadas com tuneladoras.

3.2 APLICAÇÃO NA ENGENHARIA TUNELEIRA

O cenário típico da construção de um túnel, em ambiente urbano, é uma intervenção complexa que tem potencial de afetar as regiões vizinhas à escavação. Holický e Šajtar (2006) enfatizam que os casos de insucesso na construção de túneis, somados à necessidade de reconhecer as consequências dos fatos indesejáveis, ampliam a utilização de métodos de gerenciamento de risco na engenharia tuneleira. Neste contexto, Holický *et al.* (2007) propõem uma metodologia

de estudo e gerenciamento de risco aplicado a túneis. Para exemplificar a proposta de forma sucinta, na Figura 3.1 expõe-se um fluxograma com os processos direcionados à avaliação desta problemática.

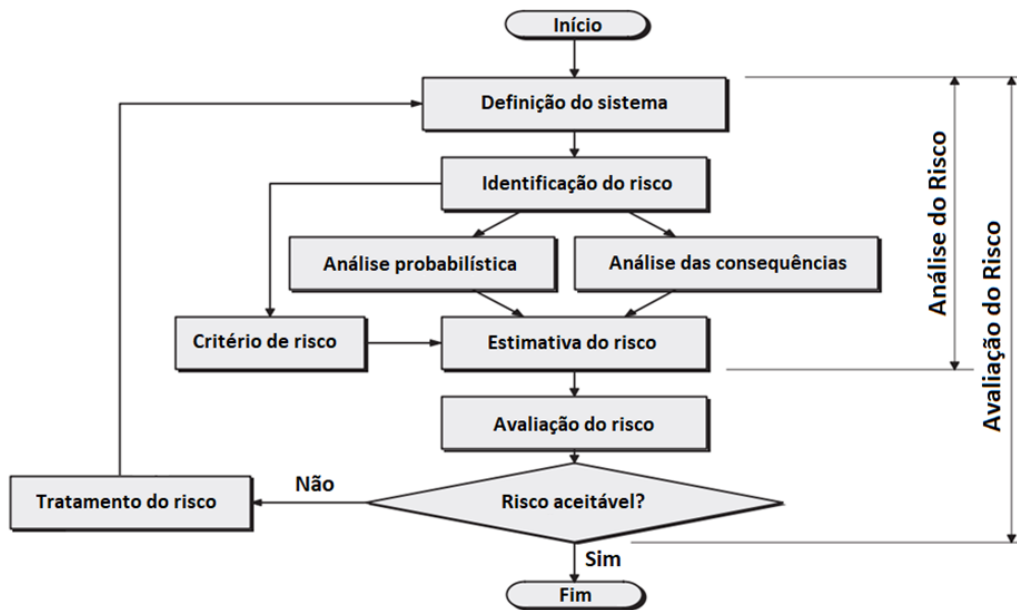


Figura 3.1. Fluxograma proposto para o processo de avaliação dos riscos (ISO 31.000 1999 *apud* Holický *et al.* 2007).

Nota-se que o risco é tratado como o produto de duas variáveis: a probabilidade de ocorrência e o custo relacionado às possíveis consequências desse evento. Estas duas variáveis, detalhadas na sequência deste trabalho, quando multiplicadas, geram um valor monetário para o risco, considerando a primeira adimensional e a segunda avaliada de forma monetizada. Para a aplicação prática desse conceito, devem-se estabelecer níveis de atenção para cada possível combinação de estimativa do risco. Na Figura 3.2 ilustra-se um esquema de subdivisão do risco em diferentes escalas em que, à medida que o risco aumenta, mais alto é o nível de gerência a ser notificado sobre o fato.

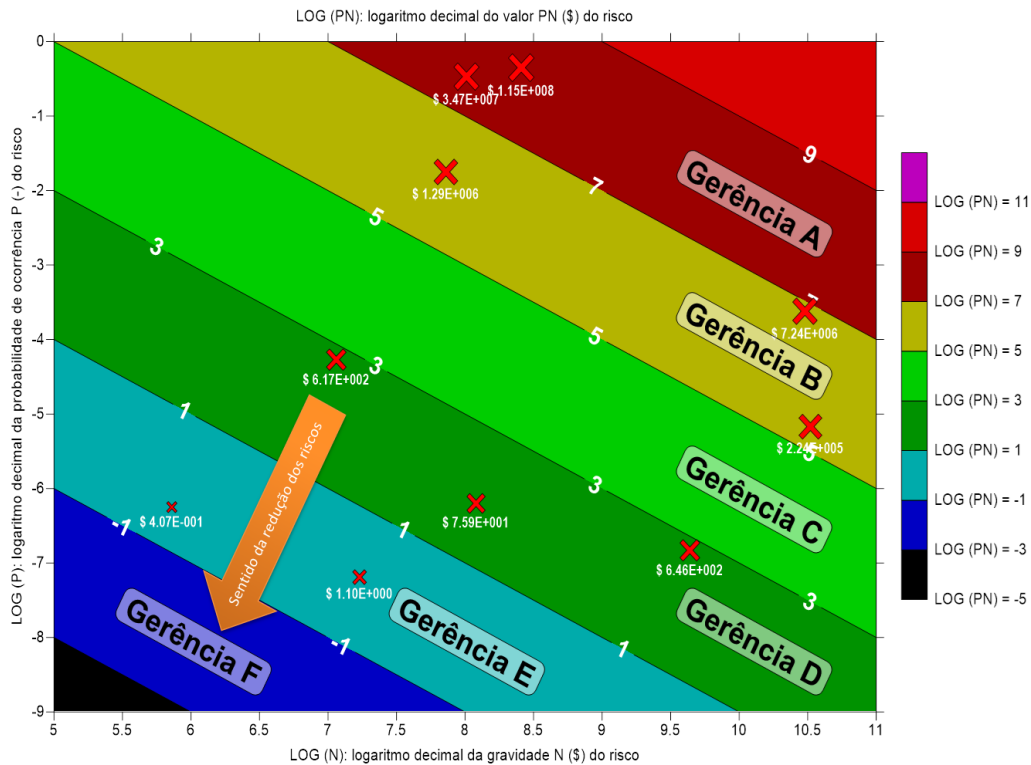


Figura 3.2. Esquema de aplicação prática do conceito de risco (Assis, 2014b).

Na prática, para as obras subterrâneas, Guerrero (2014) cita que as ameaças mais frequentes estão relacionadas às seguintes variáveis:

- Risco geológico, relacionado à insuficiência de informação obtida por meio das investigações planejadas;
- Risco de projeto, especialmente relacionado à dificuldade de adaptação do projeto às condições geomecânicas encontradas, construção inapropriada, experiência do projetista limitada e limitações contratuais;
- Risco de construção, relacionado à seleção de uma técnica construtiva inapropriada ou insuficientemente industrializada, ocorrência de instabilidade, experiência do construtor, e limitações contratuais;
- Risco financeiro, relacionado a limitações sociais e políticas, confusa definição de responsabilidades, litígios e seguridade.

Guerrero (2014) também elenca uma longa lista das ameaças mais relevantes que estão associadas a estes riscos supracitadas. Ainda assim, é essencial que o responsável pela gestão do risco (ou os responsáveis) defina uma lista própria para o empreendimento em questão para que esta seja condizente com as características específicas do local.

3.3 PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

Em projetos de engenharia, a probabilidade de ocorrência de um evento é um dos fatores que ponderam o nível do risco. Na maior parte dos casos, na construção civil, é atribuída ênfase a probabilidade de ocorrência de eventos danosos, também denominados como probabilidade de falha. Ainda assim, deve-se destacar que quando se trata de gerenciamento de riscos o evento pode ter consequências danosas e/ou benéficas e ambas as ocasiões podem ser importantes aos projetos. Sob uma análise qualitativa, essa probabilidade pode ser medida em diferentes escalas de conceitos. Para que seja possível uma aplicação prática desta avaliação subjetiva, é usual a atribuição de pesos para cada um dos níveis estabelecidos. Em outra perspectiva, a análise quantitativa define a probabilidade de falha como, por exemplo, um valor entre 0,0001 e 0,9999, com 0,0001 indicando um evento que acontece quase nunca e 0,9999 indicando um evento que acontece quase sempre.

A determinação da probabilidade de falha pode seguir diferentes métodos e utilizar informações históricas, modelagem numérica e/ou dados de instrumentação. Para a escolha do método mais adequado é importante considerar as características do empreendimento, o contexto em que a obra está inserida e a precisão requerida para análise. Wolff (2014) destaca que no contexto da análise de risco, muitas vezes a probabilidade de falha é determinada por meio de métodos probabilísticos com base em dados históricos ou utilização de árvores de eventos.

Para o uso de métodos probabilísticos é importante também conhecer a variação dos dados utilizados de forma determinística. Assim, é possível avaliar a sensibilidade destes no resultado e garantir a precisão requerida para a análise. Com relação às árvores de eventos, Wolff (2014) atribui à utilização dessa ferramenta as análises de fenômenos de difícil modelagem, em que se pode facilmente identificar relações de dependências ou não entre situações isoladas. Por princípio, na utilização de árvores de eventos, a probabilidade de falha da situação principal é obtida como resultado das interações entre as probabilidades dos eventos isolados precedentes.

3.3.1 AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE RISCOS

As análises de probabilidade de falha aplicadas às construções civis e aos túneis urbanos devem considerar os possíveis impactos nas estruturas lindeiras. Isso significa que o interesse não deve se limitar ao processo de ruptura, mas também é extremamente importante o controle das deformações induzidas pelas intervenções. Este fato destaca a importância em se considerar os estados limites últimos e de serviço das estruturas que estão sob zona de influência.

Ao revisar as publicações sobre o tema, especialmente aquelas vinculadas as obras tuneleiras, é possível notar que o processo de determinação da probabilidade de ocorrência do risco possui características em comum. Desde as publicações de New (1990), Einstein (1996) e Sturk *et al.* (1996) até Lu e Zhang (2020), Li e Wang (2021) e Wang *et al.* (2021), há etapas em comum que foram mapeadas de maneira macro pelo autor e ilustradas na Figura 3.3. Fato que difere as publicações mais recentes, especialmente estas expostas, é a inclusão de técnicas de inteligência artificial que possibilitam a otimização do tempo computacional com boa acurácia quando se trata de projetos de engenharia. Este tema também é tratado com mais detalhes na Seção 4.

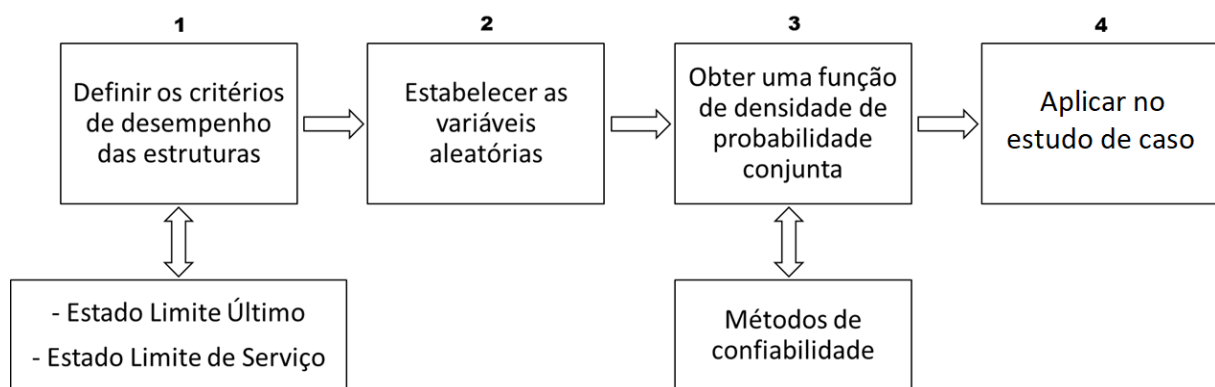


Figura 3.3. Consolidação das etapas necessárias para a determinação da confiabilidade das estruturas

Neste processo apresentado, que compila publicações sobre o tema, torna-se evidente que o foco usualmente está sobre a probabilidade de falha das estruturas. As ocorrências benéficas dos riscos geralmente são tratadas pelo escritório de projetos e abrangem uma escala mais estratégica do gerenciamento de riscos.

Sobre o processo, o primeiro passo para avaliar a confiabilidade das estruturas afetadas é encontrar um modelo matemático que represente com a precisão desejável o fenômeno físico estudado. Somados a isso, deve-se estabelecer um estado admissível, seja este o estado-limite último ou de serviço.

Sequencialmente, no momento de estabelecer quais as variáveis aleatórias serão utilizadas na resolução do problema, é importante conhecer os valores que apresentam maior sensibilidade no cálculo do desempenho das estruturas. As variações de maior relevância para solução do problema podem estar relacionadas aos modelos constitutivos dos materiais ou a esforços

externos. Para as variabilidades que forem ignoradas, deve-se assegurar que esta simplificação não afeta a precisão requerida para o problema.

De posse das variáveis aleatórias, o problema deverá ser resolvido com base em uma abordagem probabilística. Para isso, uma série de simulações devem ser realizadas com o intuito de obter uma densidade de probabilidade conjunta, por meio da aplicação de métodos de confiabilidade. Ao comparar as primeiras publicações com as mais recentes, considerando o avançar das técnicas de investigação e do poder computacional, é possível notar aprimoramentos na realização de todas as etapas deste processo.

Ao manter ênfase nas ações de cunho técnico, especialmente na probabilidade de falha das estruturas, as seções subsequentes esclarecem sobre os métodos de confiabilidade e a fundamentação estatística que sustenta as análises.

3.3.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A análise de confiabilidade aplicada a um problema de engenharia pode ser entendida por meio de uma abordagem simplificada. Para o entendimento desta abordagem, considera-se um problema hipotético em que são envolvidas duas variáveis aleatórias: o esforço solicitante (Q) e o esforço resistente (R). Estas variáveis, por exemplo, podem ser representadas por uma distribuição normal e, portanto, têm como parâmetros estimáveis as suas médias e os seus respectivos desvios padrão. O conceito de probabilidade de falha, para esse caso, pode ser entendido como a probabilidade de o esforço solicitante ser superior ao resistente. De forma ilustrativa, na Figura 3.4 apresenta-se uma possível relação entre essas variáveis.

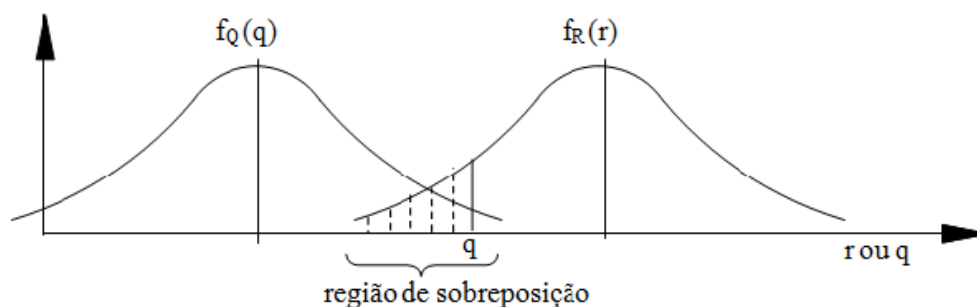


Figura 3.4. Função densidade de probabilidade $f_R(r)$ e $f_Q(q)$ (Ang e Tang, 1984)

A região de sobreposição destacada na Figura 3.4 representa a área em que as solicitações são superiores à resistência, ou seja, as zonas em que a falha é constatada. Essa probabilidade pode ser calculada pela integração da função densidade de probabilidade conjunta $f_{req.}(r,q)$ das variáveis envolvidas. Quando Q e R são independentes, o cálculo para o exemplo proposto é realizado como:

$$P_f = \int_0^{\infty} \left[\int_0^q f_R(r) dr \right] f_Q(q) dq = \int_0^{\infty} F_R(q) f_q dq \quad 3.1$$

onde $F_R(q)$ é a função distribuição acumulada de R avaliada no ponto q.

O problema aplicado ao escopo desta tese envolve uma gama de variáveis aleatórias, especialmente relacionadas à resistência do maciço. Para este tipo de aplicação prática, conforme ilustrado na Figura 3.3, os primeiros passos são definir os critérios de desempenho da estrutura e quais são as variáveis aleatórias envolvidas. Com isso, em vez de trabalhar de forma determinística com os esforços solicitante e os resistentes, será considerado um vetor de variáveis aleatórias.

Ao relacionar o vetor de variáveis aleatórias com o critério de desempenho da estrutura, tem-se a chamada função de desempenho descrita por:

$$g(\underline{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad 3.2$$

onde $\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ é o vetor das variáveis envolvidas no problema.

O limite da zona de falha é usualmente estabelecido para o caso em que a função de desempenho da estrutura for igual zero, ou seja, $g(\underline{X}) = 0$.

Para ilustrar esta superfície de falha de maneira didática, considera-se o espaço estabelecido apenas por duas variáveis aleatórias: X_1 e X_2 . Ao plotar neste plano a função de densidade de probabilidade conjunta destas duas variáveis, tem-se o entendimento sobre os conceitos supracitados ilustrados na Figura 3.5.

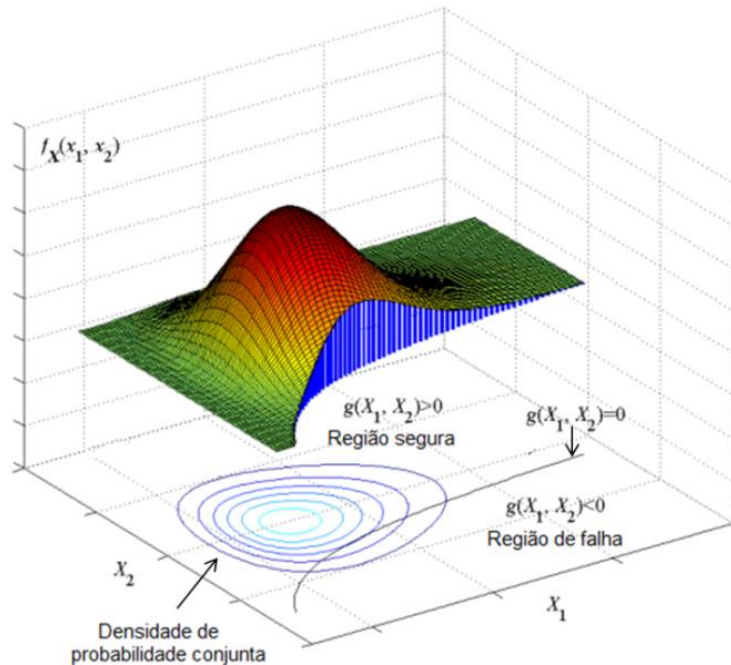


Figura 3.5. Ilustração do conceito de estado-limite e densidade de probabilidade conjunta (Modificado - Du, 2005).

Fundamentado na definição do critério de desempenho, a falha ocorre quando $g(\underline{X}) < 0$. Neste contexto, descreve-se o entendimento matemático sobre a probabilidade de falha da seguinte forma:

$$\int \dots \int_{g(\underline{X} < 0)} f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad 3.3$$

onde $f_x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é a função densidade de probabilidade conjunta para X_1, X_2, \dots, X_n .

Caso as variáveis (X_1, X_2, \dots, X_n) sejam independentes, a distribuição conjunta pode ser substituída pelo produto das funções densidade individuais na integral. A Equação 3.3, denominada equação fundamental da análise de confiabilidade, se torna uma representação mais geral do cálculo apresentado na Equação 3.1.

As análises acima ilustram o tema de confiabilidade de maneira didática. No caso da construção de túneis em ambientes urbanos, ao aplicar estes conceitos a um elevado grupo de variáveis e diferentes distribuições de probabilidade, outras ferramentas são necessárias. É neste momento que os métodos de confiabilidade são importantes e o entendimento sobre a acurácia torna-se determinante no processo de análise de risco. Isto posto, serão amplamente discutidos nesta tese a aplicabilidade dos seguintes métodos:

- Método de Monte Carlo e suas variações
 - Técnicas de amostragem básica;
 - Técnicas de amostragem inteligente.
- Métodos Semi analíticos
 - *First-Order Second-Moment* – FOSM;
 - *First-Order Reliability Method* – FORM;
 - *Second-Order Reliability Method* – SORM.

3.3.3 MÉTODO DE MONTE CARLO E SUAS VARIAÇÕES

O método de Monte Carlo, amplamente difundido para análises estatísticas, foi inicialmente publicado por Metropolis e Ulam (1949). A proposta inicial, conhecida como método de Monte Carlo Bruto, consistia em uma intensa amostragem aleatória para cada variável de entrada com o intuito de avaliar a função de falha. Matematicamente, Santos (2014) apresenta o método de Monte Carlo Bruto como uma função indicadora $I[x]$, conforme exemplificado:

$$\begin{aligned} I[x] &= 1 \quad \text{se } x \in \Omega_f \\ I[x] &= 0 \quad \text{se } x \in \Omega_s \end{aligned} \tag{3.4}$$

onde Ω_f é o domínio de falha e Ω_s é o domínio de segurança.

Para calcular a probabilidade de falha, o limite de integração deverá ser atribuído a todo domínio Ω , dado por:

$$P_f = \int_{\Omega} I[x] f_x(x) dx \equiv E[I[x]] \tag{3.5}$$

Na Equação 3.5 apresenta-se o valor esperado da função indicadora, que pode ser estimado a partir de uma amostra de tamanho finito n , da seguinte forma:

$$\bar{P}_f = \bar{I}[x] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I[x] = \frac{n_f}{n} = E[\bar{P}_f] \tag{3.6}$$

onde \bar{P}_f é a probabilidade de falha estimada por uma amostra finita, n é o número de pontos amostrais e n_f é o número de pontos amostrais dentro do domínio de falha.

Na Equação 3.6 é possível notar que à medida que o número n se aproxima de infinito a probabilidade de falha estimada tende ao valor da probabilidade de falha real. De qualquer

forma, por tratar-se de estatística computada a partir de amostra de dimensão finita, o estimador da Equação 3.6 está sujeito a um erro de amostra, que corresponde à variância da probabilidade de falha, calculada por:

$$Var[\bar{P}_f] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I[x_i] - P_f)^2 \quad 3.7$$

Igualmente, é possível verificar que o erro estatístico da amostragem converge para zero à medida que n tende a infinito. Santos (2014) ainda ressalta que, em alguns casos, é possível definir de forma simples um intervalo de confiança para a estimativa da probabilidade de falha.

Por ser um método que requer elevada capacidade computacional, muitas vezes o uso do Monte Carlo Bruto é inviável para problemas complexos. Em outros casos, em que sua aplicação é viável, o Monte Carlo Bruto também pode ser utilizado como benchmark para aferição de outros métodos de confiabilidade.

Como variação do método de Monte Carlo Bruto, há alternativas de amostragem que se manifestaram eficientes, conforme detalhado por Santos e Beck (2014). Essas alternativas podem ser divididas em dois grupos que são sintetizados a seguir:

- Técnicas de amostragem básica: simples, estratificada, por variáveis antitéticas e por hipercubo latino.
- Técnica de amostragem inteligente: amostragem por importância utilizando pontos de projeto.

As técnicas de amostragem básica se referem às metodologias de obtenção de amostras necessárias para aplicação do método de Monte Carlo. Para fazer parte deste grupo, a técnica não deverá ser dependente da forma da equação de estado limite e, tão pouco, de pontos de projeto. Para comparar a acurácia dessas técnicas, Santos (2014) apresentou um histograma de frequência para uma variável aleatória normal com média 1,0 e desvio padrão 0,15, ilustrado na Figura 3.6.

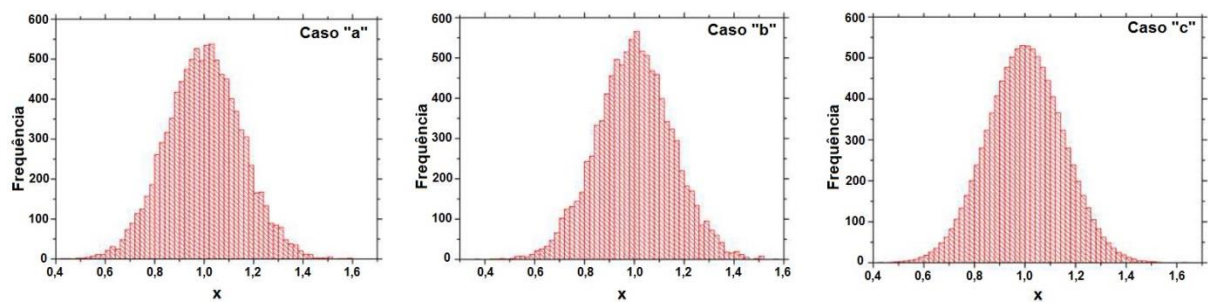


Figura 3.6. Histograma de frequência: a) Amostragem simples; b) Amostragem por variáveis antitéticas; e c) Amostragem por hipercubo latino (modificado de Santos, 2014).

Como pode ser observado na Figura 3.6, não foi considerada a técnica de amostragem estratificada na comparação. Isso porque, conforme detalhado adiante, a técnica por amostragem hipercubo latino é uma derivação da técnica estratificada e apresenta uma melhor precisão nos resultados.

A técnica de amostragem inteligente para os problemas de engenharia teve sua eficácia reconhecida por Santos e Beck (2014) e confirmada por Domingues *et al.* (2022). Nestas publicações, nota-se uma melhor eficiência na adoção dessas técnicas para as situações em que o Monte Carlo Bruto apresenta dificuldades. A amostragem inteligente é aconselhada para problemas com pequenas probabilidades de falha, na avaliação combinada com soluções numéricas ou na avaliação de sistemas.

Na sequência, conforme descrito na Tabela 3.1, da Seção 3.3.3.1 até a 3.3.3.5, são detalhadas as técnicas de amostragem básica e inteligente, apresentadas em Santos (2014), que serão abordadas nessa tese.

Tabela 3.1. Técnicas de amostragem para aplicação no estudo de caso hipotético

Referência	Técnica de Amostragem para Monte Carlo	Seção
Santos (2014)	Básica: Amostragem Simples	3.3.3.1
	Básica: Amostragem por Variáveis Antitéticas	3.3.3.2
	Básica: Amostragem Estratificada	3.3.3.3
McKay <i>et al.</i> (1979)	Básica: Amostragem por Hipercubo Latino	3.3.3.4
Santos (2014)	Inteligente: Amostragem por Importância	3.3.3.5

3.3.3.1 TÉCNICA DE AMOSTRAGEM BÁSICA: AMOSTRAGEM SIMPLES

A técnica de amostragem simples, cujo objetivo é gerar amostras de variáveis aleatórias, é o método considerado padrão em simulações por Monte Carlo. Esta técnica foi proposta com a intenção de solucionar problemas matemáticos em que a solução analítica se revelava complexa.

Santos (2014) ressalta que uma variável aleatória é definida por sua função de densidade de probabilidade e, a partir da função cumulativa de probabilidade $F_X(x)$, pode-se estabelecer o seguinte procedimento para obtenção da amostragem simples:

- I. Gerar um número aleatório u_i com distribuição uniforme de probabilidade, que está no intervalo $[0,1]$;
- II. Obter um número aleatório com distribuição prescrita, a partir da inversa da função cumulativa de probabilidade, dado por:

$$x_i = F_x^{-1}(u_i) \quad 3.8$$

Na aplicação do método de Monte Carlo em engenharia, especialmente na área de confiabilidade estrutural, uns dos pontos de maior interesse são os gráficos de convergência da probabilidade de falha da amostra ao resultado determinístico. Para verificar a convergência do Monte Carlo Bruto, com amostragem simples, Santos (2014) apresenta na Figura 3.7 os resultados obtidos com base em um exemplo abstrato.

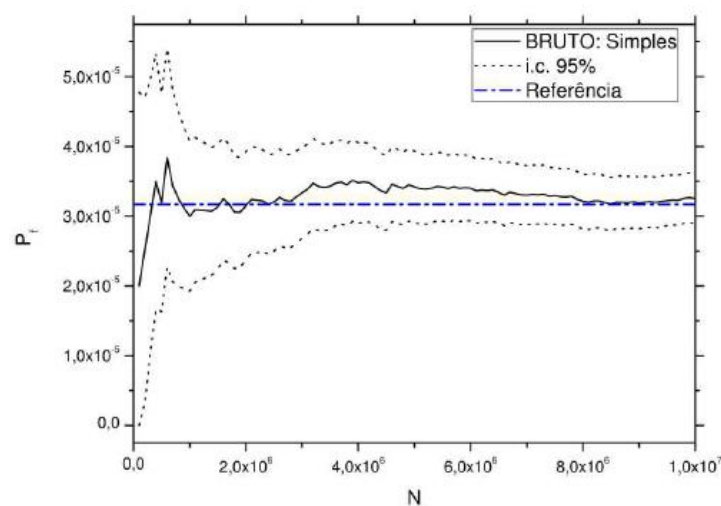


Figura 3.7. Convergência da probabilidade de falha pela simulação de Monte Carlos Bruto, em um exemplo abstrato apresentado em Santos (2014).

Nota-se na Figura 3.7 que, quanto maior for a amostra “N”, mais estreito é o intervalo de confiança. Por sua vez, o coeficiente de variação (δ) da probabilidade de falha estimada é atribuído como:

$$\delta[\bar{P}_f] = \frac{\sqrt{\text{Var}[\bar{P}_f]}}{E[\bar{P}_f]} \approx \frac{1}{\sqrt{nP_f}} \quad 3.9$$

Segundo Santos (2014) *apud* Beck (2012), para definir o tamanho desejável de uma amostra, estima-se que, para $\delta[\bar{P}_f] \leq 10\%$, uma probabilidade de falha da ordem de 10^{-p} requer uma amostra de tamanho 10^{p+2} . Isso quer dizer que para obter respostas sobre uma probabilidade de falha da ordem de 10^{-5} , comum na engenharia, é desejável uma amostragem de 10^7 . Tal fato demonstra que o número de simulações pode ser proibitivo, sabendo que as avaliações numéricas podem levar de segundos até horas ou mesmo dias.

3.3.3.2 TÉCNICA DE AMOSTRAGEM BÁSICA: AMOSTRAGEM POR VARIÁVEIS ANTITÉTICAS

Na técnica por variáveis antitéticas, apresentada por Santos (2014), a ideia central é a inserção de correlação negativa entre observações. O autor cita que este método pode não apresentar melhoras expressivas nos resultados se aplicado sozinho, sem complemento de outras técnicas.

O método para amostragem por variáveis antitéticas consiste na realização do conjunto de número aleatórios $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$. Somados a esse, deve-se realizar uma simulação de um conjunto de número complementares, onde, $\bar{U} = \{1-u_1, 1-u_2, \dots, 1-u_n\}$. Assim, dois estimadores da probabilidade de falha P_f^a e P_f^b podem ser combinados da seguinte forma:

$$P_f^c = \frac{P_f^a + P_f^b}{2} \quad 3.10$$

Este novo estimador, resultado da combinação dos dois anteriores, tem como variância a seguinte expressão:

$$\text{Var}[P_f^c] = \frac{1}{4} (\text{Var}[P_f^a] + \text{Var}[P_f^b] + 2\text{Cov}[P_f^a, P_f^b]) \quad 3.11$$

Nota-se que a correlação negativa é imposta uma vez que $P_f^a = f(u_i)$ e $P_f^b = f(1 - u_i)$, com $i = 1, \dots, n$. Assim, $\text{Cov}[P_f^a, P_f^b]$ passa a ter um valor negativo e, conseqüentemente, a variância do estimador combinado (P_f^c) diminui.

3.3.3.3 TÉCNICA DE AMOSTRAGEM BÁSICA: AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA

A técnica de amostragem estratificada busca direcionar a coleta de amostras para que haja uma homogeneidade ao longo do domínio em estudo. Essa técnica tem o intuito de suprir uma possível deficiência da amostragem simples que é a concentração de pontos em algumas regiões do domínio, enquanto há falta de dados em outros. Assim, a técnica incide na subdivisão do domínio em faixas, para que seja viável a obtenção direcionada das amostras. Na Figura 3.8 é ilustrada uma possível aplicação dessa técnica para duas variáveis aleatórias.

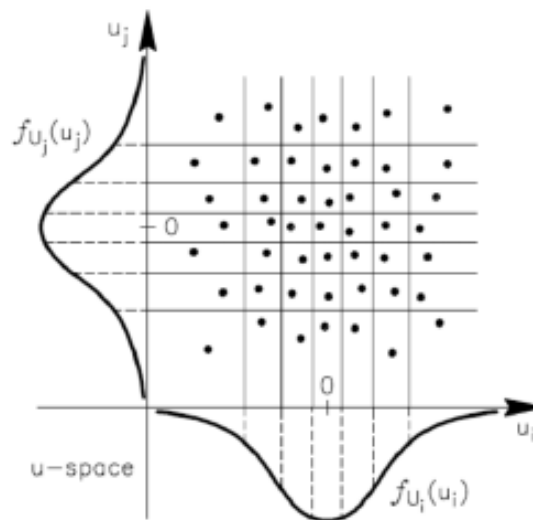


Figura 3.8. Ilustração da aplicação da técnica de amostragem estratificada para duas variáveis aleatórias (Hurtado e Barbat, 1998 *apud* Santos, 2014).

Santos (2014), ao estudar a confiabilidade de estruturas na engenharia, cita que a técnica de amostragem estratificada não se mostrou tão eficiente quanto a outras técnicas de amostragem inteligente.

3.3.3.4 TÉCNICA DE AMOSTRAGEM BÁSICA: AMOSTRAGEM POR HIPERCUBO LATINO

A técnica de amostragem por hipercubo latino é uma alternativa derivada da amostragem estratificada e foi primeiramente apresentada por McKay *et al.* (1979). Para demonstrar a eficiência da técnica, o estudo compara esta com as técnicas de amostragem estratificada e simples.

Para executar a técnica de amostragem por hipercubo latino, é mantido o procedimento inicial de subdividir o domínio em faixas, conforme apresentado na amostragem estratificada. Posteriormente, cada faixa é amostrada uma única vez, resultando em uma distribuição mais espaçada entre os pontos. Este processo garante, assim como na amostragem estratificada, uma cobertura homogênea do domínio. Na Figura 3.9 é ilustrada uma possível aplicação dessa técnica para duas variáveis aleatórias.

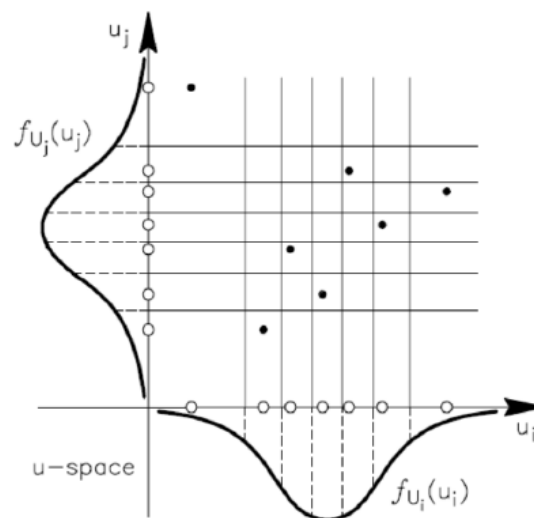


Figura 3.9. Ilustração da aplicação da técnica de amostragem por hipercubo latino para duas variáveis aleatórias (Hurtado e Barbat, 1998 apud Santos, 2014).

Nota-se na Figura 3.9 que o espaço de amostragem tem o mesmo número de dimensões que a quantidade de variáveis aleatórias, no caso esse é bidimensional. Assim, considerando n_{va} o número de variáveis aleatórias e n o número de pontos da amostra, o espaço passa a ser n_{va} -dimensional (Santos, 2014).

Para gerar uma amostragem por hipercubo latino, considera-se a utilização de uma Matriz P, de dimensões $(n \times n_{va})$, em que uma das colunas n_{va} é uma permutação aleatória de $1, \dots, n$. Além dessa, uma outra Matriz R deve ser gerada, com as mesmas dimensões da Matriz P, em que os componentes são números aleatórios distribuídos entre $[0,1]$. Com posse desses dados, é gerada a Matriz S, por meio da seguinte expressão:

$$S = \frac{1}{n}(P - R) \quad 3.12$$

Para exemplificar, Santos (2014) apresenta um caso para duas variáveis aleatórias com cinco realizações, conforme exposto na Figura 3.10.

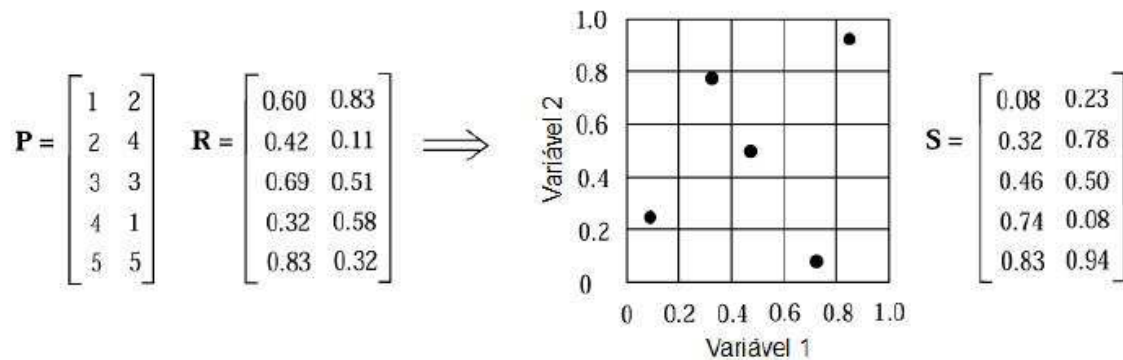


Figura 3.10. Exemplificação da amostragem por hipercubo latino para duas variáveis aleatórias e cinco realizações (Olsson *et al.*, 2003 apud Santos, 2014)

Assim, as amostras passam a ser geradas a partir da Matriz S, dada por:

$$x_{ij} = F_{x_j}^{-1}(s_{ij}) \quad 3.13$$

onde $F_{x_j}^{-1}$ é a inversa da função de distribuição acumulada de probabilidade da variável x_j .

Por fim, considerando a possível necessidade de um número elevado de amostras aos estudos de confiabilidade na engenharia, Santos (2014) cita que a geração das matrizes P, R e S podem ser proibitivas devido ao elevado consumo de memória do computador.

3.3.3.5 TÉCNICA DE AMOSTRAGEM INTELIGENTE: AMOSTRAGEM POR IMPORTÂNCIA UTILIZANDO PONTOS DE PROJETO

A técnica de amostragem por importância usando pontos de projeto, descrita em detalhes por Santos (2014), consiste em transladar os pontos de amostragem para a região do domínio de falha. Estes pontos de amostragem são gerados a partir de uma função de amostragem $h_x(x)$, a ser escolhida para cada caso. Assim, a depender da forma de escolha dessa função, outras técnicas de amostragem por importância são geradas.

Partindo do cálculo de probabilidade de falha, descrito na Equação 3.5 da Seção 3.3.3 “Método de Monte Carlo e suas variações”, ao multiplicar o numerador e o denominador por $h_x(x)$, têm-se:

$$P_f = \int_{\Omega} I[x] \frac{f_x(x)}{h_x(x)} h_x(x) dx \quad 3.14$$

onde $I[x]$ é a função indicadora apresentada na Equação 3.4 da Seção 3.3.3 “Método de Monte Carlo e suas variações”. Ressalta-se que essa função é igual a 1 (um) quando pertencente ao domínio de falha e igual a zero quando está no domínio de segurança.

Assim, a Equação 3.14 descreve o valor esperado para a função $I[x] \frac{f_x(x)}{h_x(x)}$. Para uma amostra de tamanho finito, o valor esperado é estimado por:

$$\overline{P}_f = \bar{I}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i) \frac{f_x(x_i)}{h_x(x_i)} \quad 3.15$$

Ao transladar os pontos da amostragem para a região do domínio de falha, poderá ser observado que a função indicadora terá mais valores 1 (um) do que a amostra original. Entretanto, cada valor igual a 1 (um), que representa o domínio de falha, será associado a um peso definido por:

$$w_i = \frac{f_x(x_i)}{h_x(x_i)} \ll 1 \quad 3.16$$

A técnica de amostragem por importância pode apresentar outras vertentes, a depender da função de amostragem utilizada. Para o caso da utilização dos pontos de projeto, Santos (2014) apresenta a acurácia dos resultados obtidos, em um exemplo hipotético, comparando com a convergência obtida no método de Monte Carlo Bruto (Figura 3.11).

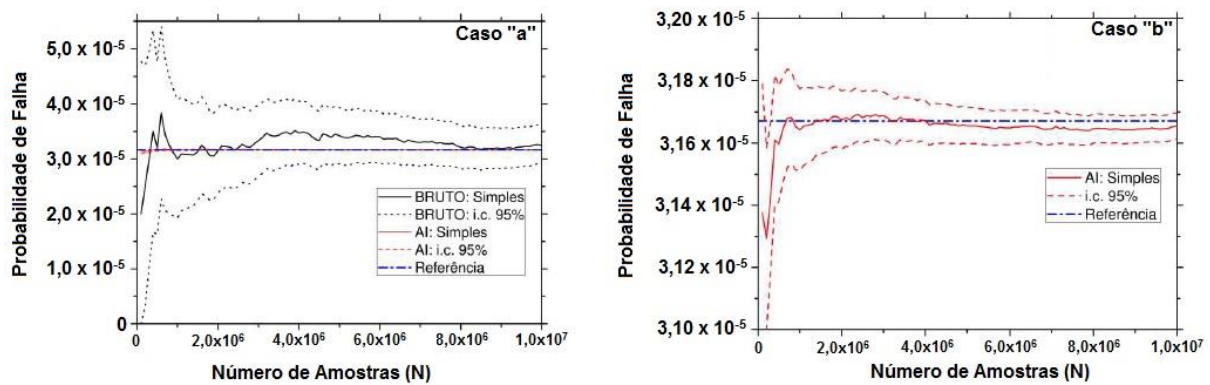


Figura 3.11. Comparativo da convergência do Monte Carlo Bruto com a Amostragem por Importância utilizando pontos de projeto: a) Ambas as técnicas no mesmo gráfico; e b) Ênfase nos resultados obtidos para a amostragem inteligente (modificado de Santos, 2014).

No trabalho de Santos (2014) também é apresentado a utilização da amostragem por importância combinado ao hipercubo latino padrão. Essa combinação evita problemas nos casos em que a maioria das amostras se localizam em um lado da hiper superfície de falha. Além disso, para os problemas que existam múltiplos modos de falha, este autor demonstra a associação de funções com a possibilidade de prover grau de importância relativa a cada estado limite.

É importante frisar que a técnica de amostragem por importância requer o conhecimento prévio do ponto, ou dos pontos, de projeto. Isso porque, a função de amostragem precisa ser transladada até estes pontos. Assim, nos casos em que não se tem conhecimento prévio dos valores de projeto, essa técnica torna-se inadequada.

3.3.4 MÉTODOS SEMIANALÍTICOS: FOSM, FORM E SORM

Os métodos semianalíticos de confiabilidade referem-se a simplificações que possibilitam o cálculo probabilístico sem requerer a integração numérica. Para esta tese será atribuído ênfase aos métodos FOSM (*First Order Second Moment*), FORM (*First Order Reliability Method*) e SORM (*Second-Order Reliability Method*), conforme previamente apresentado por Domingues *et al.* (2022). Estes métodos envolvem transformações do espaço original das variáveis aleatórias de entrada do problema. Nestes casos, os dados de entrada, representados por suas distribuições de probabilidade, são convertidos para um espaço normal padrão no qual as variáveis possuem média nula e valores de desvios padrão unitários.

3.3.4.1 FIRST ORDER SECOND MOMENT – FOSM

Para o método FOSM a equação do estado limite é aproximada por uma função linear e a transformação estatística se limita até o segundo momento. Com a aproximação até o segundo momento, as variáveis passam a ser representadas apenas pela média e pelo desvio padrão, ou seja, é considerado que estas sejam representadas por uma distribuição normal. Com isso, a função de desempenho pode ser descrita como:

$$g(\underline{X}) = R - Q \quad 3.17$$

onde as constantes se mantêm as mesmas que as estabelecidas na Seção 3.3.2 “Análise de Confiabilidade”, ou seja, Q representa o esforço solicitante e R o esforço resistente.

Assumindo que as variáveis Q e R sejam independentes e normalmente distribuídas, a função $g(\underline{X})$ também será gaussiana. Assim, para prosseguir o entendimento, a função de densidade de probabilidade para uma distribuição normal é dada por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad 3.18$$

Com esse cenário, um evento de falha pode ser definido para os casos em que o esforço solicitante for superior ao resistente. Considerando a Equação 3.17, a falha pode ser definida por $p_f = P[g(\underline{X}) < 0]$ ou conforme desenvolvimento apresentado abaixo:

$$P_F = P \left[\frac{g(\underline{X}) - \mu_{g(x)}}{\sigma_{g(x)}} < 0 \right] \quad 3.19$$

onde,

$$PF = P \left[\frac{R - Q - \mu_{R-Q}}{\sigma_{R-Q}} < 0 \right] \quad 3.20$$

ou seja,

$$PF = \Phi \left[\frac{0 - (\mu_R - \mu_Q)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right] \quad 3.21$$

ou,

$$PF = 1 - \Phi \left[\frac{(\mu_R - \mu_Q)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right] \quad 3.22$$

sendo $\Phi(\cdot)$ a função de distribuição acumulada da normal padrão.

O índice de confiabilidade (β) é correlacionado com a probabilidade de falha, conforme apresentado na sequência:

$$\beta = \frac{\mu_{g(x)}}{\sigma_{g(x)}} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad 3.23$$

assim,

$$PF = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad 3.24$$

Alves (2014) define o índice confiabilidade como uma medida relativa da segurança do projeto, de forma que o projeto mais confiável é aquele com maior valor de β . O autor ainda expõe, conforme ilustrado na Figura 3.12, as confiabilidades relativas para um problema envolvendo as variáveis R e Q .

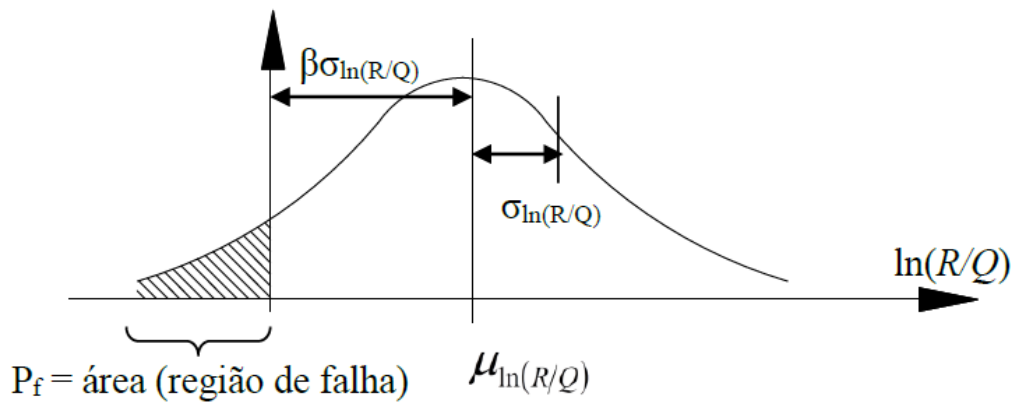


Figura 3.12. Definição do índice de confiabilidade (Alves, 2014).

Na Figura 3.12 é exemplificado o fato de que um estado-limite é atingido quando $\ln(R/Q) \leq 0$, ou seja, os esforços solicitantes se apresentam maiores que os resistentes. Assim, a área abaixo da curva $\ln(R/Q)$ é a probabilidade de violar o estado-limite pré-estabelecido (Alves, 2014).

3.3.4.2 FIRST ORDER RELIABILITY METHOD – FORM

O método FORM é proposto como uma derivação do FOSM. Nesta abordagem, as distribuições estatísticas de probabilidade são quaisquer e dependentes, ou não, entre si. De maneira análoga ao realizado no método FOSM, as variáveis do problema são transformadas em variáveis aleatórias normais padrão estatisticamente independentes.

No FORM, a equação de estado-limite $G(X)$ é reescrita em função das variáveis normais padrão Y como $G(Y)$ e a superfície de falha $G(Y) = 0$ é aproximada por um hiperplano no ponto de projeto Y^* . O ponto de projeto, Y^* , deve representar a menor distância entre a origem e o domínio de falha, retratando, portanto, o índice de confiabilidade do sistema (Alves, 2014).

Com o índice de confiabilidade (β) definido pela distância da origem até o ponto de projeto Y^* , tem-se que $\beta = \|Y^*\|$ e, conseqüentemente:

$$Y^* = -\alpha\beta \quad 3.25$$

onde α é o vetor normal a superfície de falha no ponto de projeto e a função da superfície de falha é estabelecida por:

$$G(Y) = -\beta \sum \alpha_i \beta_i \quad 3.26$$

No FORM, a equação de estado-limite $G(X)$ é reescrita em função das variáveis normais padrão Y como $G(Y)$ e a superfície de falha $G(Y) = 0$ é aproximada por um hiperplano no ponto de projeto Y^* . O ponto de projeto, Y^* , deve representar a menor distância entre a origem e o domínio de falha, retratando, portanto, o índice de confiabilidade do sistema (Alves, 2014).

Como a probabilidade de falha é calculada de forma aproximada e dependente da função de forma $G(Y)$, o resultado será a favor da segurança quando $G(Y)$ for convexa em torno do ponto de projeto ou ser contra no caso contrário (Figura 3.13).

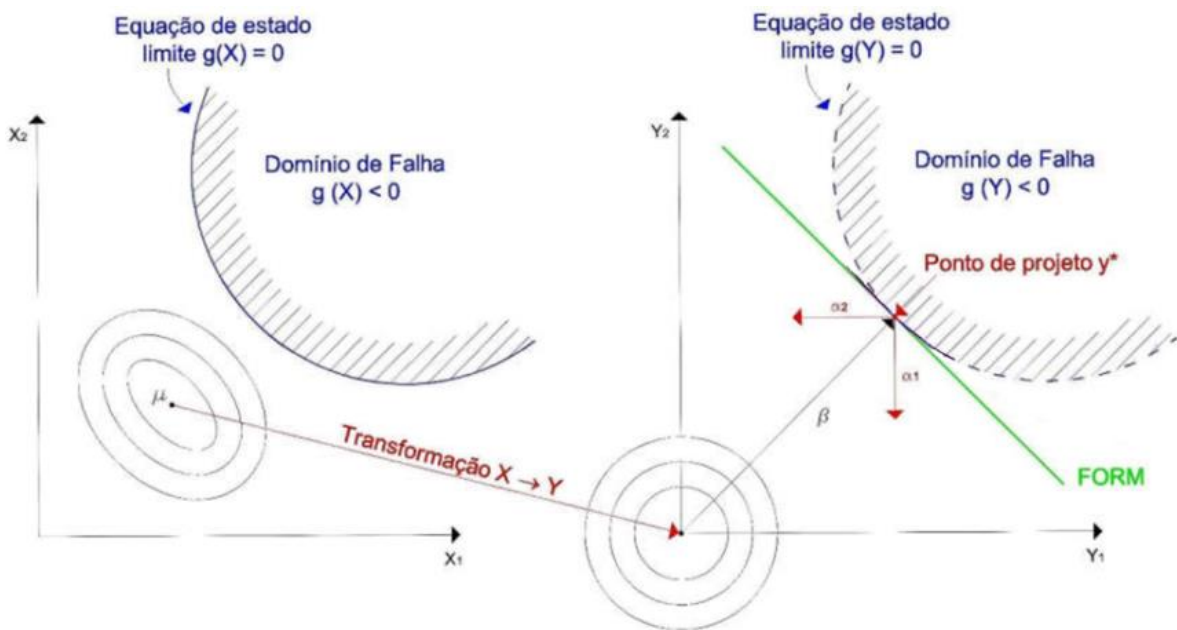


Figura 3.13. Transformação aplicada ao método FORM (Modificado - Sakamoto, 2016).

Para fazer a transformação das variáveis aleatórias para o espaço Y_1 e Y_2 , a transformação de Nataf apresenta-se como uma metodologia bem difundida em casos de confiabilidade estrutural (Nataf, 1962 *apud* Kiureghian e Liu, 1986). Este método é aplicável quando as variáveis já apresentam uma distribuição de probabilidade normal e, portanto, se este não for o caso, é preciso efetuar uma transformação prévia para obter uma distribuição normal equivalente.

O método FORM, além da probabilidade de falha, também fornece medidas de sensibilidade, tais como: os fatores de importância, fatores de omissão e fatores de sensibilidade paramétricos.

Os fatores de importância, por exemplo, podem indicar quais variáveis tem maior influência no resultado da probabilidade de falha. Para a presente tese esta é uma informação de especial relevância, pois pode servir como referência na escolha dos parâmetros a serem avaliados de forma determinística, ainda que aplicados a outros métodos.

Um algoritmo comumente utilizado no FORM e SORM é o de Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler, conhecido como HLRF (Hasofer e Lind, 1974; Rackwitz e Fiessler, 1978). Em aplicação relacionada a confiabilidade estrutural, Santos (2012) cita que o HLRF é fundamentado no método de Newton e, a cada iteração, k , a equação do estado limite é substituída por sua linearização no ponto corrente y^k . Isto posto, o próximo iterando y^{k+1} é o ponto sobre a equação do estado limite linearizada e caracterizada por:

$$h(y^k) + \nabla h(y^k)^T (y - y^k) = 0 \quad 3.27$$

Para caracterizar este processo iterativo, Santos (2012) ainda ilustra uma aplicação na Figura 3.14.

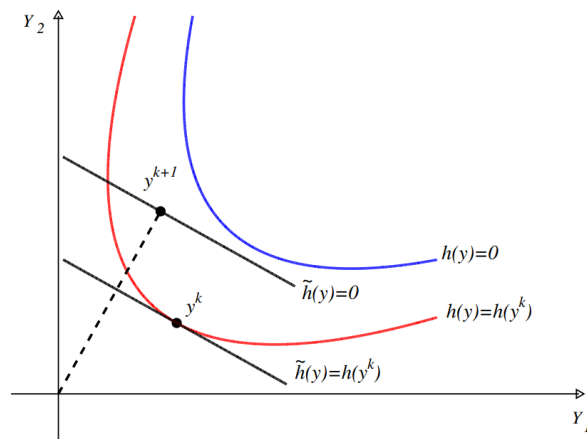


Figura 3.14. Iteração proposta pelo algoritmo HLRF (Santos, 2012).

Com relação à utilização do método FORM em análises de confiabilidade, aplicada a casos da engenharia tuneleira, destacam-se as recentes publicações de Lu *et al.* (2017), Hamrouni *et al.* (2019) e Fuyong *et al.* (2019). Nessas pesquisas, com ênfase em diferentes perspectivas, tem como ponto em comum que as variáveis aleatórias utilizadas foram as propriedades geomecânicas do maciço.

3.3.4.3 SECOND-ORDER RELIABILITY METHOD – SORM

Em linha com o apresentado para o FORM, o método SORM utiliza a expansão de Taylor de segunda ordem para a aproximar a função de desempenho no ponto de projeto (Y^*). Esta aproximação é detalhadamente descrita por Du (2005) e é inicialmente apresentada como:

$$g(U) \approx q(U) = g(Y^*) + \nabla(Y^*)(U - Y^*)^T + \frac{1}{2}(U - Y^*)H(Y^*)(U - Y^*)^T \quad 3.28$$

Em que $H(Y^*)$ é a matriz Hessiana no ponto de máxima potência. Matematicamente, este é representado da seguinte forma:

$$H(Y^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g}{\partial U_1^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial U_1 U_2} & \dots & \frac{\partial^2 g}{\partial U_1 U_n} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial U_2 U_1} & \frac{\partial^2 g}{\partial U_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 g}{\partial U_2 U_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 g}{\partial U_n U_1} & \frac{\partial^2 g}{\partial U_n U_2} & \dots & \frac{\partial^2 g}{\partial U_n^2} \end{bmatrix}_{Y^*} \quad 3.29$$

Após um conjunto de transformações lineares, a função de desempenho é simplificada para:

$$q(U) = U_n - \left(\beta + \frac{1}{2} Y^{*T} D Y^* \right) \quad 3.30$$

Em que D é a matriz diagonal $(n-1) \times (n-1)$ onde os elementos são determinados pela matriz Hessiana $H(Y^*)$ e $Y^* = \{U_1, U_2, \dots, U_{n-1}\}$.

Nas ocasiões em que β for suficientemente grande, uma solução assintótica da probabilidade de falha pode ser derivada como:

$$p_f = P\{g(X) < 0\} = \phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta k_i)^{1/2} \quad 3.31$$

Em que k_i denota a i -ésima curvatura principal da função de desempenho $g(U)$ no ponto de máxima potência.

Como a aproximação da função de desempenho em SORM é melhor do que em FORM (Figura 3.15), o SORM é geralmente mais preciso do que FORM. Ainda assim, como o SORM requer uma derivada de segunda ordem, este método não é tão eficiente quanto o FORM quando as derivadas são avaliadas numericamente. Ademais, se for utilizado o número de análises da

função de desempenho para medir a eficiência, o SORM requer mais avaliações de função do que o FORM.

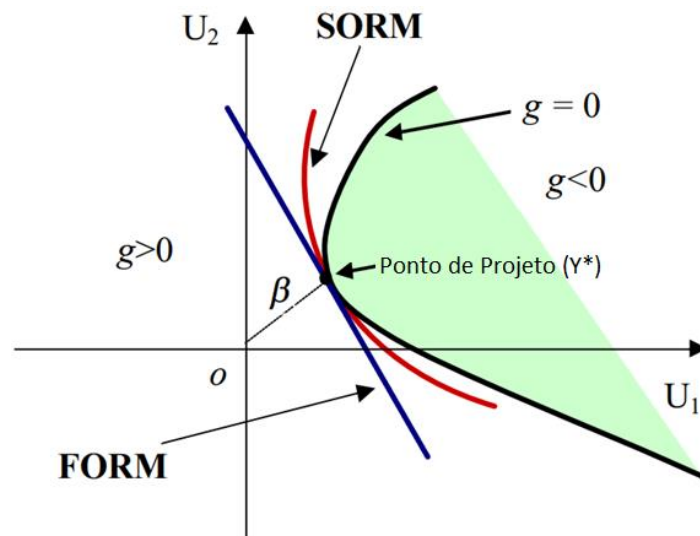


Figura 3.15. Comparação entre FORM e SORM (Modificado - Du, 2005).

3.4 CONSEQUÊNCIAS DA OCORRÊNCIA DO RISCO

As consequências podem ser entendidas como os resultados gerados pela ocorrência de um risco, provocando resultados danosos ou benéficos. Conforme exposto na Seção 3.3.1 “Avaliação da Probabilidade de Ocorrência de Riscos”, o meio técnico da engenharia atribui foco aos eventos de probabilidade de falha ainda que os riscos benéficos, mapeados pelo escritório de projetos, também sejam de igual relevância.

De maneira análoga ao proposto para a probabilidade de falha, as consequências podem ser definidas de forma qualitativa ou quantitativa. Guerrero (2014) cita que a avaliação qualitativa é inevitável, porém, a decisão em fazê-la de forma quantitativa depende de outros fatores, tais como: a disponibilidade e qualidade dos dados; o tipo de problema; o escopo do empreendimento; e até o nível de entendimento do analista, no que tange ao conceito e às ferramentas de análise de risco.

A análise qualitativa das consequências é importante mesmo nos casos em que se planeje obter uma resposta quantitativa. Essa avaliação, especialmente na fase de projeto, serve de guia para a definição dos riscos que serão avaliados em etapas posteriores. Para que o conceito qualitativo

da consequência possa ter correlação com aqueles adotados para a probabilidade de ocorrência, um procedimento comum é a atribuição de pesos, conforme exemplificado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Análise qualitativa das variáveis técnicas do gerenciamento de risco

Probabilidade de ocorrência		Consequências da ocorrência	
Conceito qualitativo	Peso	Conceito qualitativo	Peso
Improvável	1	Desprezível	1
Pouco provável	2	Considerável	2
Provável	3	Alta	3
Muito provável	4	Muito alta	4

As variáveis técnicas podem ter mais que quatro níveis de qualificação, entretanto, é desejável que a probabilidade de ocorrência e as consequências tenham o mesmo número de pesos. Assim, é possível aplicar o conceito de risco de maneira análoga ao ilustrado na Figura 3.2, atribuindo grau de importância a cada evento.

Na análise quantitativa das consequências espera-se uma avaliação mais detalhada dos riscos elencados como mais relevantes na análise qualitativa. Eskesen *et al.* (2004) citam que a apuração quantitativa das consequências pode ser realizada por meio de árvore de eventos ou partindo de uma análise plenamente heurística, por parte do especialista ou conjunto de especialistas. Em ambas as análises, as consequências podem ter um único valor determinístico ou cada caso ser considerado como uma variável estocástica.

Para avaliar as consequências da falha de túneis em ambientes urbanos, diversas são as interferências com as estruturas vizinhas que devem ser consideradas. Guerrero (2014) subdivide as consequências associadas a um empreendimento de túnel urbano em cinco grupos, são eles:

- I. Consequências físicas:
 - Diretas sobre a obra;
 - Sobre a infraestrutura de terceiros.
- II. Consequências Sociais:
 - Perdas de vidas humanas;

- Psicológicas e morais associadas, por exemplo, a condições de ruptura da estrutura familiar devido à perda de uma vida;
- Culturais ou simbólicas associadas, por exemplo, com a mudança da rotina de um ambiente urbano.

III. Consequências ao meio ambiente.

IV. Consequências políticas ou de imagem do empreendimento na sociedade.

V. Consequências econômico-administrativas, tais como, o atraso na entrega da obra.

Para a análise das consequências, o risco global pode ser associado à mera soma das consequências isoladas ou considerar que cada consequência está associada a uma distribuição probabilística de ocorrência.

4 TÉCNICAS MODERNAS DE CÁLCULO DE PROBABILIDADE DE FALHA EM TÚNEIS URBANOS

Na última década, o estudo das interações entre os túneis e as estruturas lindeiras tem obtido importância notória nas publicações de impacto relacionadas à engenharia tuneleira. Crombecq *et al.* (2011) relatam que, a fim de reduzir o tempo de execução, os custos e/ou os riscos, os problemas da engenharia moderna dependem de simulações numéricas robustas. Tais simulações podem ser usadas para entender e fornecer perspectivas sobre o comportamento das estruturas em estudo e, também, para identificar regiões que requerem maior nível de detalhamento nos projetos. Ademais, variando os parâmetros de entrada e observando os resultados de saída, também é possível compreender as relações entre os diferentes parâmetros de entrada e como estes afetam as saídas (Crombecq *et al.*, 2011).

Esta avaliação computacional de cenários para um sistema complexo com múltiplas entradas e saídas pode ser um processo muito demorado, mesmo para uma única execução (Crombecq *et al.*, 2011). Gorissen *et al.* (2007), por exemplo, indicam que a *Ford Motor Company* relatou a necessidade de utilização de 36 a 160 h para simular uma colisão de um carro de passageiros. Assim, a utilização direta desta simulação ainda é impraticável para engenheiros que desejam explorar, otimizar ou obter uma visão do sistema.

Este cenário não é diferente para a análise de túneis urbanos, já que normalmente é necessário construir modelos numéricos que tendem a ser computacionalmente robustos. Recapitulam-se as publicações de Farias *et al.* (2004), Guerrero (2014) e Franco (2019) para alguns exemplos. Notam-se nestes e em outros casos que a otimização do modelo numérico é uma questão relevante na resolução do problema.

Considerando ainda a importância de realizar uma avaliação de risco de um determinado problema de engenharia, Wang *et al.* (2004) relatam que os métodos quantitativos probabilísticos para análise de incerteza incluem as seguintes etapas:

- quantificação e atribuição de distribuições probabilísticas para as incertezas que são utilizadas como variáveis de entrada;
- amostragem das distribuições destes parâmetros incertos de forma iterativa, utilizando os métodos Monte Carlo;
- propagação dos efeitos das incertezas por meio do modelo; e
- previsão dos resultados em termos de medidas probabilísticas.

Wang *et al.* (2004) também indicam que a qualidade e consistência da análise probabilística dependem do número de amostras escolhidas. Este número deve ser definido para cada análise específica, pois depende de fatores como: tipo de modelo, gerador de números aleatórios utilizados, tipo de distribuições e a medida probabilística de saída.

Em geral, para otimizar as avaliações de risco, têm-se como objetivo reduzir o máximo possível a quantidade de amostras sem impactar a precisão das decisões. Assim, é desejável a utilização de uma técnica de amostragem que possa prever os resultados com a precisão desejável e com o número mínimo de amostras.

Crombecq *et al.* (2011) elencam outros autores que argumentam que o número de amostras é muito mais importante do que a qualidade amostral. Estes autores discutem que é certo que o número de amostras tem um efeito importante sobre a qualidade do modelo, por outro lado, aplicações práticas e teóricas revelam que algumas configurações de amostragem são melhores do que outras. Como cada avaliação de amostra pode ser potencialmente muito onerosa, Crombecq *et al.* (2011) destaca que é importante estudar a localização ideal de uma amostra antes de submetê-la a uma avaliação numérica mais robusta.

Em linha com o exposto, detalhado na Seção 3.3.3 “Método de Monte Carlo e suas Variações”, Santos e Beck (2014) apresentam resultados que comparam a amostragem simples com outras técnicas de amostragem. Em linhas gerais, os ganhos ilustrados para as técnicas de amostragem inteligente estão vinculados com o fato destas mapearem o domínio de forma mais homogênea.

Isto posto, não apenas a quantidade, mas também onde cada amostra é gerada, pode auxiliar na otimização da avaliação probabilística. Para situações aplicadas a engenharia tuneleira, Wang *et al.* (2004) indicam a importância de definir quais parâmetros do modelo numérico não devem ser tratados como determinísticos, mas sim como Variáveis Aleatórias (VA). Essa decisão usualmente pode ser adotada fundamentada em uma revisão bibliográfica sobre a influência de cada parâmetro.

Por exemplo, pode-se procurar as distribuições estatísticas e os valores do coeficiente de variação (CV) relatados para cada parâmetro. Como os CV indicam a magnitude relativa entre a média e os valores de desvio padrão de uma determinada VA, parâmetros com CV baixo, próximos de zero, tendem a ser considerados como variáveis determinísticas. Os trabalhos de Srivastava e Sivakumar Babu (2009), Kayser & Gajan (2014) e Grasmick *et al.* (2020) apresentam discussões importantes sobre este assunto.

Outro passo nesta identificação das VA é avaliar quais parâmetros são importantes para o problema específico que está sendo estudado. Em certos casos, a disposição espacial e as condições do problema podem nos permitir desconsiderar algumas VA com base em sua influência relativa sobre um resultado específico. Por exemplo, os parâmetros constitutivos de uma camada profunda de solo podem ter baixo ou nenhum impacto sobre o comportamento de túneis rasos. Este processo de avaliação prévia é importante para direcionar os detalhes das simulações para os fatos que realmente impactam o resultado, evitando execuções desnecessárias dos algoritmos numéricos. Há vários métodos na literatura para esta análise de sensibilidade e seleção de características, tais como a aproximação de primeira ordem da variância (FOSM) (Melchers, 1999) e a análise do diagrama Tornado (Clemen, 1996).

Após a realização deste processo de identificação dos parâmetros, é importante amostrar as VA de acordo com uma técnica adequada. Sequencialmente, os valores amostrados são utilizados para executar os modelos numéricos determinísticos, produzindo um conjunto de resultados que refletem a variabilidade dos parâmetros de entrada.

Matematicamente, pode-se dizer que $X_i, i = 1, \dots, n$ são as VA de entrada de uma simulação de n -parâmetros. Neste estudo, a saída é assumida como uma função determinística conhecida $d(X)$ cujo argumento é um vetor com amostras $X^{(s)}_i$ de cada uma das variáveis aleatórias de entrada, $X = [X^{(s)}_1, X^{(s)}_2, \dots, X^{(s)}_n]$.

Normalmente, uma abordagem Monte Carlo terminaria neste momento, calculando a probabilidade de ocorrência fundamentada no conjunto de resultados. De qualquer forma, como indicado anteriormente, isto pode ser inviável devido ao elevado esforço computacional requerido por modelos numéricos mais complexos. Em casos práticos, estas simulações podem levar até vários dias para serem concluídas.

Um método moderno para solucionar este impedimento é o uso da Inteligência Artificial (IA) em uma amostragem reduzida. As técnicas de IA podem ser capazes de aprender com um menor número de amostras e interpolar novos resultados a partir de diferentes parâmetros de entrada. Este algoritmo, quando calibrado, é usado como um substituto para o modelo numérico, tentando imitá-lo e permitindo a execução de várias milhões de amostras em uma curta fração de tempo. Em outras palavras, faz-se necessário treinar um modelo de inteligência artificial $d^{IA}(X)$ para substituir o modelo numérico $d(X)$, permitindo múltiplas avaliações em segundos (Figura 4.1). Isto permite gerar conjuntos massivos de resultados, que podem ser usados

adequadamente para avaliar a probabilidade de ocorrência mesmo em cenários em que uma amostragem suficiente para o Monte Carlo se fizer desejável.

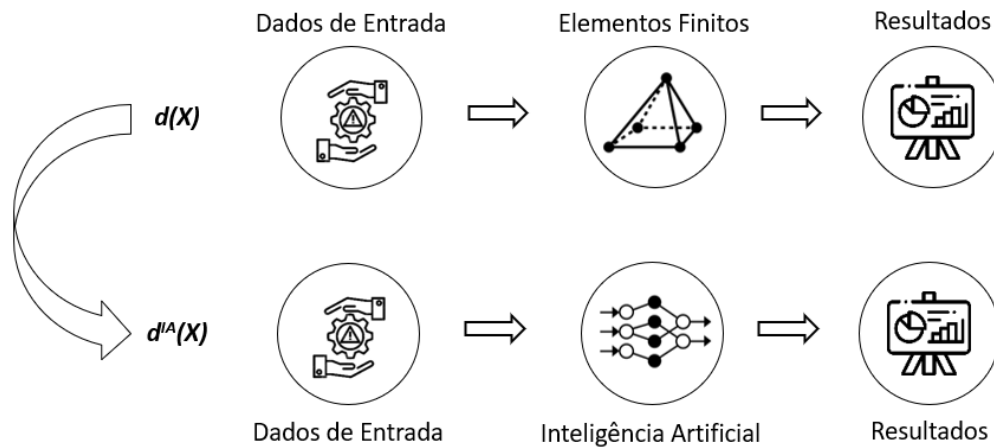


Figura 4.1. Construção de modelos substitutos como alternativa a resoluções numéricas robustas.

A fim de calibrar corretamente o algoritmo de IA, é necessário amostrar as variáveis aleatórias. Ressalta-se que além das técnicas de amostragem padrão, a literatura revela vários procedimentos aprimorados que alcançam uma série de benefícios, conforme detalhado na Seção 3.3.3. Nos casos em que o intuito é construir um modelo substituto de IA, Crombecq *et al.* (2011) apontam para necessidade de criar um modelo aproximado que imite o simulador original, fundamentado em um número limitado de simulações robustas, mas que pode ser avaliado muito mais rapidamente.

Nos casos em que se deseja entender como o algoritmo numérico se comporta para múltiplos parâmetros de entrada, é necessário amostrar estes parâmetros a fim de cobrir o máximo possível todo o domínio de entrada. Assim, os pontos de amostragem devem mapear o domínio de forma homogênea, de modo que o comportamento geral do sistema seja identificado (Batmaz e Tunali, 2003; Gorissen *et al.*, 2010; Crombecq *et al.*, 2011). Isto pode ser alcançado com as chamadas técnicas de preenchimento de espaço, que tentam amostrar um domínio multidimensional de forma que cada subdomínio seja, também, quase igualmente amostrado. Estas técnicas podem ser facilmente implementadas e proporcionam uma boa e garantida cobertura do domínio. Para exemplificar, citam-se algumas técnicas populares de

preenchimento de domínio, tais como: matrizes ortogonais (Fang, 1980), projetos fatoriais fracionários (Simpson *et al.*, 2001) e hipercubos latinos (Grosso *et al.*, 2009).

Ao selecionar uma técnica de preenchimento de domínio, assegura-se que algoritmo de IA aprenderá com um conjunto de valores que representam verdadeiramente todo o espaço, sendo capaz de produzir resultados precisos também para valores menos prováveis. Depois que esta técnica de amostragem inteligente é adotada, torna-se viável o treinamento do algoritmo de IA.

Os métodos de IA estão ganhando atenção em diversas áreas do conhecimento devido a suas capacidades e adaptabilidade. Shreyas e Dey (2019) investigam a aplicabilidade em problemas relacionados a túneis, explorando as técnicas de redes neurais artificiais, funções de base radial, árvores de decisão, método de floresta aleatória, máquinas vetoriais de suporte, métodos de regressão não linear como *splines* de regressão adaptativa multivariadas e modelos híbridos inteligentes. Ênfase é atribuída às redes neurais artificiais, capazes de modelar relações não lineares entre múltiplas variáveis de entrada e saída. Além disso, esta técnica já foi aplicada a uma série de estudos tuneleiros, tais como Suwansawat e Einstein (2006), Zhang *et al.* (2016), Yang e Xue (2017), Zhang *et al.* (2019) e outros. Por fim, outras técnicas mais simples como árvores de decisão também tiveram sua aplicação validada em problemas relacionados a túneis como expostos em Shahriar *et al.* (2008), Dindarloo e Siami-Irdemossa (2015), Mohmoodzadeh *et al.* (2020) e outros.

Além de serem capazes de criar modelos substitutos, os algoritmos de IA também podem ser usados para selecionar quais variáveis aleatórias são importantes para um problema específico. Para isso, deve-se usar a eliminação recursiva de características com técnicas de validação cruzada para selecionar o número de características que realmente afetam os resultados. Isto pode ser alcançado usando o método RFECV do pacote Python de *sklearn*. Este método permite encontrar as variáveis informativas de entrada para um determinado algoritmo de IA, por meio de um procedimento recursivo, onde as características são removidas iterativamente. Neste caso, o melhor subconjunto de características é escolhido com base na pontuação de validação cruzada do modelo.

Fundamentado no exposto, a próxima seção detalha a estrutura metodológica proposta por Domingues *et al.* (2022) que combina simulação numérica, técnicas de IA e técnicas de amostragem inteligente para construir um modelo substituto capaz de avaliar os deslocamentos verticais induzidos pela construção de um túnel urbano.

5 METODOLOGIA

Esta seção apresenta em maiores detalhes a estrutura metodológica proposta por Domingues *et al.* (2022) para o cálculo da probabilidade de falha, fazendo uso de simulações numéricas, técnicas de inteligência artificial e algoritmos de amostragem inteligente. De uma maneira mais abrangente, a metodologia pode ser subdividida em quatro macro etapas distintas, conforme ilustrado na Figura 5.1.

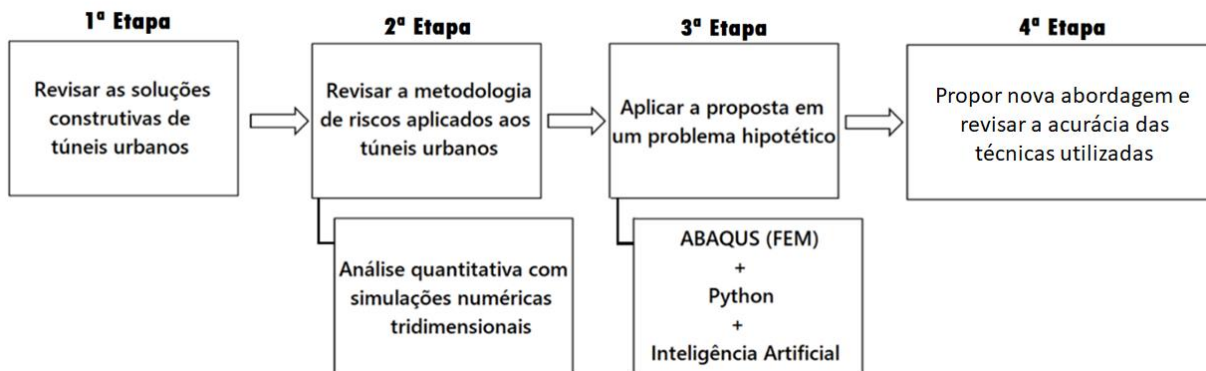


Figura 5.1. As quatro macro etapas da metodologia proposta.

Para revisar as soluções construtivas de túneis urbanos foi dado enfoque nas técnicas exitosas aplicadas na melhoria do maciço (Seção 2.1) e, também, em sua estabilização (Seção 2.2). Ademais, ainda que não seja objeto de aprofundamento nesta tese, foram apresentadas as tuneladoras (Seção 2.3), devido à importância dessas máquinas na construção de túneis em ambientes urbanos.

Com relação à segunda macro etapa, ainda de revisão bibliográfica, a pesquisa consolida informações nas Seções 3 e 4, mas também permeia conteúdo sobre esta abordagem por toda a tese. No que tange a quantificação da probabilidade de falha, fundamentadas em análises numéricas, esta retrata uma das fases mais complexas da análise de risco. Isso é justificado pelo fato desta probabilidade ser altamente dependente de diversas variáveis aleatórias consideradas no problema. Além disso, para as obras geotécnicas, trata-se de valores de pequena ordem de grandeza e, por isso, são muito sensíveis a variações. Quantificá-las usualmente requer elevado esforço computacional e, por isso, ferramentas de inteligência artificial (IA) podem auxiliar na geração de amostras e obtenção de uma melhor acurácia nos resultados.

Para a terceira etapa, de aplicação prática em um problema hipotético, a determinação da probabilidade de falha foi calculada considerando as análises numéricas do programa ABAQUS®, uma rotina de obtenção de amostras utilizando Python® e a interpolação dos resultados por técnica de inteligência artificial.

Com posse de uma gama de resultados determinísticos, foi possível prosseguir para a quarta etapa e avaliar a acurácia dos métodos de confiabilidade descritos na Seção 3.3 “Probabilidade de Ocorrência”, a destacar: a técnica de Monte Carlo com suas variações e os métodos semi analíticos FOSM, FORM e SORM.

Ao conhecer a estratégia metodológica macro da tese, têm-se a importância de detalhar os aspectos técnicos e práticos da solução do problema hipotético. Assim, fundamentado nos dois primeiros passos de revisão bibliográfica, na Figura 5.2 são detalhadas a terceira e a quarta macro etapa exposta na Figura 5.1.

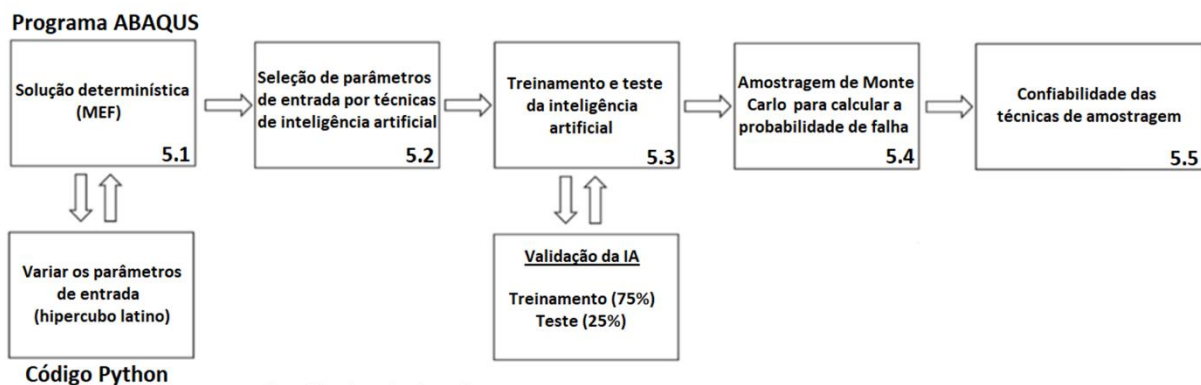


Figura 5.2. Detalhamento da proposta metodológica com a combinação do programa ABAQUS®, de um código do Python® e técnicas de inteligência artificial.

Destaca-se que na Figura 5.2 as etapas estão numeradas de 5.1 a 5.5, identificações estas que representam as subseções que detalham cada um dos passos.

5.1 SOLUÇÕES DETERMINÍSTICAS UTILIZADAS PARA CONSTRUIR MODELOS SUBSTITUTOS

A solução determinística foi obtida com o auxílio do programa ABAQUS®. Este programa foi combinado com um código Python® para permitir a amostragem das variáveis aleatórias de

entrada e a consolidação dos arquivos necessários para as simulações. Conforme exposto nas seções 3.3.3 e 4, o método de amostragem do hipercubo latino apresenta uma boa capacidade de preenchimento do domínio e foi utilizado para obter um conhecimento geral dos valores de entrada e saída.

Desta forma, foi necessário importar o algoritmo de amostragem por hipercubo latino (LHS), implementado no pacote skopt, do Python, em especial, a partir dos métodos 'skopt.sampler'. Foram utilizados o tipo 'centralizado', onde os pontos são definidos uniformemente em cada intervalo, e o critério 'maximin' em que o LHS otimizado é implementado maximizando a diferença mínima entre todos os pontos amostrados.

Miller & Kunce (1973) e Pedhazur & Schmelkin (1999) indicam que, para calibrar regressões multi-variáveis significativas, em média, as amostras precisam ser de 10 a 30 vezes o número de variáveis de entrada. Knofczynski & Mundfrom (2007) ainda complementam pontuando que este número mínimo de amostras também é significativamente impactado pela correlação entre as variáveis consideradas.

No caso desta tese, destaca-se que a maioria das publicações da engenharia geotécnica apresentam várias relações empíricas entre os parâmetros constitutivos. Por exemplo, Kumar *et al.* (2016) indicam que o número de golpes no ensaio de SPT (N_{SPT}) pode ser usado para prever o Módulo de Young, a coesão e o ângulo de atrito dos solos. Portanto, isto sugere uma alta correlação entre estas variáveis. Além disso, sabe-se também que K_0 pode ser relacionado ao ângulo de atrito, conforme exposto desde Jaky (1944) até Michalowski (2005), o que novamente indica que as variáveis de entrada consideradas estão altamente correlacionadas.

Assim, ao considerar a correlação das variáveis de Módulo de Young, coesão e ângulo de atrito, foi possível inferir que os parâmetros de entrada podem ser reduzidos de 34 para 26. Isso porque quatro variáveis de ângulo de atrito e outras quatro de coesão são dependentes. Isto posto, considerando que o K_0 é dependente do ângulo de atrito, que também é dependente do Módulo de Young, o número de variáveis independentes passa de 24 para 20. Finalmente, fundamentado na dependência entre Módulo de Young e relação de Poisson, o número passa de 20 para 14. Outras possíveis relações de dependência podem ser investigadas, tais como densidade e ângulo de atrito. Ainda assim, para simplificar o processo, a redução foi paralizada com estas 14 variáveis independentes. Destaca-se ainda que estas correlações podem apresentar imprecisões consideráveis em um processo decisório de risco de engenharia. De toda forma, para utilização proposta nesta tese, as agregações não trazem prejuízo ao método.

Na teoria, seria necessário gerar de 140 a 420 amostras se todas as variáveis independentes fossem efetivamente necessárias para explicar a resposta requerida, que é o deslocamento nos elementos de fundação. De maneira simplificada, 170 amostras, que representam cinco vezes o número a quantidade de parâmetros de entrada, foram geradas neste trabalho. Essa premissa se mostra efetiva uma vez que o número de variáveis explicativas caiu consideravelmente após a etapa de seleção de variáveis.

Considerando o tempo de processamento computacional na geração e armazenamento de todos os resultados do ABAQUS®, a rotina proposta em Python® também cumpriu o dever de coletar especificamente tensões e deslocamentos para nós específicos da malha. Como parte da rotina, para cada simulação foi criada uma planilha eletrônica (".xlsx") que permitiu que os resultados pudessem ser facilmente consultados posteriormente.

Os limites máximos e mínimos dos intervalos de amostragem, para cada variável aleatória, devem ser definidos para combinar o valor mais desfavorável possível do parâmetro com o valor correspondente ao percentil de 95% da variável de entrada. Assim, para a otimização do domínio no modelo numérico, foi realizada uma primeira amostragem determinista nesta condição crítica.

Para partir das informações preliminares até a obtenção de resultados determinísticos, foram percorridas as seguintes etapas: definição do contexto do estudo de caso; solução determinística do modelo; otimização da solução determinística; e implantação de um código para obtenção da amostragem estatística. As etapas são detalhadas no Apêndice A e ilustradas na Figura 5.3.

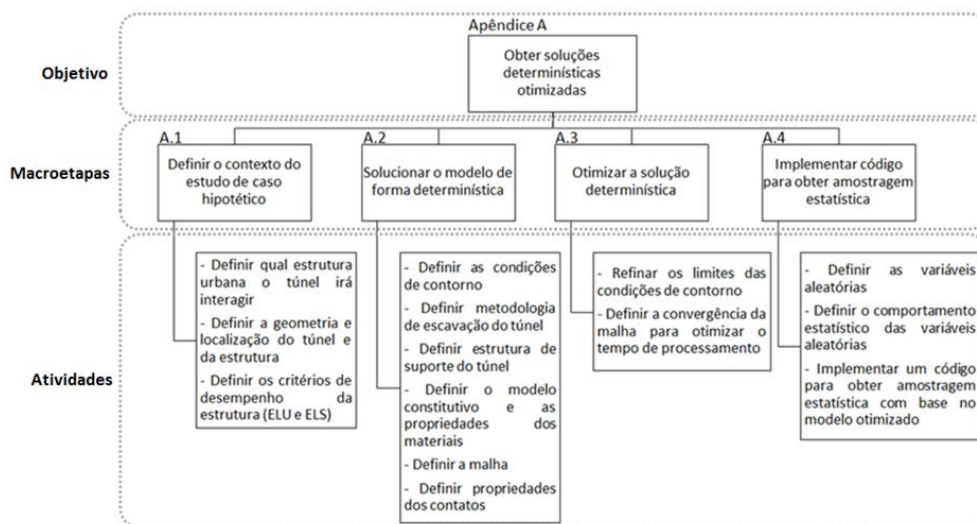


Figura 5.3. Estruturação para solução determinística do caso hipotético.

5.2 SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE ENTRADA POR TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Conforme descrito, a importância relativa dos parâmetros de entrada pode ser avaliada por meio do pacote Python® *sklearn* pelo método conhecido como RFECV, que trata da eliminação recursiva de variáveis com validação cruzada. Este método permite encontrar as variáveis informativas de entrada para um determinado algoritmo de IA, por meio de um procedimento recursivo, onde as características são removidas iterativamente. Assim, o melhor subconjunto de características é escolhido com base na pontuação de validação cruzada do modelo. Particularmente, o algoritmo do 'sklearn' inicia o processo com um modelo que inclui todas as variáveis e depois atribui uma pontuação de importância a cada uma delas. Em seguida, as variáveis aleatórias de menor importância são removidas, o modelo é reconstruído e as pontuações de importância são recalculadas. Nesta tese, para cada iteração do método RFECV, uma única característica foi removida após uma estratégia de validação cruzada de 5 vezes (parâmetros do modelo 'step=1', 'cv=5'). Assim, o resultado desta análise pode levar a uma redução no número de variáveis aleatórias envolvidas no problema.

Em vez de selecionar apenas um algoritmo regressor para usar o método RFECV, optou-se por realizar uma estratégia de votação, onde várias técnicas foram aplicadas e cada parâmetro recebeu um voto sempre que foi selecionado como uma característica relevante para o modelo.

Ao utilizar a biblioteca Python 'sklearn', foram reunidos todos os estimadores tipo regressor disponíveis importando o método "all_estimators" de "sklearn.utils" e obtendo os estimadores disponíveis como "all_estimators(type_filter='regressor')". Assim, fundamentado no proposto por Pedregosa *et al.* (2011) e Scikit (2022), foram consideradas as seguintes técnicas: 'ARDRegression', 'AdaBoostRegressor', 'BayesianRidge', 'CCA', 'DecisionTreeRegressor', 'ElasticNet', 'ElasticNetCV', 'ExtraTreeRegressor', 'ExtraTreesRegressor', 'GradientBoostingRegressor', 'HuberRegressor', 'Lars', 'LarsCV', 'Lasso', 'LassoCV', 'LassoLars', 'LassoLarsCV', 'LassoLarsIC', 'LinearRegression', 'LinearSVR', 'OrthogonalMatchingPursuit', 'PLSCanonical', 'PLSRegression', 'PassiveAggressiveRegressor', 'PoissonRegressor', 'RandomForestRegressor', 'Ridge', 'RidgeCV', 'SGDRegressor', 'TheilSenRegressor', 'TweedieRegressor'.

Não foi realizado nenhum ajuste hiperparamétrico manual sobre estas técnicas. Para alguns dos casos, principalmente aqueles com validação cruzada, é realizado um refinamento automático. Além disso, fundamentado no proposto por Rokach (2010), foi considerada uma metodologia

de conjunto, notando-se que mesmo os preditores fracos, quando combinados em uma estratégia de votação, podem levar a uma previsão global robusta das características importantes.

Destaca-se que foi elaborada uma escala dos valores de entrada usando a função `MinMaxScaler` do pacote `sklearn`, que escalona e traduz cada característica individualmente de modo que esteja na faixa determinada no conjunto de treinamento (no caso, entre zero e um). Finalmente, os parâmetros mais votados foram escolhidos para construir o modelo otimizado de IA. Entende-se como parâmetros mais votados aqueles que foram importantes para, pelo menos, 50% dos algoritmos regressores utilizados.

5.3 TREINAMENTO E TESTES DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Ao considerar a obtenção do número ideal de variáveis aleatórias de entrada, todos os regressores de inteligência artificial usados na etapa de seleção de variáveis foram submetidos novamente ao processo de treinamento e teste. Para este processo de treinamento e teste, uma proporção de 75% das amostras foi utilizada para treinamento (128 casos) e 25% para testes (42 casos). Os 31 regressores de inteligência artificial previamente indicados foram treinados e uma primeira aproximação foi escolher o algoritmo com a mais alta acurácia na etapa de testes. Por outro lado, se o erro médio absoluto fosse muito maior que 1 mm, que é o limite de deslocamento escolhido para otimizar o modelo numérico, seria requerida uma otimização de parâmetros para cada algoritmo. Além disso, a validação cruzada também foi considerada para excluir a influência da partição do conjunto de amostras sobre os resultados.

5.4 AMOSTRAGEM MONTE CARLO PARA CALCULAR A PROBABILIDADE DE FALHA: AMOSTRAGEM SIMPLES

Posteriormente à validação do modelo substituto de inteligência artificial, são geradas amostras com a técnica Monte Carlo de amostragem simples (Metropolis e Ulam, 1949), permitindo estabelecer um valor de referência para a probabilidade de falha, e de suas variações. Isto é feito utilizando Python® e suas bibliotecas *skopt* e *numpy*. Neste ponto, as funções de densidade de probabilidade de cada uma das variáveis aleatórias de entrada são definidas e usadas no procedimento de amostragem. Isto porque, inicialmente, estas foram desconsideradas para preencher o domínio de forma homogênea, de acordo com a amostragem por hipercubo latino.

Nesta etapa metodológica, a recuperação das distribuições estatísticas das variáveis aleatórias é realizada pelo método de transformação inversa. Neste método, com a posse da distribuição cumulativa $F(x)$, são utilizados valores uniformemente distribuídos y entre 0 e 1 para recuperar amostras x pela seguinte fórmula $x = F^{-1}(y)$, onde o sobrescrito -1 indica a função inversa (Figura 5.4).

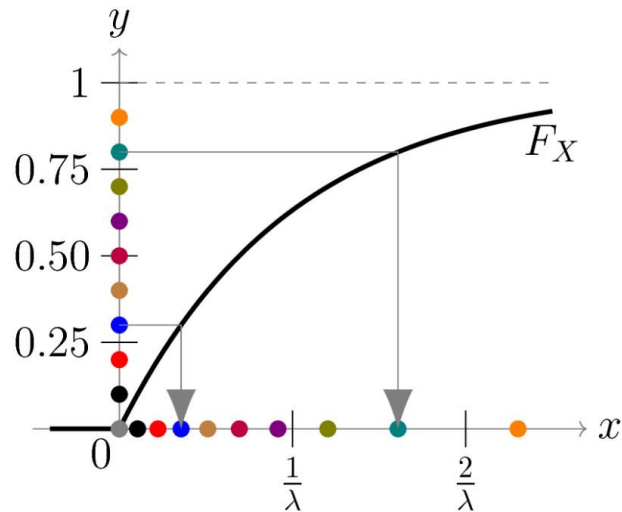


Figura 5.4. Ilustração do método da transformação inversa para uma distribuição exponencial.

Para encontrar os parâmetros reais de distribuição (escala e localização) para cada variável aleatória, foi resolvido um sistema de equações obtidas bloqueando o coeficiente de variação em determinados valores e utilizando a restrição de que o limite superior da faixa de amostragem corresponderia ao percentil de 95% da variável aleatória. Esta abordagem restringe a variabilidade das variáveis de entrada a uma faixa conhecida e preenchem o domínio de forma que apenas alguns poucos valores serão amostrados fora dos valores utilizados na calibração. Isto ajuda a manter os erros de generalização controlados e quase nenhuma extrapolação é realizada, pois na maioria das vezes as variáveis de entrada estão dentro de uma faixa conhecida de amostragem prévia.

5.5 CONFIABILIDADE DAS TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

A última etapa metodológica não está diretamente relacionada à criação de um modelo substituto, mas é importante verificar como as técnicas de amostragem podem ser usadas para reduzir o número de amostras necessárias para calcular a probabilidade de falha.

Considerando a possibilidade de gerar muitas amostras em um curto espaço de tempo, as probabilidades de falha foram avaliadas com as técnicas de Monte Carlo por amostragem simples (Seção 3.3.3.1), por variáveis antitéticas (Seção 3.3.3.2), por hipercubo latino (Seção 3.3.3.4), por importância (Seção 3.3.3.5), FOSM (Seção 3.3.4.1), FORM (Seção 3.3.4.2) e SORM (Seção 3.3.4.3). Nesta análise de convergência, foram avaliados sete tamanhos de amostras de entrada, variando de 10^1 a 10^7 . O valor de referência de probabilidade de falha para comparação foi estabelecido como aquele obtido com o tamanho de 10^7 amostras da simulação padrão Monte Carlo e a escolha de sete tamanhos de amostra está exclusivamente relacionada a uma granularidade visualmente admissível dos dados plotados em escala *log*.

Quando do cálculo da probabilidade de falha de maneira amostral (contando-se o número de amostras menores(ou maiores) que o limite e dividindo-se pelo total de amostras), é possível que a amostragem parcial também inclua incertezas, portanto, pode-se vislumbrar tratar o conjunto de resultados por distribuições estatísticas, realizar o ajuste dos parâmetros dessas e usar suas funções de distribuição acumulada para o cálculo da probabilidade de falha. No escopo da presente tese, para definir a distribuição que melhor se adapta aos resultados, testam-se oitenta e quatro distribuições estatísticas apresentadas no pacote *scipy* Python, descritos por Virtanen *et al.* (2020), a saber: Alpha ('alpha'), Anglit ('anglit'), Arco seno ('arcsine'), Beta ('beta'), Beta prime ('betaprime'), Bradford ('bradford'), Burr type III ('burr'), Burr type XII 'burr12', Cauchy 'cauchy', Chi ('chi'), Chi quadrado ('chi2'), Cosseno ('cosine'), Dupla gamma ('dgamma'), Dupla Weibull ('dweibull'), Erlang ('erlang'), Exponencial ('expon'), Normal exponencialmente modificada ('exponnorm'), Potência exponencial ('exponpow'), Weibull exponenciada ('exponweib'), F ('f'), Fatigue-life (Birnbau-Saunders) ('fatiguelife'), Fisk ('fisk'), Cauchy dobrada ('foldcauchy'), Normal dobrada ('foldnorm'), Gamma ('gamma'), Hipergeométrica de Gauss ('gausshyper'), Exponencial generalizada ('genexpon'), Valor extremo generalizada ('genextreme'), Gamma generalizada ('gengamma'), Semi-logística generalizada ('genhalflogistic'), Logística generalizada ('genlogistic'), Normal generalizada ('gennorm'), Pareto generalizada ('genpareto'), Gilbrat ('gilbrat'), Gompertz ('gompertz'), Gumbel assimétrica à esquerda ('gumbel_l'), Gumbel assimétrica à direita ('gumbel_r'), Semi-Cauchy ('halfcauchy'), metade superior de uma Normal generalizada ('halfgennorm'), Semi-

logística ('halflogistic'), Semi-normal ('halfnorm'), Secante hiperbolica ('hypsecant'), Gamma invertida ('invgamma'), Gaussiana invertida ('invgauss'), Weibull invertida ('invweibull'), Johnson SB ('johnsonsb'), Johnson SU ('johnsonsu'), Distribuição limite da estatística do teste escalonado e bilateral de Kolmogorov-Smirnov ('kstwobign'), Laplace ('laplace'), Levy ('levy'), Levy assimétrica à esquerda ('levy_l'), Log gamma ('loggamma'), Logística ('logistic'), Log-Laplace ('loglaplace'), Log-normal ('lognorm'), Lomax (Pareto do segundo tipo) ('lomax'), Maxwell ('maxwell'), Mielke Beta-Kappa ou Dagum ('mielke'), Nakagami ('nakagami'), t de estudante não central ('nct'), chi-quadrado não central ('ncx2'), Normal ou Gaussiana ('norm'), Pareto ('pareto'), Pearson tipo III ('pearson3'), Função potência ('powerlaw'), Log-Normal com potência ('powerlognorm'), Normal com potência ('powernorm'), Rayleigh ('rayleigh'), R-distribuída (beta simétrica) ('rdist'), Recíproca inversa Gaussiana ('recipinvgauss'), Recíproca ('reciprocal'), Rice ('rice'), Semicircular ('semicircular'), t de estudante ('t'), Triangular ('triang'), Exponencial truncada ('truncexpon'), Normal truncada ('truncnorm'), Tukey-Lambda ('tukeylambda'), Uniforme ('uniform'), Von Mises ('vonmises'), Von Mises definida em $(-\pi, \pi)$ ('vonmises_line'), Wald ('wald'), Valor extremo máximo Weibull ('weibull_max') e Valor extremo mínimo Weibull ('weibull_min'). Mesmo que não se tenha restringido a distribuições estritamente positivas, o domínio da distribuição mais adequada será truncado para valores positivos, se necessário. Isto está relacionado ao fato de que a variável aleatória que está sendo modelada é o valor absoluto da distorção angular.

Cada distribuição será ajustada pelos estimadores de máxima verossimilhança para o conjunto de 10^7 simulações padrão Monte Carlo, escolhendo a melhor distribuição por meio da combinação do critério de informação de Akaike (AIC), introduzido por Akaike (1974, 1983), com o erro quadrático do ajuste no histograma empírico. A amostragem de 10^7 foi adotada devido a forma geral das distribuições já estar definida com amostras deste tamanho.

Como foi apontado por Maydeu-Olivares e García-Forero (2010), o AIC não é usado para testar o modelo no sentido de testar hipóteses, mas para a seleção do modelo. Dado um conjunto de dados, é possível calcular o AIC para todos os modelos em consideração. Então, o modelo com o índice mais baixo é selecionado. Este tipo de critério combina ajuste absoluto com a parcimônia do modelo, penalizando modelos que proporcionam um bom ajuste ao custo de incorporar múltiplos parâmetros.

Como etapa metodológica, também se inclui uma combinação do AIC e do critério de erro quadrático. A classificação do AIC é primordial e é a primeira sequência de classificação a ser empregada. O erro quadrático só é usado para descartar distribuições com baixos valores de

AIC, mas cuja capacidade de ajuste é notavelmente fraca. Este processo de seleção da distribuição apropriada é crucial para qualquer modelagem probabilística de conjuntos de dados (Ozelim *et al.*, 2015). Posteriormente, na avaliação de outras amostras, os parâmetros da distribuição escolhida serão estimados a partir dos resultados parciais (amostras de menor tamanho).

Para as amostragens por variáveis antitéticas (Seção 3.3.3.2), por hipercubo latino (Seção 3.3.3.4), por importância (Seção 3.3.3.5), FOSM (Seção 3.3.4.1), FORM (Seção 3.3.4.2) e SORM (Seção 3.3.4.3), foram implementados códigos em Python capazes de realizar os cálculos necessários.

6 PROBLEMA HIPOTÉTICO

O problema hipotético, apresentado previamente por Domingues *et al.* (2022), tem como objetivo utilizar um cenário representativo aos casos de túneis urbanos para validar uma metodologia de análise de risco. Como resultado da revisão bibliográfica, observou-se a importância de estudar as frequentes interações entre a escavação do túnel e os edifícios construídos na linha de superfície.

Para isolar a aplicação desse problema hipotético na validação da metodologia de análise de risco, foram desconsideradas outras possíveis estruturas urbanas. Assim, a proposta foi fundamentada na interação entre um túnel com cobertura de três diâmetros e um edifício com térreo e mais seis pavimentos. Para esse caso, foi analisado o desempenho no Estado Limite de Serviço (ELS) das estruturas.

A concepção do edifício foi fundamentada em um pré-dimensionamento estrutural, em similaridade com outros edifícios construídos no plano piloto, em Brasília/DF. Estes edifícios usualmente são executados em concreto armado, com um padrão de possuir o térreo e mais seis pavimentos. Ademais, como adotado no modelo, estes edifícios usualmente têm um balanço paralelo ao eixo de maior comprimento, onde são construídas as varandas.

Os elementos estruturais da fundação foram definidos como sapatas. Ao considerar que as cargas desses elementos são transmitidas pela base, foi empregada a ligação direta entre base da sapata e o maciço, sem enterrar a fundação. Com isso, desprezou-se a interação entre o fuste e o maciço, como detalhado nas seções seguintes.

Os detalhamentos do edifício, que possui dupla simetria, são apresentados na Tabela 6.1 e na Figura 6.1. Somados a isso, expõem-se as simplificações adotadas para a edificação e todo restante do modelo na Seção 6.3.2.

Tabela 6.1. Resumo das dimensões da estrutura proposta para o edifício

Elementos estruturais	Fundação			
	Largura	Comprimento	Altura	Diâmetro
Base da sapata	1,8	1,8	1,50	-
Fuste da sapata	-	-	1,00	0,60
Bloco	1,20	1,20	1,20	-
Vigas	0,40	var.	0,80	-
Laje	var.	var.	0,10	-

Térreo				
Elementos estruturais	Largura	Comprimento	Altura	Diâmetro
Pilar	0,40	1,20	2,70	-
Viga	0,40	var.	0,80	-
Laje	var.	var.	0,10	-

1º ao 6º Pavimento				
Elementos estruturais	Largura	Comprimento	Altura	Diâmetro
Pilar	0,12	0,30	2,7	-
Viga	0,12	var.	0,45	-
Laje	var.	var.	0,10	-

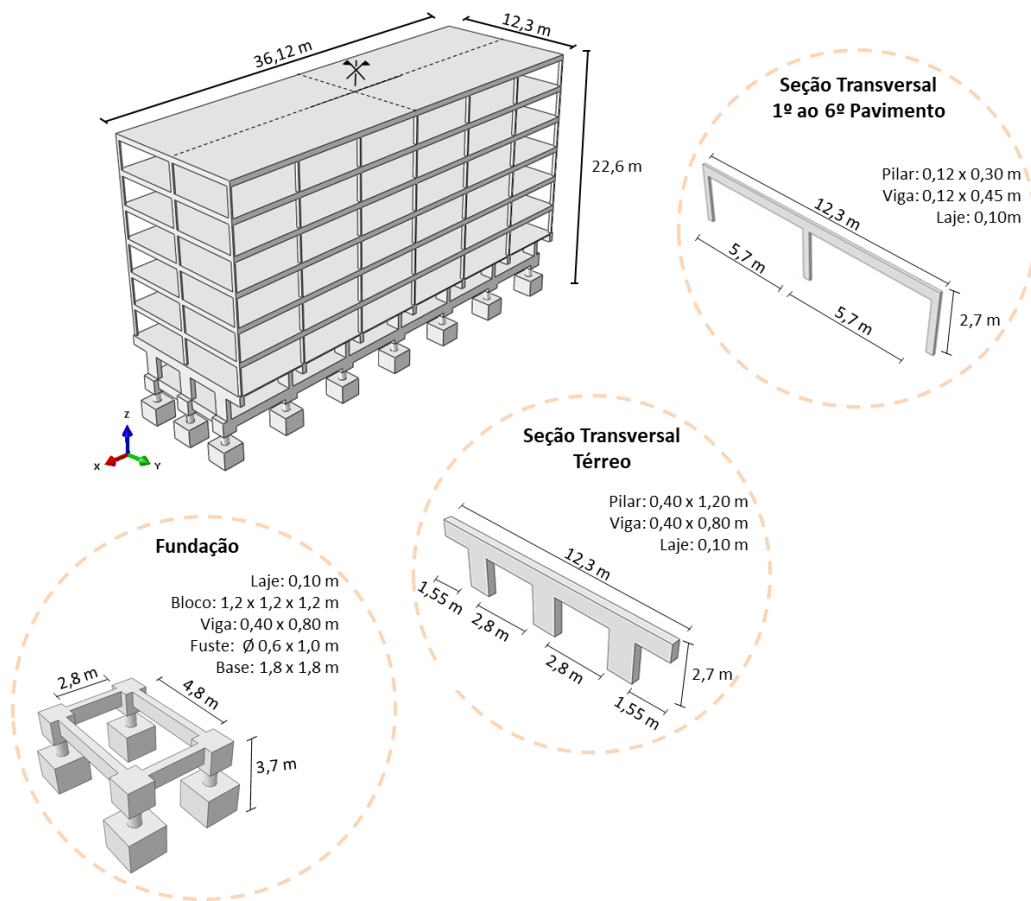


Figura 6.1. Geometria da estrutura proposta para o edifício.

Com relação ao túnel, a proposta inicial foi uma seção transversal com 10 m de diâmetro e um suporte de concreto projetado com 0,20 m de espessura. Para considerar uma escavação

convencional ou sequencial, tipo NATM, a seção transversal e os avanços foram subdivididos como ilustrado na Figura 6.2.

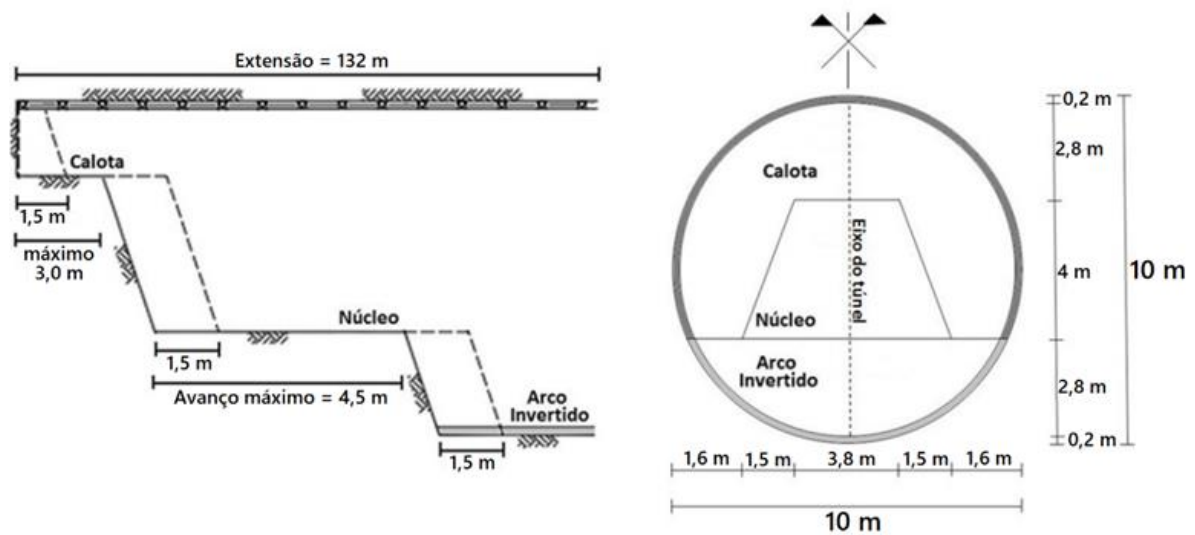


Figura 6.2. Seção transversal do túnel proposto para o caso hipotético.

Ao considerar que o detalhamento das soluções é apresentado no Apêndice A, igualmente citado na Seção 5.1 da metodologia, expõe-se no corpo do texto os seguintes temas de destaque:

- Seção 6.1: Modelo Inicial e suas Condições de Contorno;
- Seção 6.2: Modelo Numérico Otimizado;
- Seção 6.3: Particularidades do Modelo Numérico.

6.1 MODELO INICIAL E SUAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

No caso hipotético foi considerado que o eixo do túnel coincide com um eixo simétrico do edifício. Com relação à escavação, esta foi iniciada no Ponto (0,0) e prosseguiu até o encontro da condição de contorno do Eixo Y. Com essa premissa foi possível admitir um modelo que apresenta simetria e, portanto, a consideração de sua metade passou a ser representativa do todo. Na Figura 6.3 é apresentado uma concepção inicial do caso hipotético.

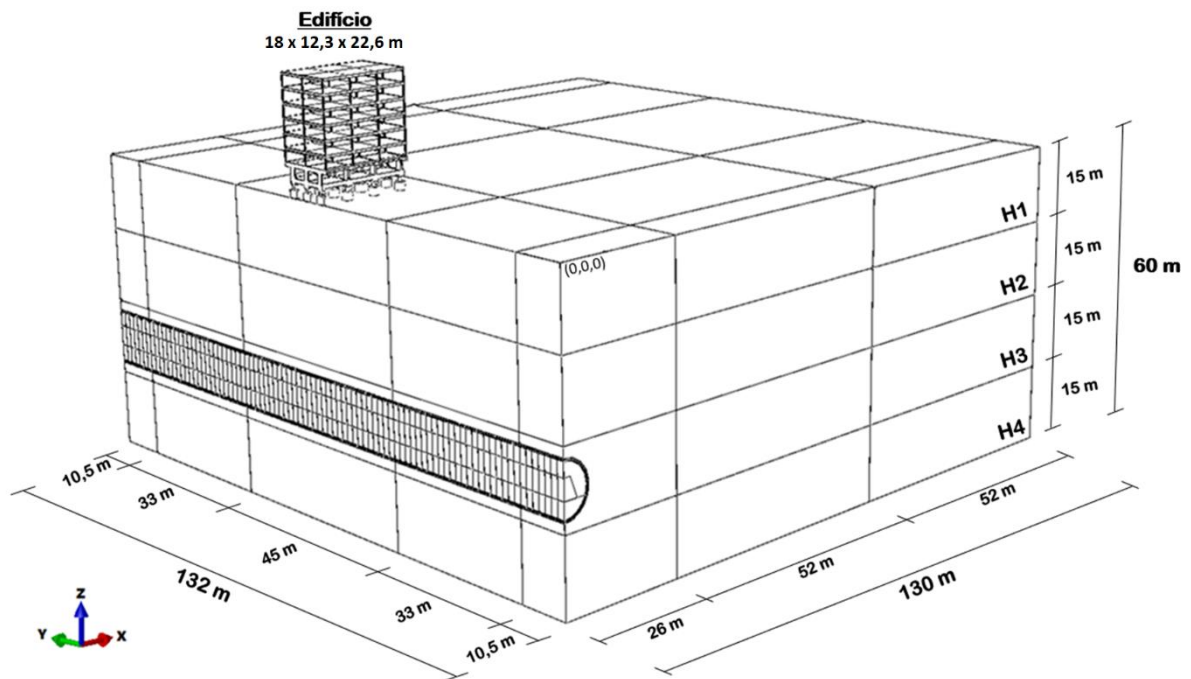


Figura 6.3. Modelo inicialmente proposto para o caso hipotético.

Nessa primeira concepção, a condição de contorno de deslocamento lateral foi definida a uma distância de 25 vezes o raio do túnel. Assim, sabendo que o túnel tem 5 m de raio, essa condição representa uma distância de 125 m da extremidade da escavação. Esta atribuição foi fundamentada na experiência do autor em modelos similares. Com relação à vertical, a base engastada foi definida a uma profundidade de 60 m, atribuída arbitrariamente, como impedimento geotécnico aos deslocamentos e rotações.

A cobertura do túnel em estudo foi de 32,5 m (Figura 6.3), valor este que representa, mais precisamente, 3,25 vezes seu diâmetro. Com relação à escavação, esta foi inicialmente dividida em 88 avanços de 1,5 m, totalizando os 132 m atribuídos na condição de contorno do Eixo Y (Figura 6.2).

6.1.1 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E ESTRUTURAIS ADOTADOS

Por tratar-se de um estudo de caso hipotético, os parâmetros foram estimados dentro de uma ordem de grandeza considerada admissível, tendo maior compromisso com a proposta metodológica do que com a aderência à realidade deste problema hipotético. Assim, ressalta-se que não é objeto principal deste estudo a discussão sobre as possíveis variações nos valores

adotados. Isto posto, na Tabela 6.2 apresenta-se um resumo dos intervalos dos parâmetros de entrada empregados no modelo.

Tabela 6.2. Resumo dos intervalos propostos para os parâmetros de entrada do modelo

Variação espacial das espessuras dos estratos / Distribuição estatística	Densidade (kg/m³)	Módulo de Young (Pa)	Relação de Poisson	Ângulo de Atrito (°)	Dilatância (°)	Coesão (kPa)	K₀
	Log-Normal	Log-Normal	Normal Truncada	Log-Normal	Log-Normal	Log-Normal	Normal Truncada
Camada 1 (0 a 15 metros)	1.700 a 1.800	14 a 40 × 10 ⁶	0,30 a 0,40	35 a 40	1 a 2	10 a 15	0,4 a 0,7
Camada 2 (15 a 30 m)	1.900 a 2.000	40 a 70 × 10 ⁶	0,30 a 0,40	40 a 45	1 a 2	20 a 25	0,4 a 0,7
Camada 3 (30 a 45 m)	2.100 a 2.200	70 a 110 × 10 ⁶	0,30 a 0,40	45 a 50	5 a 10	30 a 35	0,4 a 0,7
Camada 4 (45 a 60 m)	2.100 a 2.200	70 a 110 × 10 ⁶	0,30 a 0,40	45 a 50	10 a 15	30 a 35	0,4 a 0,7
Concreto Armado	2.500 a 2.600	30 a 32 × 10 ⁹	0,20 a 0,25	-	-	-	-
Concreto Projetado	2.400 a 2.500	30,5 a 32,5 × 10 ⁹	0,20 a 0,25	-	-	-	-

Com relação às distribuições estatística escolhidas para cada parâmetro, optou-se pelo truncamento das distribuições normais e log-normais, considerando que estas são amplamente utilizadas para descrever as distribuições de parâmetros geotécnicos (Kayzer e Gajan, 2014). Para escolher entre estes dois tipos de distribuições, foi considerado o estudo realizado por Kayzer e Gajan (2014).

Na Tabela 6.2 apresenta-se um intervalo de valores para cada variável aleatória. Durante o procedimento de simulação, os limites superior e inferior foram utilizados para definir o menor valor possível para o parâmetro e o valor do percentil 95%, respectivamente. Para encontrar os parâmetros reais de distribuição (escala e localização) para cada variável aleatória, foi solucionado um sistema de equações obtidas ao travar o coeficiente de variação em determinados valores e utilizar a restrição do percentil 95% citada anteriormente. Esta abordagem reduz a variabilidade das variáveis de entrada a uma faixa conhecida e preenchem o domínio, de forma que apenas alguns poucos valores serão amostrados fora dos 170 valores

previamente amostrados. Isto ajuda a manter os erros de generalização controlados e quase nenhuma extrapolação é realizada, pois na maioria das vezes as variáveis de entrada estão dentro de uma faixa conhecida de amostragem.

Os coeficientes de variação utilizados foram: 7,5% para a densidade de todos os materiais, 10% para o Módulo de Young do concreto, 5% para a relação de Poisson de todos os materiais, 34% para o Módulo de Young das camadas, 10% para o ângulo de atrito e dilatação e 40% para a coesão (Kayzer e Gajan, 2014; Srivastava e Sivakumar Babu, 2009).

Considerando que os parâmetros de menor resistência geomecânica representam a condição crítica, estes foram adotados no primeiro modelo do caso hipotético, para definir o refinamento do domínio e da malha. Especificamente, para as relações de Poisson e K_0 , estes valores foram fixados em 0,2 para o concreto e 0,3 para os solos, além de K_0 de 0,5 para os solos. As mudanças nos parâmetros foram consideradas somente após a otimização do modelo.

As camadas estratigráficas foram consideradas com o comportamento guiado pelo modelo de Mohr-Coulomb, enquanto o edifício e o concreto projetado foram atribuídos como linear-elástico. Destaca-se que estas atribuições podem não ser adequadas a casos reais, mas se mostram aptas a validar a proposta metodológica. Com este compromisso de transparecer as simplificações do modelo numérico, foi estruturada a Seção 6.3.2.

6.1.2 CARACTERÍSTICAS DA MALHA E DO DOMÍNIO

A malha do maciço foi subdividida em 24 diferentes regiões para priorizar o refinamento nas zonas de maior importância (Figura 6.4). Isso quer dizer que, para cada camada estratigráfica, foram definidas seis diferentes zonas de refinamento. Ademais, as estruturas do concreto projetado e do edifício também possuem características particulares.

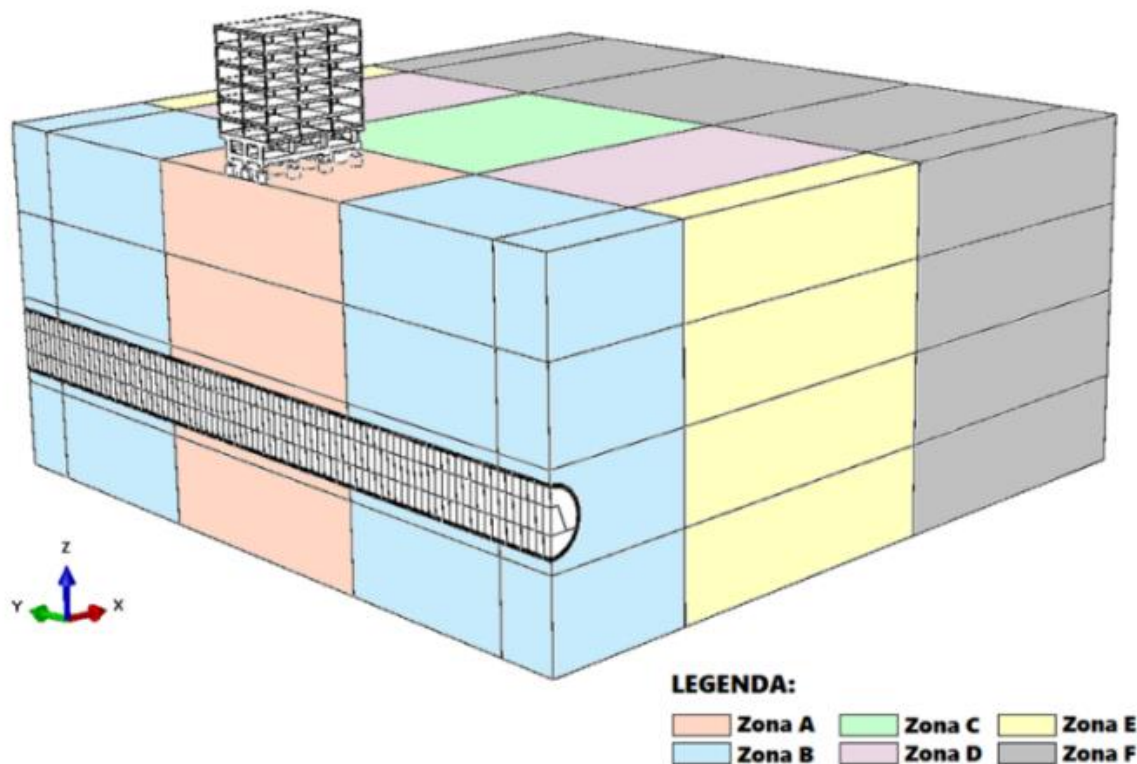


Figura 6.4. Subdivisão do domínio proposta para o refinamento da malha.

Após uma primeira avaliação, com os tamanhos da malha ainda definidos de forma arbitrária, foi avaliado o impacto do refinamento em cada zona. Assim, foi possível obter uma melhor relação custo/benefício envolvendo a acurácia do resultado e o tempo de processamento.

Para otimização do domínio, nos Eixos X e Y, foram avaliadas quais proporções geométricas eram requeridas para não afetar o resultado com efeitos de borda. Com relação ao Eixo Z, este representa uma restrição geotécnica hipotética e, portanto, não foi objeto de otimização de domínio.

Para a otimização do domínio proposto no Eixo X, foram atribuídos nove caminhos de controle, entre a superfície e o teto do túnel, cada um com 200 pontos (Figura 6.5). A tolerância admissível para atribuir a nova restrição foi adotada com 1 mm.

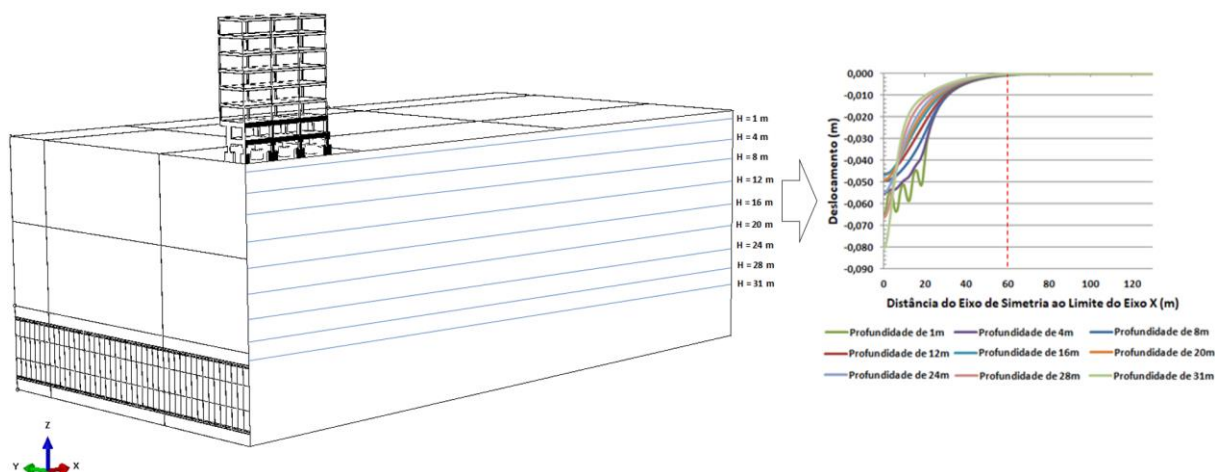


Figura 6.5. Caminhos de controle atribuídos para otimização do domínio no Eixo X.

O caminho de controle mais próximo da fundação do edifício, com 1 m de profundidade, foi o que teve a convergência crítica, em 59,15 m. Com isso, considerando os parâmetros geotécnicos mais pessimistas, foi possível reduzir a abrangência do Eixo X de 130 m para 60 m.

No Eixo Y a tolerância adotada também foi de 1 mm, entretanto, no atual contexto, essa variação foi relacionada aos passos de escavação e não mais à distância para o contorno. Isso quer dizer que quando a escavação atingir influência maior ou igual a 1 mm em algum dos pontos de controle (Figura 6.6), o limite deve ser estabelecido como o último passo do arco invertido (Figura 6.2).

Considerando a metodologia proposta, foi possível reduzir a abrangência do Eixo Y de 132 m para 112,5 m. Essa redução também acarretou, conseqüentemente, na alteração de 443 para 378 *steps* a serem calculados pelo modelo. Este processo também considerou a influência do emboque e desemboque, discutida em maiores detalhes na Seção 6.2.2.

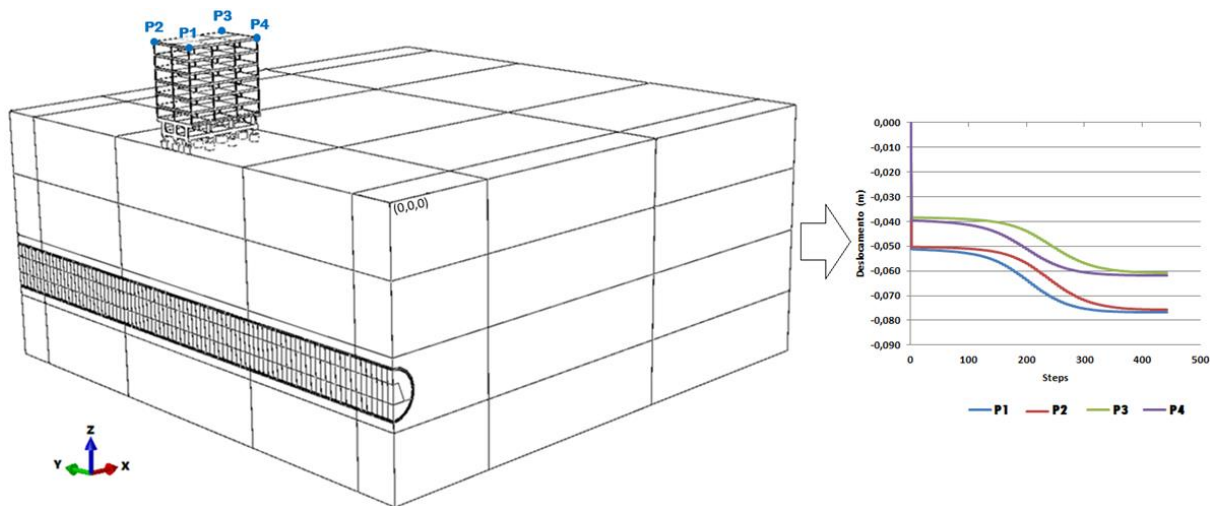


Figura 6.6. Pontos de controle atribuídos para otimização do domínio no Eixo Y.

6.1.3 PROPRIEDADES DE CONTATO

O modelo foi desenvolvido em três partes distintas, são elas: edifício, maciço e concreto projetado com a camada de sacrifício. Na fase de unir estas três diferentes partes, o programa solicita que uma lei de contato seja estabelecida e é com o intuito de esclarecer essa tomada de decisão que a presente seção foi criada e posteriormente detalhada em A.2.5. Ademais, destaca-se que o conceito e existência da camada de sacrifício é discutida em maiores detalhes na Seção 6.3.1.

Isto posto, há duas partes interagindo com o maciço que devem ser mapeadas: o concreto projetado e o edifício. Para o primeiro caso, do concreto projetado, foi estabelecido um contato do tipo *Tie*, em que é imposto que as superfícies de contato não devem se desconectar em nenhum momento do processo. Assim, tensões e deformações são transferidas de forma instantânea entre as partes. Para o segundo caso, do contato entre o edifício e o maciço, foi estabelecido um comportamento normal e tangencial.

6.2 MODELO NUMÉRICO OTIMIZADO

Com a otimização de domínio, detalhada na Seção A.3.1, o modelo teve reduzido o número de elementos, nós e *steps*, além de, conseqüentemente, interferir positivamente no tempo de processamento. Ademais, no processo de refinamento também é possível assegurar-se que as condições inicialmente propostas são adequadas e que não há interferências indesejadas de borda e/ou insuficiência de elementos/nós para prover a acurácia desejada. Com relação a

subdivisão da malha no modelo otimizado, permanece o exposto na Figura 6.4, com a consequente exclusão da Zona F.

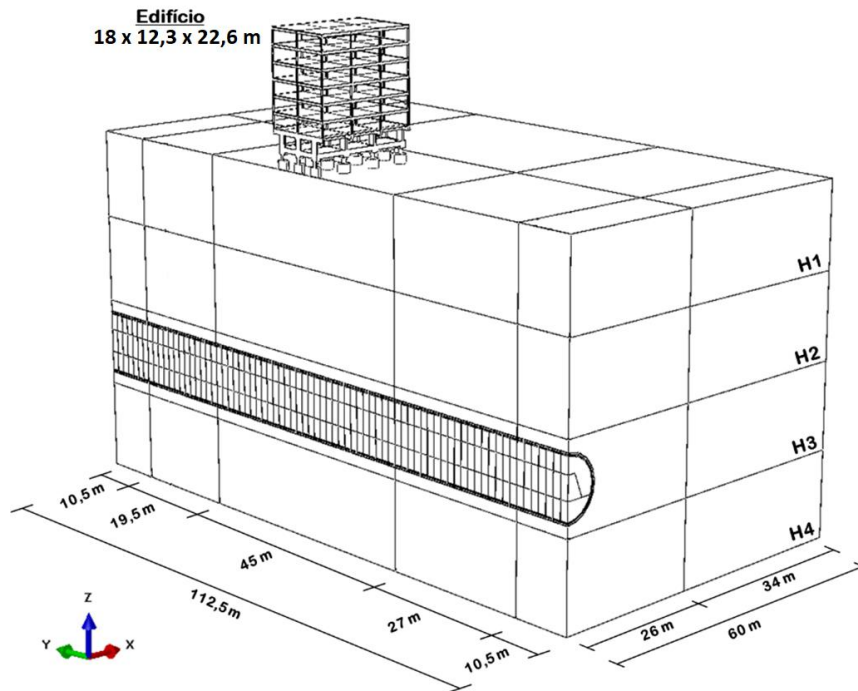


Figura 6.7. Modelo otimizado do caso hipotético.

Para avaliar a convergência da malha foram utilizados, além dos valores de deslocamento em pontos de interesse, outros dois indicadores propostos por Raposo (2016). O primeiro indicador retrata as derivadas dos intervalos de deslocamento pela média geométrica do número de nós. O outro indica a variação percentual entre os deslocamentos de malhas vizinhas, chamado de desvio em avanço uma vez que a diferença é dividida pelo valor em avanço. Complementarmente, para incluir a variável de tempo de processamento, foi utilizado o mesmo computador (CPU: AMD Ryzen 9 3950X com 128GB de RAM) na etapa de refinamento, possibilitando uma uniformidade das informações. Para mais detalhes do processo de otimização da malha deve-se consultar a Seção A.3.2.

Ao comparar o modelo inicial e o otimizado pode-se destacar, dentre outros fatores, a redução de 93% do tempo de processamento, mantendo a acurácia desejada para o problema. Com isso, é possível obter uma maior amostragem estatística de resultados determinísticos. Os demais fatores de destaque da otimização do modelo numérico são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Resumo comparativo do modelo inicial e otimizado

Parâmetro	Modelo Inicial	Modelo Otimizado	Variação Percentual
Número de elementos	400.000	165.000	- 58%
Número de nós	595.000	280.000	- 53 %
Passos construtivos (<i>steps</i>)	443	378	- 15%
Arquivos de resultado (<i>output</i>)	110 GB	30 GB	- 73%
Tempo de processamento	210 h	15 h	- 93%

Considerando ainda o modelo inicial e a versão otimizada (Figura 6.8), é possível ter uma primeira impressão visual sobre os refinamentos de malha e domínio (Seção A.3). Destaca-se que foram testados dezenove modelos, com refinamentos sucessivos, para atingir a configuração proposta.

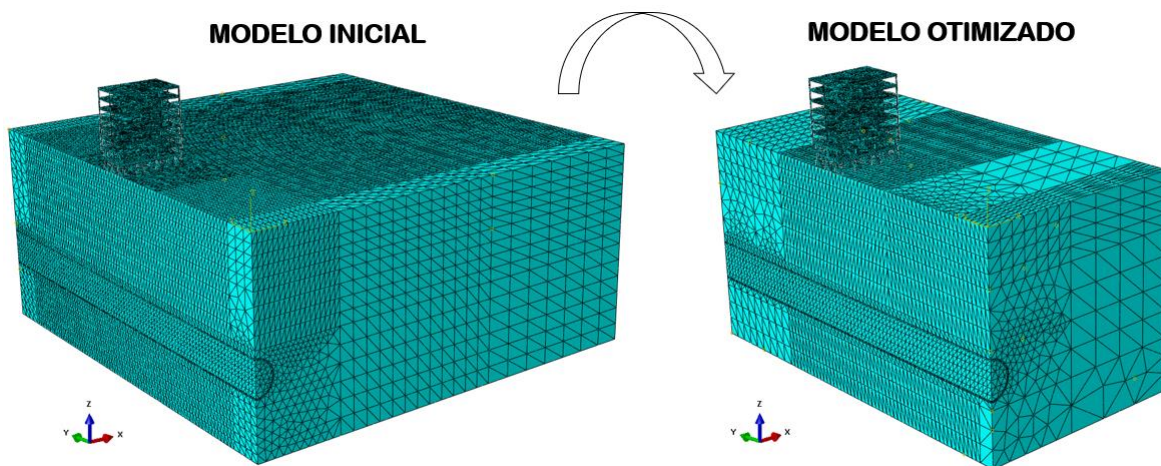


Figura 6.8. Comparação visual entre o modelo inicial e a versão otimizada.

Ao final, uma forma visual simplificada de compreender o comportamento físico do caso hipotético é mediante a exposição dos deslocamentos verticais (U_3), em escala de cores, conforme ilustrado na (Figura 6.9). Os limites impostos na legenda se aplicam igualmente a ambos os casos.

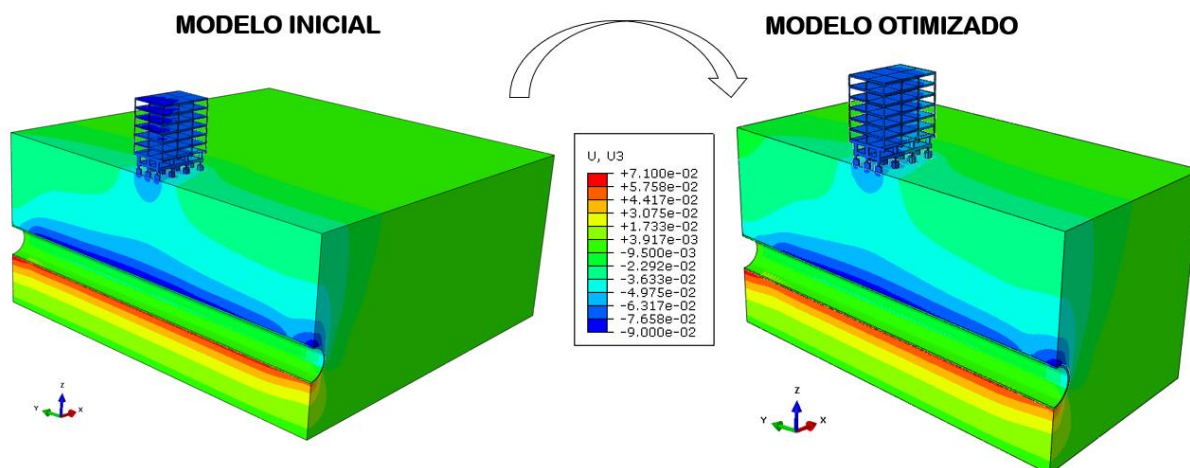


Figura 6.9. Deslocamentos verticais obtidos no modelo inicial e na versão otimizada.

Em primeira análise é intuitivo visualizar uma influência significativa do emboque e desemboque nos resultados. Por esse motivo, foi dedicada uma seção para comentar sobre este assunto e a forma de isolar esta variável do problema, incluindo lições aprendidas durante o processo (Seção 6.2.2). Ademais, afirma-se que os recalques induzidos pela construção do prédio foram considerados no modelo e os deslocamentos analisados são os valores totais acumulados (Seção 6.2.1).

6.2.1 INFLUÊNCIA DA EDIFICAÇÃO

Na concepção do modelo foram atribuídos os seguintes passos, prévios a escavação do túnel: incluir as condições geostáticas, incluir o edifício sobre o maciço e impor o carregamento de 1 kPa sobre as lajes (Figura 6.10). Nesta tese os recalques analisados são referentes aos deslocamentos totais, induzidos pela construção da edificação e pela escavação do túnel. Caso este contexto não seja adequado a algum caso prático, o ABAQUS® também permite descontar a influência do passo de construção do restante das análises.

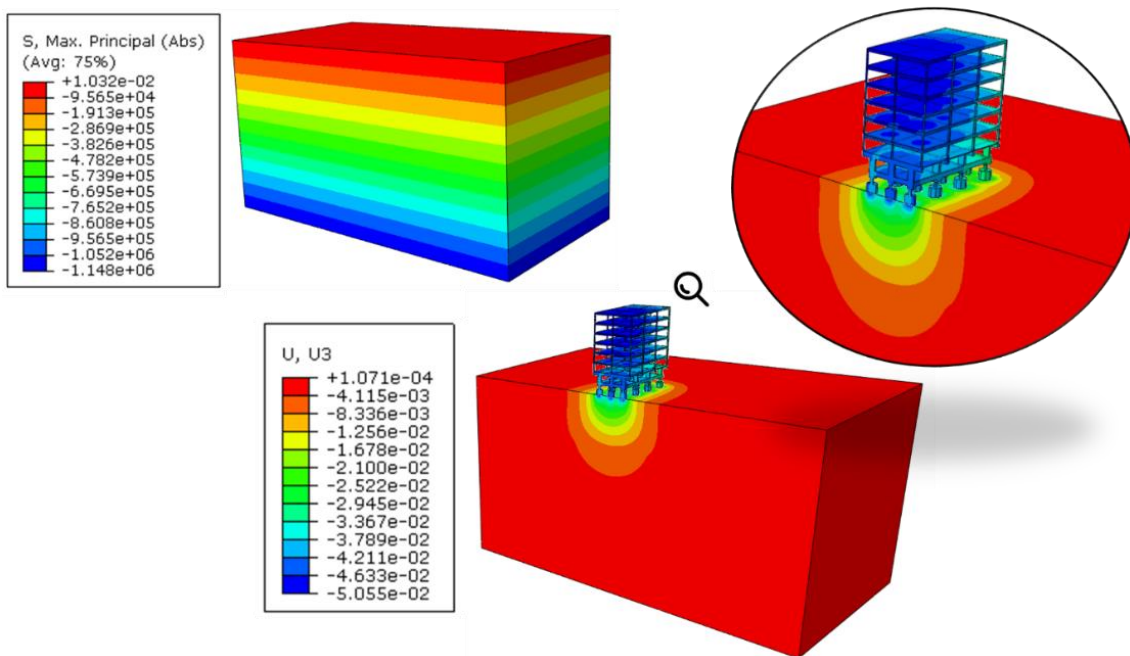


Figura 6.10. Condições prévias a escavação: (a) condição geostática; e (b) inclusão do edifício e do carregamento de 1 kPa nas lajes.

6.2.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO: EMBOQUE E DESEMBOQUE

O túnel proposto tem características de ruptura semelhantes a um túnel raso, com cobertura inferior a quatro diâmetros, conforme exemplificado na Seção 2.4. Assim, em consonância com a atividade da prática tuneleira, a cedência de teto provê uma característica particular às estruturas de emboque e desemboque.

Para a presente tese, as estruturas de emboque e desemboque não são objeto de análise e, portanto, foram isoladas da solução do problema. Com o intuito de possibilitar essa ação, fundamentado nas experiências de Vitali *et al.* (2018), foi realizado um estudo de escavação do túnel em campo livre para verificar até qual distância a influência é relevante. Assim, com o uso de pontos de controle no topo e na base da seção transversal da escavação, foram comparados os deslocamentos obtidos em cada ponto de avanço com àqueles proveniente da metade da seção longitudinal. O resultado dessa análise, considerando os deslocamentos normalizados, é sintetizado na Figura 6.11.

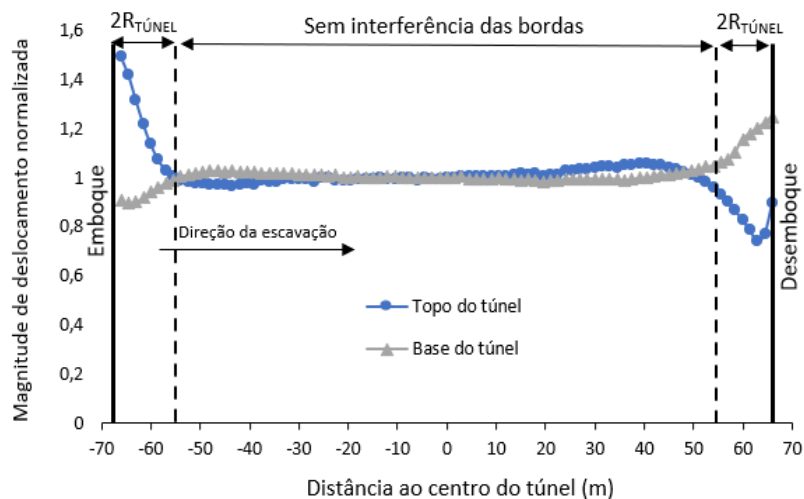


Figura 6.11. Análise da influência do emboque e desemboque.

Destaca-se que a localização dos pontos apresentados foi atribuída no maciço, em um infinitesimal de distância do concreto projetado. Para a linha azul com marcadores em círculo, estes pontos de controle estão localizados acima da seção transversal do túnel, enquanto para linha cinza com marcadores em triângulo os pontos localizam-se abaixo.

Com relação aos limites de tolerância, foi atribuído que um desvio aceitável para os deslocamentos normalizados deve ser de, no máximo, 5%. Assim, ao optar por atribuir uma precisão fundamentada no tamanho do raio do túnel, de 5 m, têm-se que a interferência é notada até uma distância de $2R_{TÚNEL}$.

Após esta análise foi possível isolar uma região de $2R_{TÚNEL}$, em cada um dos extremos, afetada pelas estruturas de emboque e desemboque. Na geometria do problema (Figura 6.3 e Figura 6.7) é possível notar que essa área é destacada e tem uma extensão de 10,5 m. Este arredondamento para 10,5 m permite a equivalência da seção com os passos construtivos de escavação (*steps*).

Outras ações foram testadas sem êxito neste processo de otimização. De qualquer forma, duas tentativas merecem destaque como lição aprendida do processo, são elas:

- 1ª lição aprendida: foram fixados os deslocamentos e as tensões como condição de contorno, no perímetro do túnel, nas regiões de emboque/desemboque. No que diz respeito ao processo operacional, foram aplicadas as mesmas condições do centro da seção longitudinal nos nós do contorno. Esta tentativa diminuiu a magnitude dos

deslocamentos normalizados (Figura 6.11), mas ampliou a zona afetada, considerando a tolerância de 5%. Portanto, não foi útil para o caso em questão;

- 2ª lição aprendida: foi realizada a inclusão de elementos unidimensionais como enfilagens no emboque e desemboque. Esta tentativa não teve sucesso porque a interferência no campo de tensões era dificilmente controlada e, invariavelmente, afetava zonas até maiores que as inicialmente previstas.

6.3 PARTICULARIDADES DO MODELO NUMÉRICO

A presente seção é dedicada a discutir termos particulares do modelo numérico. Em um primeiro momento é detalhado sobre a inclusão do concreto projetado, que requereu a adoção de uma camada de sacrifício. Posteriormente, são sintetizadas as simplificações, de assuntos diversos, adotadas na resolução do problema.

6.3.1 ARTIFÍCIO PARA INCLUSÃO DO CONCRETO PROJETADO

Para incluir a camada de concreto projetado, o ABAQUS® permite tanto uma reativação sem tensão quanto uma reativação com as tensões pré-existentes. A reativação sem tensões pré-existentes restabelece a configuração inicial da estrutura, enquanto a reativação com tensões não faz o mesmo. Estes dois cenários, entretanto, não são suficientes para representar realisticamente o comportamento do túnel, uma vez que é necessário incluir o concreto projetado sem tensões e com um diâmetro previamente estabelecido.

Esta questão vem do fato de que a geometria original do concreto projetado é naturalmente maior – considerando o diâmetro da seção transversal – quando comparada à seção escavada, que já havia sido deformada. Assim, ao utilizar a reativação sem tensão, a resposta da estrutura abrange o concreto projetado empurrando o solo (absorvendo, portanto, as tensões) e reduzindo os deslocamentos induzidos anteriormente (Figura 6.12). Além disso, a seção transversal final não será executada com a forma geométrica projetada, já que o solo sofreu interferência em ambas as direções.

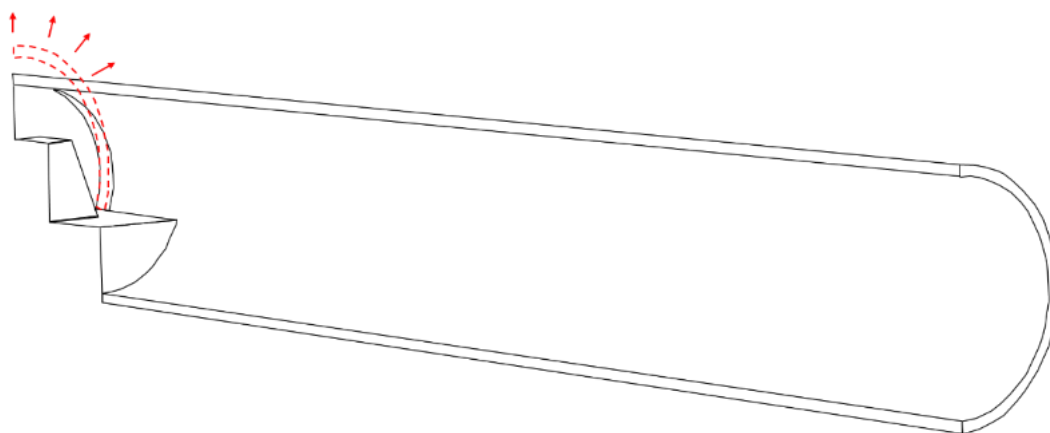


Figura 6.12. Inclusão de uma nova camada de concreto projetado no maciço escavado.

Para que este comportamento fosse corrigido, sem uma interferência significativa nas tensões e deslocamentos do modelo, foi criada uma camada extra, por trás do concreto projetado, com 0,50 m de espessura, nomeada como camada de sacrifício (Figura 6.13).

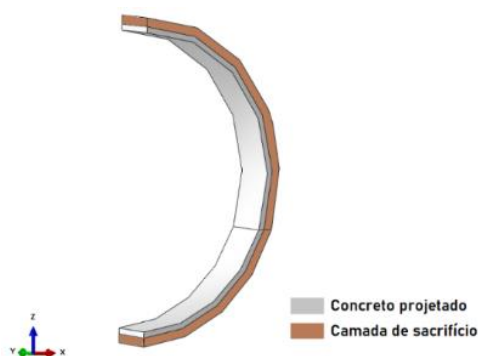


Figura 6.13. Ilustração da camada de sacrifício com 0,50 m de espessura.

No início, foi levantada a possibilidade de usar um material frágil para modelar a camada de sacrifício. Por outro lado, optou-se por utilizar as mesmas propriedades do solo circundante por duas razões. Em primeiro lugar, a diferença entre o módulo de Young do concreto projetado e o do solo é suficiente para evitar a maior parte da transferência de tensões. Em segundo lugar, testes preliminares indicaram que o uso de materiais que eram mais frágeis que o solo circundante induziu deformações excessiva dos elementos e distorção da camada de sacrifício, aumentando o tempo necessário para cada análise. Esta situação, em alguns casos, chegou a impedir a convergência dos algoritmos.

Além disso, a espessura de 0,50 m foi escolhida para que o volume de solo na camada fosse suficiente para absorver as tensões. Estes valores foram definidos por tentativa e erro, verificando as transferências de tensão para o concreto projetado para várias espessuras.

O objetivo da camada de sacrifício foi retornar à escavação a uma configuração geométrica inicial, sem desconsiderar os efeitos das tensões e deslocamentos impostos ao maciço pelo processo de escavação. Como resultado, foi possível incluir a camada de concreto projetado sem que houvesse novos esforços não condizentes com a atividade prática (Figura 6.12).

No ABAQUS®, a metodologia construtiva consistiu em liberar um passo de escavação e, após deslocamentos do maciço, foi efetuada a troca dessa camada de sacrifício por uma nova, com as mesmas propriedades, junto ao concreto projetado (Figura 6.14).

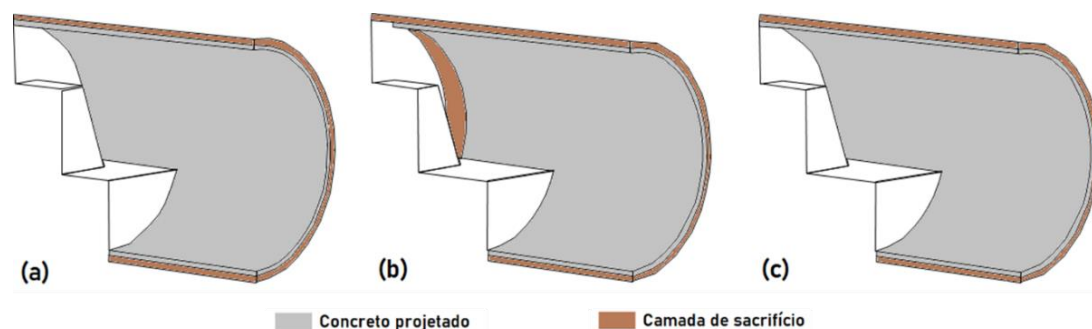


Figura 6.14. Processo construtivo com o uso da camada de sacrifício: (a) passo de escavação intermediário; (b) escava-se 1,50 m e libera o maciço para deformar; e (c) substitui a camada de sacrifício deformada por uma nova, similar, junto ao concreto projetado.

Destaca-se que a camada de sacrifício é substituída somente no momento da inclusão do concreto projetado. Nas demais etapas construtivas, esta peça fica livre para deformar e naturalmente se confunde com o maciço circundante.

6.3.2 SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS

O modelo numérico apresenta algumas simplificações que podem ser indesejadas em um caso prático. Entretanto, tais adoções não comprometem a plena exposição da metodologia proposta neste estudo. Isto posto, destacam-se os seguintes fatos:

- Todas as camadas estratigráficas tiveram adotado o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Em linhas gerais, nos túneis, este modelo pode distorcer a realidade devido à utilização de um mesmo módulo para representar os carregamentos e descarregamentos. Além disso, também é notável que o modelo linear elástico de Mohr-Coulomb negligencia outros aspectos importantes do comportamento do solo, tais como a degradação da rigidez inicial com deformação, que é frequentemente importante em aplicações em túneis (Gonzales *et al.*, 2012);
- O edifício carece de estruturas importantes para seu suporte e segurança como a caixa do elevador e/ou escada;
- O edifício carece de travamento/fechamento com alvenaria o que pode ser necessário em algum caso prático, que o Estado Limite de Serviço (ELS) seja crítico neste componente.

Para este estudo têm-se conhecimento dessas condições e, ainda assim, optou-se por adotá-las em compensação a um menor tempo computacional requerido. A metodologia de análise de risco não fica comprometida por estes fatos e, em um caso prático, outros detalhamentos podem ser necessários.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em geral, após a construção do modelo de elementos finitos, foram obtidas 170 soluções determinísticas fundamentadas na variação dos 34 parâmetros de entrada propostos para o caso hipotético. Em seguida, foram aplicadas 31 técnicas diferentes de inteligência artificial para verificar a importância relativa dos 34 parâmetros de entrada para o resultado de saída, que foi escolhido para ser o deslocamento vertical na cota de assentamento das sapatas do edifício. Um algoritmo RFECV foi aplicado para encontrar os parâmetros de entrada mais importantes em relação à saída escolhida (deslocamento vertical na parte inferior dos elementos da fundação). Após a seleção das variáveis aleatórias de entrada, várias técnicas foram usadas como regressores, onde 75% das amostras são aplicadas para treinamento e outros 25% para teste e verificação da precisão. Posteriormente, na quarta etapa metodológica, foram interpolados os 170 resultados com precisão aceitável e, assim, foi possível alcançar 10^7 amostras de resultados em um curto espaço diferentes técnicas de amostragem em um espaço de tempo aceitável.

Como indicado, enfoque é direcionado aos deslocamentos verticais (U_3) na cota de assentamento das sapatas do edifício. Assim, conhecendo o sistema de coordenadas do global problema (Figura 6.7), têm-se a identificação dos elementos de fundação na Figura 7.1.

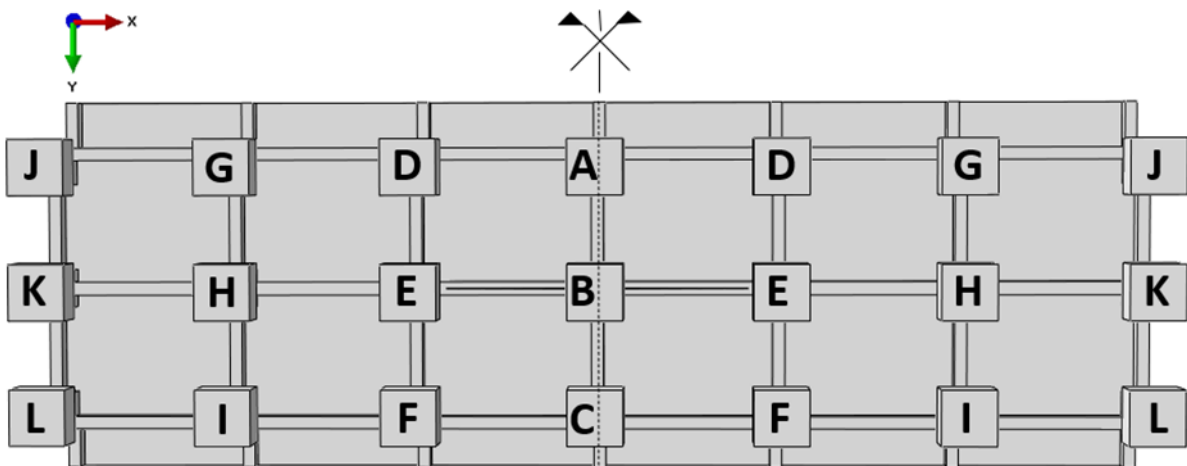


Figura 7.1. Identificação dos elementos de fundação de tempo.

Para cada uma das sapatas analisadas deve ser atribuído um ponto de controle, no nó central do respectivo elemento de fundação, e os dados podem ser comparadas entre si, considerando suas relações, conforme exposto na Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Influência entre sapatas

Sapata	Zona de Influência	Sapata	Zona de Influência	Sapata	Zona de Influência	Sapata	Zona de Influência
A	D - B	D	A - G - E	G	D - J - H	J	G - K
B	A - E - C	E	B - D - H - F	H	E - G - K - I	K	H - J - L
C	B - F	F	C - E - I	I	F - H - L	L	I - K

Para a validação metodológica, previamente apresentada por Domingues *et al.* (2022), limita-se ao estudo da relação das sapatas A e D. A escolha por este par é justificada pela criticidade dos deslocamentos na região. Ademais, por ser um problema hipotético e para estar em linha com o exposto nesta tese, o enfoque dos resultados é direcionado à metodologia ao invés do impacto dos deslocamentos em si.

7.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

A análise de sensibilidade das variáveis aleatórias foi pautada na influência que os parâmetros têm no deslocamento vertical (U_3) das sapatas, conforme etapa metodológica apresentada na Seção 5.2.

Para avaliar os resultados foi plotado o número de vezes que cada uma das 34 variáveis aleatórias foi identificada como relevante pelas 31 diferentes técnicas de regressão que foram testadas no escopo do pacote RFECV (Figura 7.2).

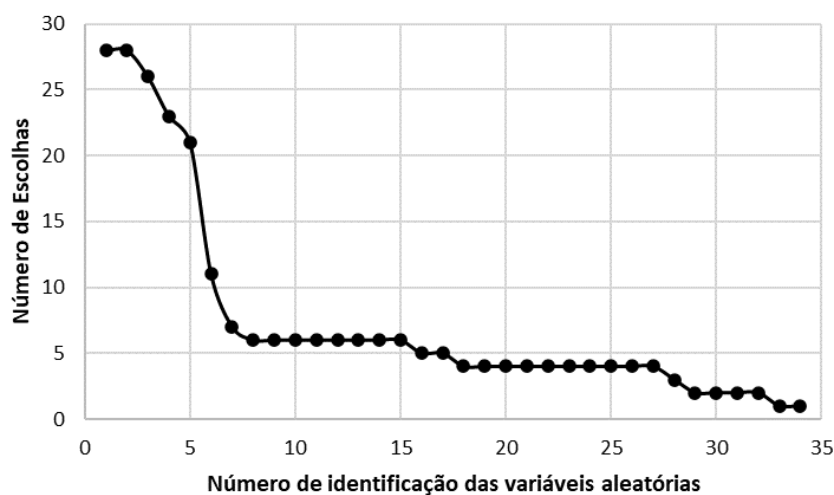


Figura 7.2. Relevância das variáveis aleatórias no deslocamento vertical das Sapatas A e D.

Nota-se na Figura 7.2 que entre a quinta e a sexta variável há um descompasso significativo. Considerando este resultado, têm-se que apenas as cinco primeiras variáveis aleatórias devem ser consideradas para resolução do problema por atenderem a mais de 50% das escolhas. Na Tabela 7.2 apresenta-se um detalhamento das variáveis escolhidas e sua importância percentual no cálculo de deslocamento vertical das sapatas A e D.

Tabela 7.2. Importância relativa de cada parâmetro

Parâmetro	Número de escolhas	Importância Global ¹ (%)	Importância Local ² (%)
Camada 1 – Módulo de Young	28	75,4	78,0
Camada 3 – Módulo de Young	28	7,4	11,2
Camada 3 – K_0	26	2,7	5,7
Camada 1 – Relação de Poisson	23	1,0	3,0
Camada 2 – Módulo de Young	21	0,6	2,1
	Σ	87,1	100,0

¹ Importância do parâmetro, no deslocamento vertical das sapatas A e D, ao considerar todas as 34 variáveis aleatórias;

² Importância do parâmetro, no deslocamento vertical das sapatas A e D, ao considerar as cinco variáveis aleatórias escolhidas.

Ao restringir os parâmetros de entrada aos apresentados na Tabela 7.2, a melhor técnica de IA entre os 31 testados foi o *ExtraTreesRegressor*. Desta forma, o processo de aprendizagem deste algoritmo específico é apresentado na próxima seção.

7.2 VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Para ajustar a árvore de decisão, que utilizou a técnica nomeada *ExtraTreesRegressor*, foram atribuídos 75% dos dados para calibração e 25% para verificação, conforme metodologia detalhada na Seção 5.3 e operacionalizada na Seção A.4. Tal ação foi capaz de proporcionar um modelo que permite a obtenção de amostras muito similares àquelas obtidas via modelagem numérica (com acurácia superior a 95% para as sapatas A e D).

Com relação a Sapata A, a acurácia obtida foi de 97,61%, um erro médio absoluto de 1 mm e um erro máximo absoluto de 2,8 mm. Na Figura 7.3 são ilustrados os resultados obtidos nas etapas de calibração e o ajuste aos testes realizados. Como foi atingido um erro médio absoluto tolerável de cerca de 1 mm, nenhuma outra otimização de parâmetros foi realizada.

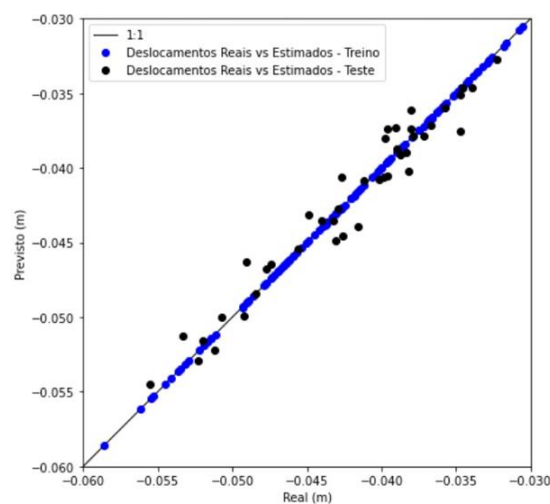


Figura 7.3. Calibração e teste da inteligência artificial para previsão dos deslocamentos verticais da Sapata A.

Para a Sapata D, a acurácia obtida foi de 97,57%, um erro médio absoluto de 1 mm e um erro máximo absoluto de 2,7 mm. Na Figura 7.4 são ilustrados os resultados obtidos nas etapas de calibração e o ajuste aos testes realizados. Igualmente, após obter um erro médio absoluto tolerável de cerca de 1 mm, nenhuma outra otimização de parâmetros foi realizada.

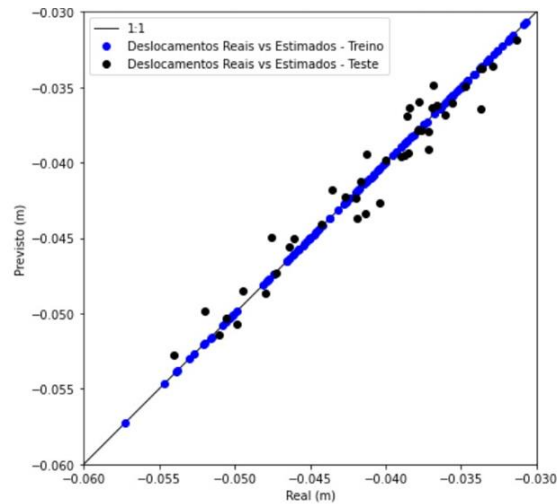


Figura 7.4. Calibração e teste da inteligência artificial para previsão dos deslocamentos verticais da Sapata D.

7.3 AJUSTE DOS DADOS DE DISTORÇÃO ANGULAR

Os dados amostrados para distorção angular foram ajustados a uma distribuição Beta (Johnson *et al.*, 1995), que foi considerada a terceira melhor distribuição de acordo com o critério de informação de Akaike, mas o erro quadrático das duas primeiras distribuições indicou uma má adaptação. As cinco primeiras distribuições são apresentadas na Tabela 7.3.

Tabela 7.3. Ranqueamento das variáveis aleatórias

Parâmetro	Critério de Informação de Akaike (AIC)	Erro quadrado
Von Misses (vonmises)	$-1,50891 \times 10^8$	$6,82 \times 10^{67}$
Função Hipergeométrica (Gausshyper)	$-2,72042 \times 10^7$	$3,29 \times 10^{13}$
Beta (beta)	$-1,96046 \times 10^7$	$2,07 \times 10^8$
Johnson SB (johnsonsb)	$-1,96045 \times 10^7$	$2,06 \times 10^8$
Person Tipo III (Pearson3)	$-1,96042 \times 10^7$	$2,02 \times 10^8$

A concordância visual entre o histograma empírico e a distribuição ajustada é apresentada na Figura 7.5.

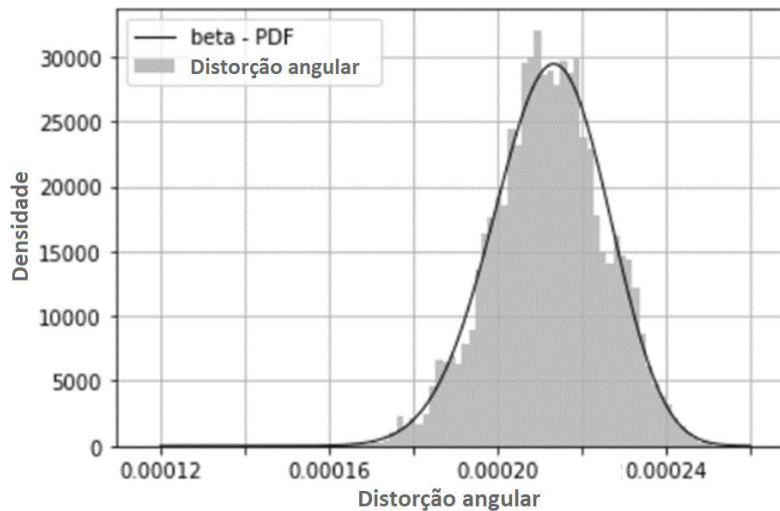


Figura 7.5. Distribuição mais adequada para os dados de distorção angular.

Considerando os resultados obtidos no caso hipotético, avalia-se a probabilidade de falha como a probabilidade de que a distorção angular seja maior que $1/4.000$ ($2,5 \times 10^{-4}$), aqui definido como o critério de Estado Limite de Serviço. Por esta razão, este foi o valor escolhido como referência para traçar o gráfico de convergência das técnicas estudadas. Embora valores inferiores a esta referência não possam ser associados a falhas no ELS, o exercício valida o procedimento metodológico.

7.4 CONFIABILIDADE DAS TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

Para aferir a confiabilidade das técnicas de amostragem, foi estabelecido como referência o resultado obtido na amostragem simples de Monte Carlo (Seção 3.3.3.1). Tendo este valor como o resultado esperado, foram comparadas as técnicas por variáveis antitéticas (Seção 3.3.3.2), por hipercubo latino (Seção 3.3.3.4), por importância (Seção 3.3.3.5), FOSM (Seção 3.3.4.1), FORM (Seção 3.3.4.2) e SORM (Seção 3.3.4.3). Esta comparação é aderente ao procedimento metodológico exposto na Seção 5.5. De todo modo, complementarmente ao apresentado por Domingues *et al.* (2022), esta tese inclui a comparação de outras técnicas de amostragem, além do hipercubo latino e da amostragem simples.

Apresentado o critério de falha na Seção 7.3, na Figura 7.6 expõe-se os resultados obtidos pelas técnicas de amostragem por Monte Carlo Simples (MC), por variáveis antitéticas (IS), por

hipercubo latino (LHS), por importância (IS), FOSM, FORM e SORM. Ademais, para o cálculo de FORM e SORM foi também utilizado o algoritmo HLRF (Seção 3.3.4.2).

Para todas as figuras que seguem, as áreas hachuradas representam os intervalos de confiança de 95% para os valores médios de probabilidade de falha para cada amostra. Esses intervalos de confiança foram obtidos ao aplicar a técnica bootstrap simples a um conjunto de dados simulados. O procedimento, para cada tamanho de amostra, foi o que segue:

- a) Obter uma amostra de valores para cada variável de entrada;
- b) Calcular o valor da probabilidade de falha amostralmente (contando o número de vezes que a distorção angular foi maior do que $1/4.000$ e dividindo essa contagem pelo tamanho da amostra) ou após ajuste a uma distribuição estatística (a partir da função de distribuição acumulada ajustada);
- c) Repetir o processo a) e b) 100 vezes, de forma a obter 100 valores de probabilidade de falha para cada tamanho de amostra;
- d) Para cada um dos conjuntos de 100 valores de probabilidade de falha, utilizar o método bootstrap simples para obter o intervalo de confiança do valor médio de probabilidade de falha para cada tamanho de amostra.

O método bootstrap simples, por outro lado, foi implementado em Python seguindo a seguinte sequência:

- a) Para a amostra de 100 valores de probabilidade de falha obtida, realizar uma re-amostragem de tamanho 100, com reposição, a partir dos valores originais.
- b) Para essa nova amostra, calcular sua média amostral.
- c) Repetir o processo a) e b) 1000 vezes, de forma a obter 1000 valores de média de probabilidade de falha;
- d) Para o conjunto de 1000 valores médios, obter os percentis amostrais de 2.5% e 97.5%, o que totaliza um intervalo de confiança de 95% em torno do valor médio (que será a média simples dos 1000 valores).

Na Figura 7.6 estão apresentadas as estimativas amostrais para os métodos IS, AV, MC e LHS, ou seja, não foram realizados os ajustes dos dados colhidos à distribuição beta.

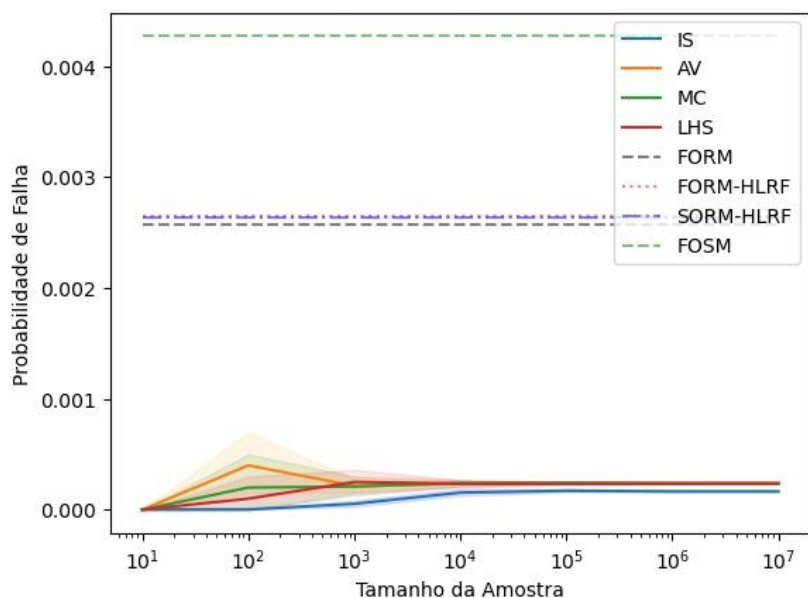


Figura 7.6. Probabilidade de falha aferida por diferentes técnicas de amostragem.

Ainda na Figura 7.6, nota-se a presença dos resultados obtidos a partir dos métodos semi-analíticos. É importante notar que os algoritmos que implementam esses métodos são dependentes do cálculo do gradiente da função que liga os dados de entrada ao valor da distorção angular nos elementos de fundação. Para o caso em análise, isso representaria a derivada do algoritmo de inteligência artificial, quando entendido como função.

Notou-se que, para os cálculos, o algoritmo escolhido (*ExtraTreesRegressor*) não era suave o suficiente para que os gradientes pudessem ser calculados em todo o domínio. Dessa forma, foi necessário reajustar os dados das 170 simulações a um algoritmo mais simples, de regressão linear multivariada, a fim de garantir que os gradientes existissem e pudessem ser calculados de maneira suave. O modelo *ElasticNetCV* do pacote *sklearn*, que nada mais é do que uma regressão linear que tem regularização de seus coeficientes, mostrou-se adequado para a tarefa ao ser o algoritmo linear que teve a pontuação mais próxima ao algoritmo *ExtraTreesRegressor* e que se adequava à presença de correlação nas variáveis de entrada. O desempenho do algoritmo *ElasticNetCV* está apresentado na Figura 7.7. Agora, para a sapata A, a acurácia é de 95,87%, o erro médio absoluto de 1,7 mm e o erro absoluto máximo é de 5,0 mm. Há uma clara degradação de desempenho em relação ao modelo *ExtraTreesRegressor*, no entanto sem esse ajuste não seria possível calcular as probabilidades de falha a partir dos métodos semi-analíticos.

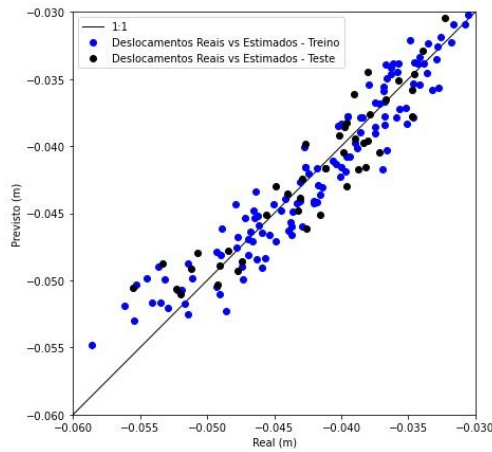


Figura 7.7. Calibração e teste da inteligência artificial simplificado para previsão dos deslocamentos verticais da Sapata A.

Ao separar os resultados obtidos pelos métodos semianalíticos, têm-se na Figura 7.8 uma percepção mais clara das diferenças obtidas nas amostragens de Monte Carlo e suas variações.

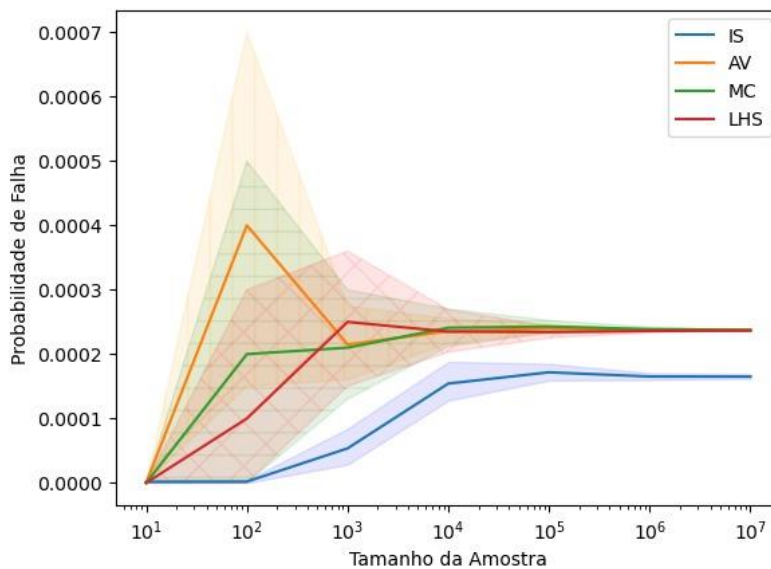


Figura 7.8. Probabilidade de falha aferida pelas técnicas de Monte Carlos e suas variações.

Ainda que, segundo os critérios metodológicos propostos, os dados se ajustem melhor a uma distribuição Beta (Seção 7.3), optou-se por utilizar uma distribuição normal para ajustar os dados colhidos.

Isso se deveu, principalmente, a dois fatores: o primeiro é que o processo de estimação de parâmetros por máxima verossimilhança é explícito e rápido para a distribuição normal, já que os estimadores amostrais também são estimadores de máxima verossimilhança. Para a distribuição Beta, é necessário resolver um sistema não linear de equações para que os estimadores de máxima verossimilhança sejam obtidos. Esse custo computacional excessivo não reflete um aumento considerável na adequabilidade do modelo Beta frente ao modelo Normal, já que o valor do AIC da distribuição normal é levemente superior ao da distribuição beta ($-1,959959 \times 10^7$ versus $-1,960464 \times 10^7$) enquanto o erro quadrático da distribuição normal é levemente menor ($1,893032 \times 10^8$ versus $2,069501 \times 10^8$).

O segundo ponto é que os métodos semi-analíticos se pautam fortemente na premissa da normalidade dos dados, de forma que seria mais interessante compará-los às previsões feitas também sob esse prisma de normalidade. Assim, na Figura 7.9 estão mostradas as previsões de probabilidade de falha média para cada tamanho de amostra a partir da premissa de que os dados simulados seguem uma distribuição normal.

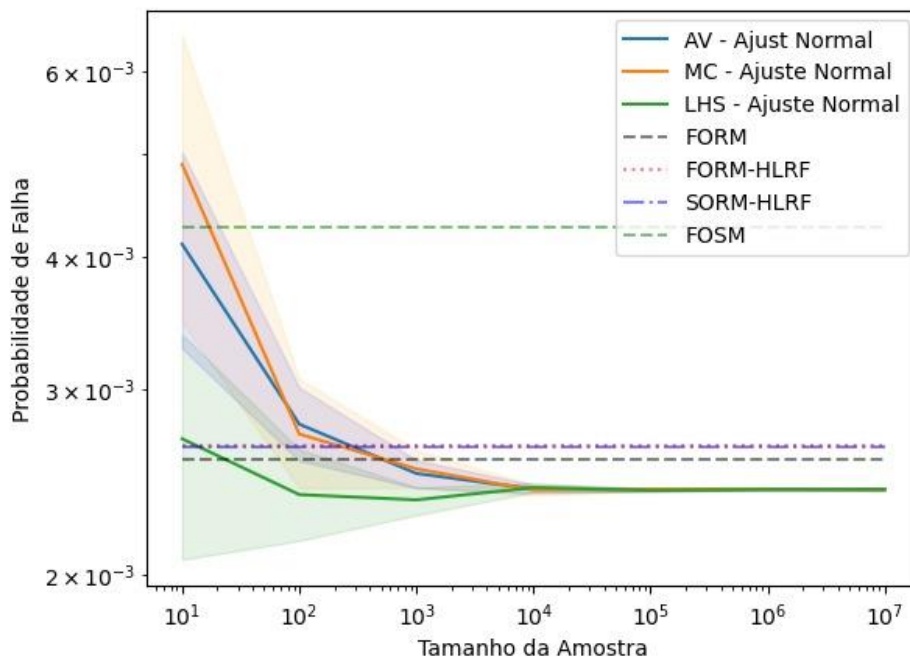


Figura 7.9. Probabilidade de falha com ajuste fundamentado na distribuição normal.

Neste caso nota-se que a amostragem por importância (IS) não aparece no intervalo plotado, que é atribuído de 2×10^{-3} a 6×10^{-3} . Ademais, tem-se uma aproximação perceptível dos métodos

de Monte Carlo e suas variações aos resultados dos métodos semi-analíticos quando se assume que os dados simulados se distribuem segundo uma distribuição normal.

Essa aproximação e convergência de valores não é observada quando os dados amostrais são considerados, conforme indicam a Figura 7.6 e a Figura 7.8. Isso expõe um acúmulo de erro considerável no momento de ajustar os dados a uma distribuição, seja a uma distribuição de melhor aderência ou a uma normal. Tal tipo de erro pode advir do fato que os ajustes são realizados com o conjunto total de dados, e não apenas nas caudas das distribuições como seria o ideal para um caso de cálculo de probabilidade de falha. De qualquer forma, a partir desse descompasso, entende-se que há a necessidade de considerar puramente os dados do histograma. Isto posto, desconsiderados os ajustes para as distribuições estatísticas, Normal ou Beta, apresenta-se na Figura 7.10 uma nova visualização da Figura 7.6, agora enfocando a diferença percentual para o resultado assintótico que, conforme já explicitado, foi estabelecido como o obtido em amostra de 10^7 da técnica de amostragem simples de Monte Carlo (MC).

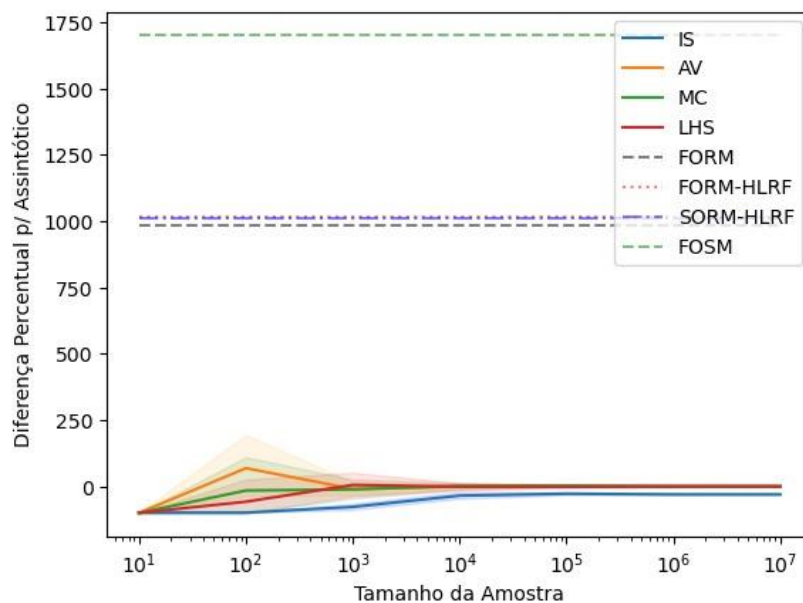


Figura 7.10. Diferença percentual das técnicas de amostragem para o resultado assintótico.

De maneira análoga, têm-se na Figura 7.11 uma visualização separada para as técnicas de Monte Carlo e suas variações, comparando-as ao valor assintótico. Neste caso são também apresentados os limites de $\pm 5\%$ de diferença do resultado assintótico e o tamanho de amostra necessária para se atingir este marco.

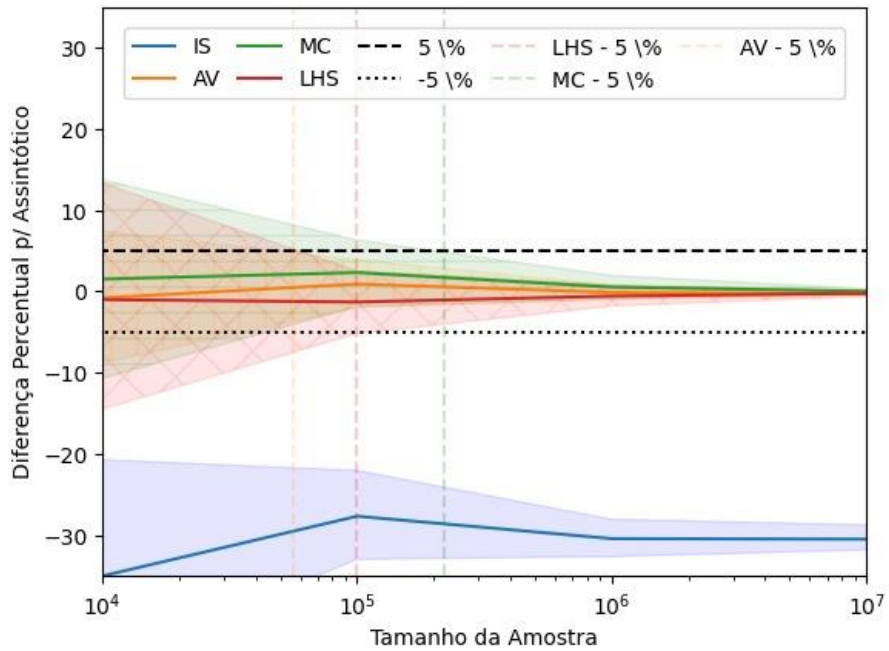


Figura 7.11. Diferença percentual das técnicas de Monte Carlo e suas variações.

Por fim, na Figura 7.12 foi apresentada uma visão mais detalhada com o intervalo máximo de diferença de $\pm 10\%$ para o resultado assintótico. Ademais, foram considerados os marcos de $\pm 5\%$ e $\pm 2,5\%$ para definir o tamanho de amostra desejável para cada técnica estudada.

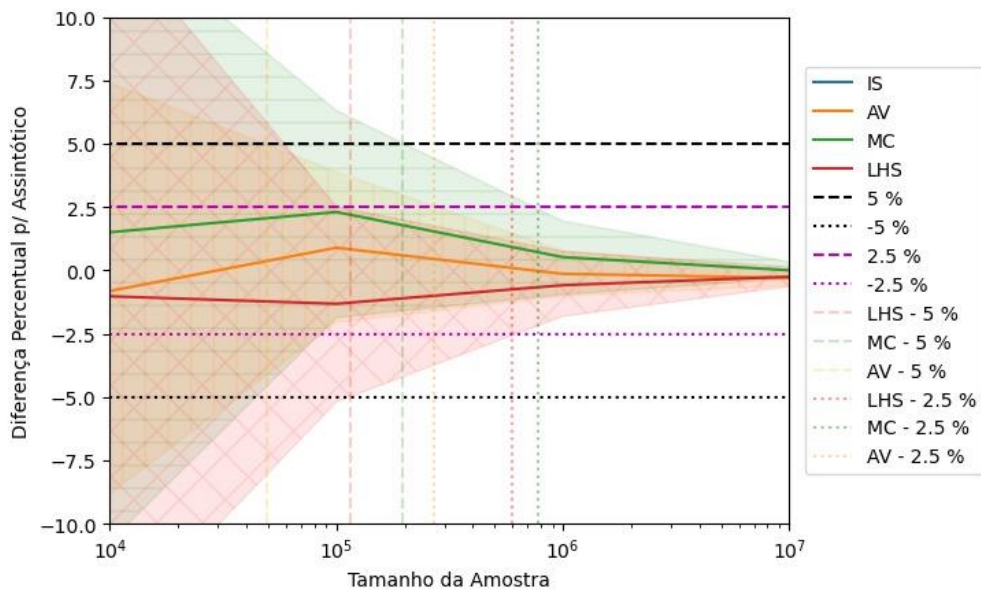


Figura 7.12. Diferença percentual das técnicas de Monte Carlo e suas variações.

Ao comparar numericamente as convergências das técnicas de amostragem, considerando os sete pontos analisados, têm-se os resultados apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4. Comparativo numérico da convergência das técnicas de amostragem

Diferença percentual para o resultado assintótico (Monte Carlo Bruto – 10^7)	5%		2,5%	
	Requerido	Relação com MC	Requerido	Relação com MC
Amostragem Simples (MC)	2×10^5	-	8×10^5	-
Variáveis Antitética (AV)	5×10^4	25%	3×10^5	38%
Hipercubo Latino (LHS)	1×10^5	50%	6×10^5	75%
Importância (IS)	-	-	-	-
FOSM	-	-	-	-
FORM	-	-	-	-
FORM HLRF	-	-	-	-
SORM	-	-	-	-
SORM HLRF	-	-	-	-

Tamanho de amostragem requerida

Destaca-se que os resultados de amostragem por importância (IS) e os métodos semianálíticos apresentam desvio superior a 30% e 1000%, respectivamente, do resultado assintótico, ainda que em posse de uma amostragem de 10^7 . Já a convergência dos métodos de amostragem simples (MC), por variáveis antitéticas (AV) e por hipercubo latino (LHS) puderam ser comparadas. Isto posto, quando o erro aceitável for de 5%, comparado ao resultado assintótico, a técnica de AV requer apenas 25% e a LHS 50% do tamanho da amostra requerido pelo MC. Nos casos em que o aceitável for um desvio de 2,5%, a amostragem AV converge com 38% e a LHS com 75% da amostragem requerida pela MC.

Nota-se que os tamanhos de amostra mínimas foram definidos a partir do momento que o intervalo de confiança de 95% da probabilidade de falha média fica dentro das bandas percentuais indicadas. Isso sugere que, independentemente do gerador de números aleatórios

utilizados para as variáveis de entrada, os valores estarão, com 95% de confiança, dentre dessas bandas.

É possível notar que, de fato, os métodos de amostragem inteligente foram capazes de diminuir a variância (aqui refletida no tamanho do intervalo de confiança da média) para a probabilidade de falha, o que indica a grande valia desses métodos no contexto de engenharia tuneleira e de análise de risco desses empreendimentos.

8 CONCLUSÕES

As técnicas de inteligência artificial são ferramentas promissoras para a análise de risco. Quanto ao cálculo da probabilidade de falha em túneis urbanos, é comum construir modelos numéricos complexos que requerem alta potência computacional. Assim, para não se limitar a uma abordagem determinista, a interpolação dos resultados por técnicas de inteligência artificial se mostra adequada. Este processo de criação de um modelo substituto usando IA é uma novidade no cenário de modelagem de túneis, o que indica a importância deste trabalho.

Isto posto, ao elencar os resultados obtidos nesta tese com os objetivos propostos na Seção 1.2, pode-se afirmar que:

- Objetivo específico 1: compilar metodologias de cálculo de probabilidade de falha aplicadas as obras de túneis urbanos com intervenções na vizinhança.
 - ❖ As metodologias tradicionais de análise de risco foram descritas na Seção 3 “Gerenciamento de Riscos”, enquanto as técnicas atuais foram expostas na Seção 4 “Técnicas Modernas de Classificação de Riscos”. Nota-se pela evolução temporal das pesquisas elencadas nesta tese que a inteligência artificial oferece ferramentas promissoras para análises de risco. Recentes publicações em revistas de relevante impacto demonstram que outras técnicas podem ser combinadas com êxito para obter uma melhor previsibilidade do maciço escavado, com menor esforço computacional. Neste sentido, destaca-se a publicação de Domingues *et al.* (2022) que valida a proposta metodológica abordada em maiores detalhes nesta tese.
- Objetivo específico 2: propor metodologia de cálculo de probabilidade de falha com modelos substitutos que são fundamentados no uso de um programa comercial de elementos finitos, inteligência artificial e algoritmos de amostragem inteligente.
 - ❖ A aplicação metodológica no caso hipotético provou ser adequada para a validação dos conceitos. A combinação de análise numérica, técnicas de inteligência artificial e algoritmos de amostragem inteligente mostrou ser um método promissor capaz de ser adaptado a casos práticos reais. Novamente, destaca-se a publicação de Domingues *et al.* (2022) que valida a proposta metodológica abordada em maiores detalhes nesta tese.
 - ❖ Destaca-se que o modelo numérico é o ponto de partida desta proposta metodológica e qualquer desvio nesta etapa poderá comprometer todo o processo. Isto posto, é importante destacar que as simplificações adotadas em

cada modelo devem estar em linha com o nível de risco aceitável pelas partes interessadas no processo. Como a proposta desta tese, de igual forma ao apresentado por Domingues *et al.* (2022), é uma validação metodológica, foram toleradas simplificações que na prática são desencorajadas.

- ❖ Um importante destaque desta proposta metodológica é a adaptação da resposta ao risco em um tempo aceitável pela prática da engenharia tuneleira. Por este motivo, com a mesma intensidade, atribui-se destaque a importância de um refinamento do modelo numérico, tanto em seu domínio quanto em sua malha. Isto permitirá que o modelo seja replicado a uma análise paramétrica de maneira segura e eficaz.
 - ❖ A análise de sensibilidade das variáveis aleatórias é essencial para que se possa desprezar apenas informações que tenham uma importância irrelevante ao problema estudado. Para o caso hipotético, por exemplo, pôde-se reduzir de 34 para apenas 5 variáveis aleatórias. Uma análise eficaz desta condição, novamente, irá espelhar tanto no desempenho computacional quanto na segurança sobre os resultados obtidos.
 - ❖ As técnicas de inteligência artificial se mostraram capazes de interpolar os dados com uma acurácia comumente aceita para os problemas práticos de engenharia. Esta ferramenta permite a criação de modelos substitutos que, por sua vez, viabilizam o cumprimento da análise em tempo hábil para atividades práticas da engenharia tuneleira.
 - ❖ Os algoritmos de amostragem inteligente, conforme previamente exposto por Santos e Beck (2014) e confirmada por Domingues *et al.* (2022), são capazes de convergir ao resultado assintótico do Monte Carlo Bruto com um número significativamente menor ao requerido pelo Monte Carlo Bruto. Este fato também contribui para o tempo total do processo, uma vez que a acurácia desejada pode ser atingida com um menor número de amostras obtidas no programa numérico.
- Objetivo específico 3: analisar a convergência dos métodos de amostragem ao resultado de Monte Carlo Bruto
 - ❖ Notou-se um acúmulo de erro considerável no momento de ajustar os dados totais, obtidos no histograma, a uma distribuição, seja a uma distribuição de melhor aderência ou a uma normal. Tal tipo de erro pode advir do fato que os

ajustes são realizados com o conjunto total de dados, e não apenas nas caudas das distribuições como seria o ideal para um caso de cálculo de probabilidade de falha. De qualquer forma, a partir desse descompasso, entende-se que há a necessidade de considerar puramente os dados do histograma.

- ❖ Limitado aos resultados do caso hipotético proposto, é aferido que a amostragem por importância (IS) e os métodos semianáliticos apresentam desvio superior a 30% e 1000%, respectivamente, do resultado assintótico, ainda que em posse de uma amostragem de 10^7 . Já a convergência dos métodos de amostragem simples (MC), por variáveis antitéticas (AV) e por hipercubo latino (LHS) puderam ser comparadas. Isto posto, quando o erro aceitável for de 5%, comparado ao resultado assintótico, a técnica de AV requer apenas 25% e a LHS 50% do tamanho da amostra requerido pelo MC. Nos casos em que o aceitável for um desvio de 2,5%, a amostragem AV converge com 38% e a LHS com 75% da amostragem requerida pela MC. Nota-se que os tamanhos de amostra mínimas foram definidos a partir do momento que o intervalo de confiança de 95% da probabilidade de falha média fica dentro das bandas percentuais indicadas. Isso sugere que, independentemente do gerador de números aleatórios utilizados para as variáveis de entrada, os valores estarão, com 95% de confiança, dentro dessas bandas.

Além do escopo desta tese, podem ser estudados em pesquisas futuras, de maneira mais aprofundada, outros temas correlacionados. Na sequência citam-se algumas possibilidades:

- Propor uma aplicação prática da metodologia proposta em um estudo de caso real de uma escavação em meio urbano;
- Avaliar a convergência das técnicas de amostragem quando aplicadas a um estudo de caso real;
- Avaliar a aplicação de arcabouço metodológico similar para estudar a variabilidade espacial das propriedades dos materiais geotécnicos;
- Avaliar a aplicação da metodologia em outras áreas da engenharia geotécnica;
- Estudar a convergência de outras técnicas de amostragem quando submetidas ao mesmo processo metodológico e estudo de caso;
- Estudar sobre o aumento do número de simulações numéricas para aferir o ganho de acurácia no processo metodológico;

- Reavaliar a metodologia fundamentado em um modelo numérico que avance sobre as simplificações propostas nesta tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 14026 (2012). Concreto Projetado - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 8 p.
- ABNT NBR 8044 (2018). Projeto Geotécnico - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 28 p.
- AKAIKE, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716–723.
- AKAIKE, H. (1983). Information measures and model selection. *Bulletin of the International Statistical Institute*, 50, 277–290.
- ALVES, A.R. (2014). Obtenção do Índice de Confiabilidade de Ligações de Perfis Formados a Frio com Emprego do Método FORM. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade de Ouro Preto, Minas Gerais, MG, 89 p.
- ANG, A.H.S.; TANG, W.H. (1984). *Probabilistic Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. II: Decision, risk and reliability*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- ASSIS, A.P. (2014a). Notas de Aula da Disciplina de Obras Subterrâneas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ASSIS, A.P. (2014b). Notas de Aula da Disciplina de Métodos Estatísticos em Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ASSIS, A.P.; FRANCISS, F.O.; RABECHINI JR.; R. (2019). *Gestão de Riscos: Empreendimentos Complexos*. Editora CRV, Curitiba, 344 p.
- AU, S. (2005). Reliability-based sensitivity by efficient simulation. *Computers and Structures*, Vol 83(14): 1048-1061.
- BATMAZ, I.; TUNALI, S. (2003). Small response surface designs for metamodel estimation. *European Journal of Operational Research* 145, 455–470.
- BURLAND, J.B.; WROTH, C.P. (1974). *Settlement of Buildings and Associated Damage. State of the Art Review*. Conference on Settlement of Structures, Cambridge, Pentech Press, London: 611-654.
- CARLETTO, M.F.W. (2009). Jet Grouting (sistema monofluido): um método teórico simplificado para previsão do diâmetro das colunas. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, 114 p.
- CASTRO, A.O. (2013). Métodos para Seleção de Tuneladoras e Análise Numérica de Diferentes Alinhamentos de Túneis Sujeitos a Altas Pressões Hidráulicas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363 p.
- CECÍLIO JÚNIOR, M.O. (2009). Estudo do Comportamento de um Túnel em Solo Residual em Gnaisse por meio de Ensaio Triaxiais com Controle de Trajetórias de Tensões. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 204 p.
- CERIĆ, A.; MARČIĆ, D.; IVANDIĆ, K. (2011). A risk-assessment methodology in tunnelling. *Tehnicki Vjesnik*, 18(4): 529-536.
- CHENG, H.; CHEN, J.; CHEN, G. (2019). Analysis of ground surface settlement induced by a large EPB shield tunnelling: a case study in Beijing, China. *Environmental Earth Sciences*, 78:605.
- CLEMEN, R. T. (1996). *Making a hard decisions: An introductory to decision analysis (2nd ed.)*. Belmont, CA: Duxbury.

- CROMBECQ, K.; LAERMANS, E.; DHAENE, T. (2011). Efficient space-filling and non-collapsing sequential design strategies for simulation-based modeling, *European Journal of Operational Research*, Vol. 214(3): 683-696. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.05.032.
- CUI, J.; XU, W.; FANG, Y.; TAO, L.; HE, C. (2020). Performance of Slurry Shield Tunnelling in Mixed Strata Based on Field Measurement and Numerical Simulation. *Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 6785260, 14 p.
- DAMMYR, O. (2017). Pressurized TBM-shield tunneling under the subsidence sensitive grounds of Oslo: Possibilities and limitations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 66: 47-55.
- DINDARLOO, S.R.; SIAMI-IRDEMOOSA, E. (2015). Maximum surface settlement-based classification of shallow tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 49: 320-327.
- DOMINGUES, V.R. (2016). Técnicas Construtivas de Túneis de Travessia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.
- DOMINGUES, V.R.; OZELIM, L.C.S.M.; ASSIS, A.P.; CAVALCANTE, A.L.B. (2022). Combining Numerical Simulations, Artificial Intelligence and Intelligent Sampling Algorithms to Build Surrogate Models and Calculate the Probability of Failure of Urban Tunnels. *Sustainability*.
- DU, X. (2005). Probabilistic Engineering Design. University of Missouri – Roulla.
- ELMOUCHI, A.M.; HASSAN, A.M.; AMER, M.I. (2018). Performance of an existing raft foundation rested on granular soils due to TBM tunneling process. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 108.
- EINSTEIN, H.H. (1996). Risk and Risk Analysis in Rock Engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11: 141-155.
- EINSTEIN, H.H.; INDERMITTE, C.; SINFIELD, J.; DESCOEUDRES, F.P.; DUDT, J.P. (1999). Decision Aids for Tunneling. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1656: 6-13.
- ESKESEN, S.D.; TENGBORG, P.; KAMPMANN, J.; VEICHERTS, T.H. (2004). Guidelines for tunneling risk management: international tunnelling association, Working Group N. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(3): 217-237.
- FANG, K.T. (1980). Experimental design by uniform distribution. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica* 3, 363–372.
- FANG, Y.; WU, C.; CHEN, S.; LIU, C. (2014). An estimation of subsurface settlement due to shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 44: 121-129.
- FARIAS, M.M.; MORAES JÚNIOR, A.H.; ASSIS, A.P. (2004). Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19: 283-293.
- FENTON, G.A.; GRIFFITHS, D.V. (2008). Risk assessment in geotechnical engineering. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Nova Jersey, NJ, 480 p.
- FOÁ, S.B. (2005). Análise de Recalques de Fundações e seus Danos em Edifícios Devido a Escavações Subterrâneas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 308 p.
- FRANCO, V.H. (2019). Mathematical and probabilistic modeling approach for estimation of surface settlements due to TBM tunneling. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153 p.
- FUYONG, C.; LIN, W.; WENGANG, Z. (2019). Reliability Assessment on Stability of Tunnelling Perpendicularly Beneath an Existing Tunnel Considering Spatial Variabilities of Rock Mass Properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 88: 276-289.

- GASSER, C.; BUCHER, C. (2018). An optimized strategy for using asymptotic sampling for reliability analysis. *Structural Safety*, Vol. 71: 33-40.
- GHIASI, V.; OMAR, H.; HUAT, B.; MUNIANDI, R.; B. MD YUSOF, Z. (2011). Risk management overview of tunnels using numerical modeling. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 9(1). 110-124.
- GHORBANI, M.; SHARIFZADEH, M.; YASROBI, S.; DALYAN, M. (2012). Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunneling hazards in urban areas – The case of Niayesh road tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology* 31:1-8.
- GONZALES, N.; ROUAINIA, M.; ARROYO, M.; GENS, A. (2012). Analysis of tunnel excavation in London Clay incorporating soil structure. *Géotechnique*, Vol. 62: 1095–1109.
- GORISSEN, D.; CROMBECQ, K.; HENDRICKX, W.; DHAENE, T. (2007). Adaptive distributed metamodeling. *High Performance Computing for Computational Science - VECPAR*, 579–588.
- GORISSEN, D.; CROMBECQ, K.; COUCKUYT, I.; DHAENE, T.; DEMEESTER, P. (2010). A surrogate modeling and adaptive sampling toolbox for computer-based design. *Journal of Machine Learning Research* 11, 2051–2055.
- GUERRERO, J.E.A. (2014). *Gestão dos Riscos Geomecânicos devidos à Escavação de Túneis Urbanos: Aplicação ao Metrô de Bogotá*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 342 p.
- GUGLIELMETTI, V.; GRASSO, P.; MAHTAB, A.; XU, S. (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*. Taylor & Francis Group, London, UK, 528 p.
- GORICKI, A. (2013). Engineering aspects of geotechnical tunnel design. *Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment - Kwasniewski & Lydzba (eds)*, Taylor & Francis Group, London, UK, 12 p.
- GRASMICK, J. G.; MOONEY, M. A.; TRAINOR-GUITTON, W. J.; WALTON, G. (2020). Global versus Local Simulation of Geotechnical Parameters for Tunneling Projects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 146(7): 04020048. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002262.
- GRIFFITHS, D.V.; HUANG, J.; FENTON, G.A. (2012). Risk Assessment in Geotechnical Engineering: Stability Analysis of Highly Variable Soils. *Geotechnical Special Publication. Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012*. 78-101.
- GROSSO, A.; JAMALI, A.; LOCATELLI, M. (2009). Finding maximin latin hypercube designs by iterated local search heuristics. *European Journal of Operational Research* 197, 541–547.
- HAMROUNI, A.; DIAS, D.; SBARTAI, B. (2019). Probability Analysis of Shallow Circular Tunnels in Homogeneous Soil using the Surface Response Methodology Optimized by a Genetic Algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 86: 22-33.
- HAO, X.J.; SUN, Z.W.; ZHAO, Y.X.; KANG, Y.Q.; ZHANG, Q.; CHENG, J.G.; WEI, Y.N.; CHEN, Z.Y. (2021). Characteristics of Ground Surface Settlement of Double-Line Adjacent Metro Construction in Sandy Cobble Stratum: A Case Study of Beijing Airport Line. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- HASOFER, A.M.; LIND, N.C (1974). Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, v. 100, n. 1, p. 111-121.
- HAYATI, A.N.; AHMADI, M.M.; HAJJAR, M.; KASHIGHANDI, A. (2012). Unsupported Advance Length in Tunnels Constructed using New Austrian Tunnelling Method and Ground Surface Settlement. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.
- HUANG, H.; ZHANG, D. (2015). Quantitative Geotechnical Risk Management for Tunneling Projects in China. *Geotechnical Safety and Risk V*, T. Schweckendiek *et al.* (eds.): 60-73.

- HOLICKÝ, M.; ŠAJTAR L. (2006). Risk Assessment of road tunnels based on Bayesian network. Proceedings of the ESREL 2006 Conference on Safety and Reliability for Managing Risk, Estoril, Portugal.
- HOLICKÝ, M.; SMOLÍK, J.; ŠAJTAR L. (2007). Optimisation of road tunnel safety based on risk analysis. *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*, 1(2): 1827 – 1833.
- JAKY, J. (1944). The coefficient of earth pressure at-rest. *Journal of Society of Hungarian Architects and Engineers*, pp. 355-359.
- JOHNSON, N. L.; KOTZ, S.; BALAKRISHNAN, N. (1995). Chapter 25: Beta Distributions. *Continuous Univariate Distributions Vol. 2 (2nd ed.)*. Wiley. ISBN 978-0-471-58494-0.
- KAYSER, M.; GAJAN, S. (2014) Application of probabilistic methods to characterize soil variability and their effects on bearing capacity and settlement of shallow foundations: state of the art, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8:4, 352-364.
- KELLER TECNOGEO (2020). Enfilagem / DHPs / Injeções de Consolidação (obras de Túneis). Disponível em: < <http://www.tecnogeo.com.br/enfilagem-dhps-injecoes-consolidacao-obras-tuneis>>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- KIMIAEIFAR, A.; LUND, E.; THOMSEN, O.T.; SORENSEN, J.D. (2013). Asymptotic Sampling for reliability analysis of adhesive bonded stepped lap composite joints. *Engineering Structures*, Vol. 49: 655-663.
- KIUREGHIAN, A.D.; LIU, P. (1986). Structural Reliability Under Incomplete Probability Information. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 112(1): 85-104.
- KNOFCZYNSKI, G.T.; MUNDFROM, D. (2007). Sample Sizes When Using Multiple Linear Regression for Prediction. *Educational and Psychological Measurement*. Vol. (68): 431-442.
- KOSHIMA, A. (2013). Ground Improvement, Pre-Support & Reinforcement. *Proceedings of the World Tunnel Congress*. Geneva, Switzerland.
- KUMAR, R.; BHARGAVA, K.; CHOUDHURY, D. (2016). Estimation of Engineering Properties of Soils from Field SPT Using Random Number Generation. *INAE Lett*, pp. 77–84.
- LACASSE, S.; NADIM, F.; HOΦEG, K. (2012). Risk Assessment and Mitigation in Geo-Practice. *Geotechnical Special Publication. Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress 2012*. 729-764.
- LI, M.; WANG, J. (2021). Intelligent Recognition of Safety Risk in Metro Engineering Construction Based on BP Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*, 10 p.
- LIU, W.; WU, X.; ZHANG, L.; WANG, Y. (2017). Probabilistic analysis of tunneling-induced building safety assessment using a hybrid FE-copula model. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(8): 1065-1081.
- LU, Q.; XIAO, Z.; JI, J.; ZHENG, J. (2017). Reliability Based Design Optimization for a Rock Tunnel Support System with Multiple Failure Modes Using Response Surface Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 70: 1-10.
- LU, L.; ZHANG, Y. (2020). Toward a Stakeholder Perspective on Safety Risk Factors of Metro Construction: A Social Network Analysis. *Complexity of Construction Project Networks*, 12 p.
- LU, Y.; LIANG, S.; LUO, S.; LI, J.; ZHANG, B. (2018). Optimization of the Construction Technology of Shallow-Buried Tunnel Entrance Constructed in Residual Slope Accumulation of Gravelly Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.36: 2391-2401.
- MAHMOODZADEH, A.; MOHAMMADI, M.; DARAEI, A.; ALI, H.F.H.; NAWZAD, K.A.; OMER, R.M.D. (2020). Forecasting maximum surface settlement caused by urban tunneling. *Automation in Construction* 120, 103375.

- MAIR, R.; TAYLOR, R.; BURLAND, J. (1996). Prediction of ground movements and assessment of risk building damage due to bored tunnelling. In: International Conference of Geotechnical Aspects of on Underground Construction in Soft Ground, London, United Kingdom, 713-718.
- MASÍN, D. (2009). 3D Modeling of an NATM Tunnel in High k_0 Clay Using Two Different Constitutive Models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135: 1326-1335.
- MAYDEU-OLIVARES, A.; GARCÍA-FORERO, C. (2010). Goodness-of-Fit Testing. *International Encyclopedia of Education*, 190–196. doi:10.1016/b978-0-08-044894-7.01333-6
- MCKAY, M.D.; BECKMAN, R.J.; CONOVER, W.J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, Vol. 21(2): 239-245.
- MELCHERS, R. E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction*. Chichester: John Wiley and Sons.
- METROPOLIS, N.; ULAM, S. (1949). The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247): 335-341.
- MICHALOWSKI, R.L. (2005). Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131: 1429-1433.
- MILLER, D.E.; KUNCE, J.T. (1973). Prediction and Statistical Overkill Revisited. *Measurement and Evaluation in Guidance*, Vol. 6: 157–163.
- MOHAMMADI, S.D.; FIRUZI, M.; KALJAH, E.A. (2016). Geological–geotechnical risk in the use of EPB-TBM, case study: Tabriz Metro, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75:1571–1583.
- NEW, B.M. (1990). Ground Vibration Caused by Construction Works. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 5: 179-190.
- OZELIM, L. C. S. M.; CAVALCANTE, A. L. B.; ASSIS, A. P.; RIBEIRO, L. F. M. (2015). Analytical Slope Stability Analysis Based on Statistical Characterization of Soil Primary Properties. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 15(2): 06014018. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000382.
- PAMUKCU, C. (2015). Analysis and management of risks experienced in tunnel construction. *Acta Montanistica Slovaca*. 20(4): 271-281.
- PARK, H.; OH, J.; KIM, D.; CHANG, S. (2018). Monitoring and Analysis of Ground Settlement Induced by Tunnelling with Slurry Pressure-Balanced Tunnel Boring Machine. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, Article ID 5879402, 10 p.
- PEDHAZUR, E.J.; SCHMELKIN, L.P. (1999). *Measurement, design, and analysis: An integrated approach*. Lawrence Erlbaum: Hillside, NJ.
- PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRISEL, O.; BLONDEL, M.; PRETTENHOFER, P.; WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDERPLAS, J.; PASSOS, A.; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DUCHESNAY, E. (2011). *Scikit-learn: Machine Learning in Python*. *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 12: 2825–2830.
- PMI – Project Management Institute (2021). *Guia PMBOK®: Um Guia para o Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos*. Sétima edição, Pennsylvania: PMI.
- RACKWITZ, R.; FIESSLER, B (1978). Structural Reliability under Combined Random Load Sequences. *Computers and Structures*, v. 9, n. 5, p. 489-494.
- RAPOSO, R.S.P. (2016). *Estudo Tridimensional dos Efeitos Devido a Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153 p.
- ROKACH, L. (2010). Ensemble-based classifiers. *Artificial Intelligence*, Vol. (33): 1 – 39.

SAKAMOTO, B.S. (2016). Análise de Confiabilidade Estrutural utilizando o Método FORM com Múltiplos Modos de Falha para Edifício Alto Submetido à Ação do Vento. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SANTOS, S.R. (2012). Desenvolvimento de Algoritmos Matemáticos Aplicados a Confiabilidade Estrutural. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Programação Matemática, dos Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, PR, 99 p.

SANTOS, K.R.M.; BECK, A.T. (2014). A benchmark study on intelligent sampling techniques in Monte Carlo simulation. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(4): 624-648.

SANTOS, K.R.M. (2014). Técnicas de amostragem inteligente em simulação de Monte Carlo. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 191 p.

SARTAIN, N.; MIAN, J.; PELUSO, D. (2017). Risk Assessment in Geotechnical Engineering Practice. *Geo-Risk 2017. Geotechnical Safety and Reliability: Honoring Wilson H. Tang – C. Hesein Juang et al.* (eds.).

SAUER, G. (1992). Heathrow Express Rail Link (Tender Submission). Dr. G. Sauer & Partners, London, United Kingdom.

SCIKIT (2022). Regressors in scikit-learn. Disponível em: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.utils.all_estimators.html>. Acesso em: 28 abril de 2022.

SHAHRIAR, K.; SHARIFZADEH, M.; HAMIDI, J.K. (2008). Geotechnical risk assessment-based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23: 318-325.

SIMPSON, T.W.; PEPLINSKI, J.; KOCH, P.N.; ALLEN, J.K. (2001). Metamodels for computer-based engineering design: Survey and recommendations. *Engineering with Computers* 17, 129–150.

SPACKOVÁ, O. (2012). Risk management of tunnel construction projects. PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, 164 p.

SPROSS, J.; OLSSON, L.; STILLE, H. (2017). The Swedish Geotechnical Society's methodology for risk management: a tool for engineers in their everyday work. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered System and Geohazards*, 12(3): 183-189.

SRIVASTAVA, A.; SIVAKUMAR BABU, G. L. (2009). Effect of soil variability on the bearing capacity of clay and in slope stability problems. *Engineering Geology*, Vol. 108 (1-2): 142-152.

SUWANSAWAT, S.; EINSTEIN, H. H. (2006). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21(2): 133-150.

STURK, R.; OLSSON, L.; JOHANSSON, J. (1996). Risk and Decision Analysis for Large Underground Projects, as Applied to the Stockholm Ring Road Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11: 157-164.

VAHDATIRAD, M.J.; BAYAT, M.; ANDERSEN, L.V.; IBSEN, L.B. (2015). Probabilistic Finite Element Stiffness of a Laterally Loaded Monopile based on an Improved Asymptotic Sampling Method. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 21(4): 503-513.

VALDENEBRO, J.V.; GIMENA, F.N. (2018). Urban utility tunnels as a long-term solution for the sustainable revitalization of historic centres: The case study of Pamplona-Spain. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 81: 228-236.

VERGARA, D.A.H. (2013). Análise Paramétrica da Técnica de Pre-Suporte com Enfilagens em Portais de Túneis. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94 p.

- VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T.E.; HABERLAND, M.; REDDY, T.; COURNAPEAU, D.; BUROVSKI, E.; PETERSON, P.; WECKESSER, W.; BRIGHT, J.; WALT, S.V.; BRETT, M.; WILSON, J.; MILLMAN, K.J.; MAYOROV, N.; NELSON, A.R.J.; JONES, E.; KERN, R.; LARSON, E.; CAREY, C.J.; POLAT, I.; FENG, Y.; MOORE, E.; VANDERPLAS, J.; LAXALDE, D.; PERKTOLD, J.; CIMRMAN, R.; HENRIKSEN, I.; QUINTERO, E.A.; HARRIS, C.R.; ARCHIBALD, A.M.; RIBEIRO, A.H.; PEDREGOSA, F.; MULBREGT, P.V. (2013). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, Vol. 17: 261–272.
- VITALI, O.P.M.; CELESTINO, T.B.; BOBET, A. (2018). 3D finite element modelling optimization for deep tunnels with material nonlinearity. *Underground Space*, V. 3(2): 125-139.
- WANG, R.; DIWEKAR, U.; GRÉGOIRE PADRÓ, C.E. (2004). Efficient sampling techniques for uncertainties in risk analysis. *Environ. Prog.*, 23: 141-157. <https://doi.org/10.1002/ep.10020>
- WANG, J.; CAO, A.; WU, Z.; SUN, Z.; LIN, X.; SUN, L.; LIU, W.; LIU, X.; LI, H.; SUN, Y.; LONG, Y. (2021). Dynamic Risk Assessment of Ultra-Shallow-Buried and Large-Span Double-Arch Tunnel Construction. *Tunneling and Underground Engineering: From Theories to Practices*. Vol. 11(24).
- WEI, X.J.; ZHANG, M.B.; MA, S.J.; XIA, C.; LIU, X.W.; DING, Z. (2021). Deformation Characteristics of Existing Twin Tunnels Induced by Double Shield Undercrossing with Prereinforcement: A Case Study in Hangzhou. *Advances in Mechanical Engineering, Special Issue*.
- WHITMAN, R.V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2): 143-188.
- WOLFF, E. (2014). Gerenciamento de Risco Geotécnico Aplicado a Infraestruturas Portuárias. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.
- WU, B.; HUANG, W. (2020). Optimization of sequential excavation method for large-section urban subway tunnel: A case study. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12(9).
- YANG, J.S.; GOU, D.M.; ZHANG, Y.X. (2008). Field Measurements and Numerical Analyses of Double-Layer Pipe Roof Reinforcement in a Shallow Multiarch Tunnel. *Journal of the Transportation Research Board*, n.2050: 145-153.
- YANG, R.; XUE, Y. (2017). Risk Assessment of Void behind the Lining Based on Numerical. *Geo-Risk Conference*, Denver, Colorado.
- YANG, X.L.; HUANG, F. (2011). Collapse Mechanism of Shallow Tunnel based on Nonlinear Hoek-Brown Failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 26: 686-691.
- YE, F.; QIN, N.; GAO, X.; QUAN, X.; QIN, X.; DAI, B. (2019). Shield Equipment Optimization and Construction Control Technology in Water-Rich and Sandy Cobble Stratum: A Case Study of the First Yellow River Metro Tunnel Undercrossing. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, Article ID 8358013, 12 p.
- ZHANG, L.; WU, X.; JI, W.; ABOURIZK, S.M. (2016). Intelligent Approach to Estimation of Tunnel-Induced Ground Settlement Using Wavelet Packet and Support Vector Machines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, V. 33(5): 04019058.
- ZHANG, L.; WU, X.; LIU, W.; SKIBNIEWSKI, M.J. (2019). Optimal Strategy to Mitigate Tunnel-Induced Settlement in Soft Soils: Simulation Approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*, V. 31(2).
- ZHONG, T.; MA, Q. (2020). Numerical Analysis and Research of Entrance Slope of Shallow Buried Karst Tunnel. *The 6th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering 4-5 January 2020*, P.R. China.
- ZHOU, Z.L.; ZHAO, J.P.; TAN, Z.S.; ZHOU, X.P. (2021). Mechanical responses in the construction process of super-large cross-section tunnel: A case study of Gongbei tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 115.

A SOLUÇÃO NUMÉRICA DO ESTUDO DE CASO

Este apêndice da tese visa transparecer as etapas realizadas para alcançar os resultados numéricos desta pesquisa. Para resolução da problemática proposta, fez-se o uso do programa ABAQUS® e um código do Python®. Na Figura A.1 apresenta-se, de forma sintetizada, a metodologia aplicada para obtenção de soluções determinísticas otimizadas.

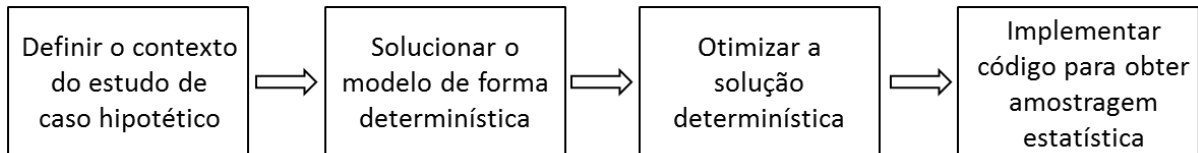


Figura A.1. Macro etapas realizadas para obtenção de soluções determinísticas.

Para sintetizar quais informações foram detalhadas nas quatro etapas supracitadas, a Figura A.2, também apresentada na metodologia, ilustra a problemática em forma similar a uma estrutura analítica de projeto.

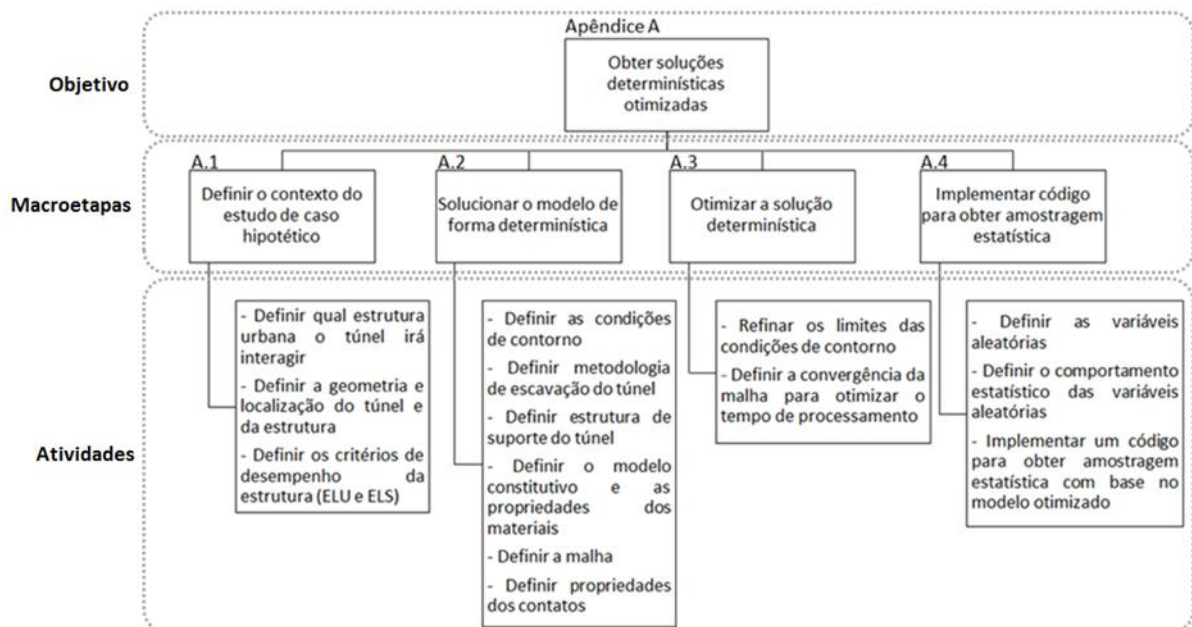


Figura A.2. Estruturação proposta para este apêndice.

A.1 CONTEXTO DO ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

Dentre os objetivos específicos da pesquisa está a revisão das soluções construtivas adotadas com êxito em obras de túneis urbanos. Essa análise norteou a definição do contexto do estudo de caso hipotético, que analisa a interação entre um túnel com cobertura de um diâmetro e um edifício com térreo e mais seis pavimentos. Para esse caso, foi analisado o desempenho do edifício em seu Estado Limite de Serviço – ELS.

A concepção do problema hipotético foi previamente apresentada na Seção 6. Ainda assim, mantem-se as informações-chave deste problema também no apêndice para possibilitar uma leitura contínua. Isto posto, apresenta-se novamente as informações mais relevantes das estruturas analisadas na Tabela A.1, na Figura A.3 e na Figura A.4.

Tabela A.1. Resumo das dimensões da estrutura proposta para o edifício

Fundação				
Elementos estruturais	Largura	Comprimento	Altura	Diâmetro
Base da sapata	1,8	1,8	1,50	-
Fuste da sapata	-	-	1,00	0,60
Bloco	1,20	1,20	1,20	-
Vigas	0,40	var.	0,80	-
Laje	var.	var.	0,10	-
Térreo				
Elementos estruturais	Largura	Comprimento	Altura	Diâmetro
Pilar	0,40	1,20	2,70	-
Viga	0,40	var.	0,80	-
Laje	var.	var.	0,10	-
1º ao 6º Pavimento				
Elementos estruturais	Largura	Comprimento	Altura	Diâmetro
Pilar	0,12	0,30	2,7	-
Viga	0,12	var.	0,45	-
Laje	var.	var.	0,10	-

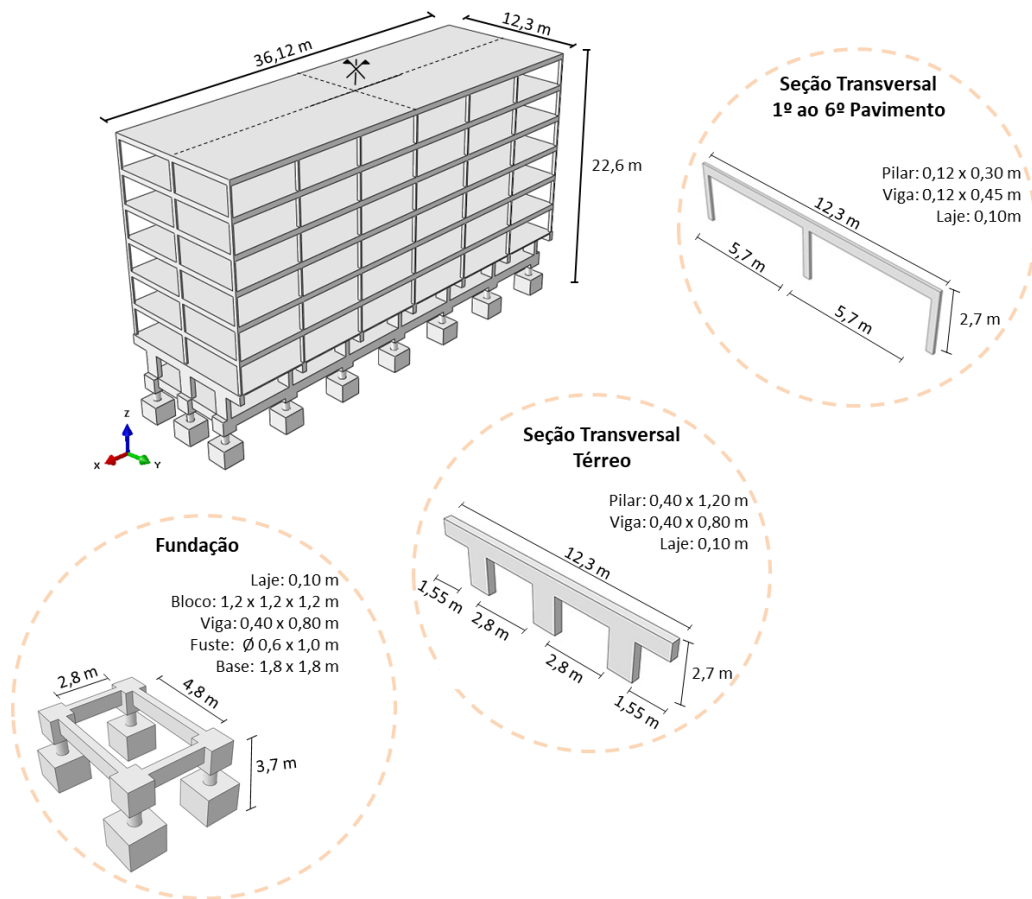


Figura A.3. Geometria da estrutura proposta para o edifício.

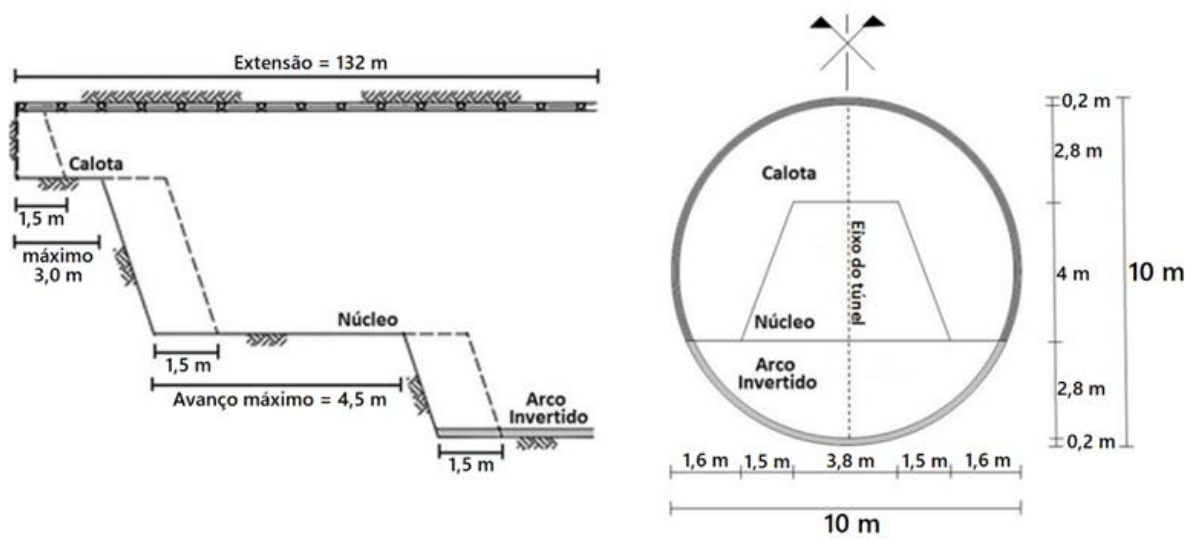


Figura A.4. Seção transversal do túnel proposto para o caso hipotético.

A estrutura da edificação e o túnel interagem durante o processo de escavação, considerando o maciço proposto e representado na Figura A.5.

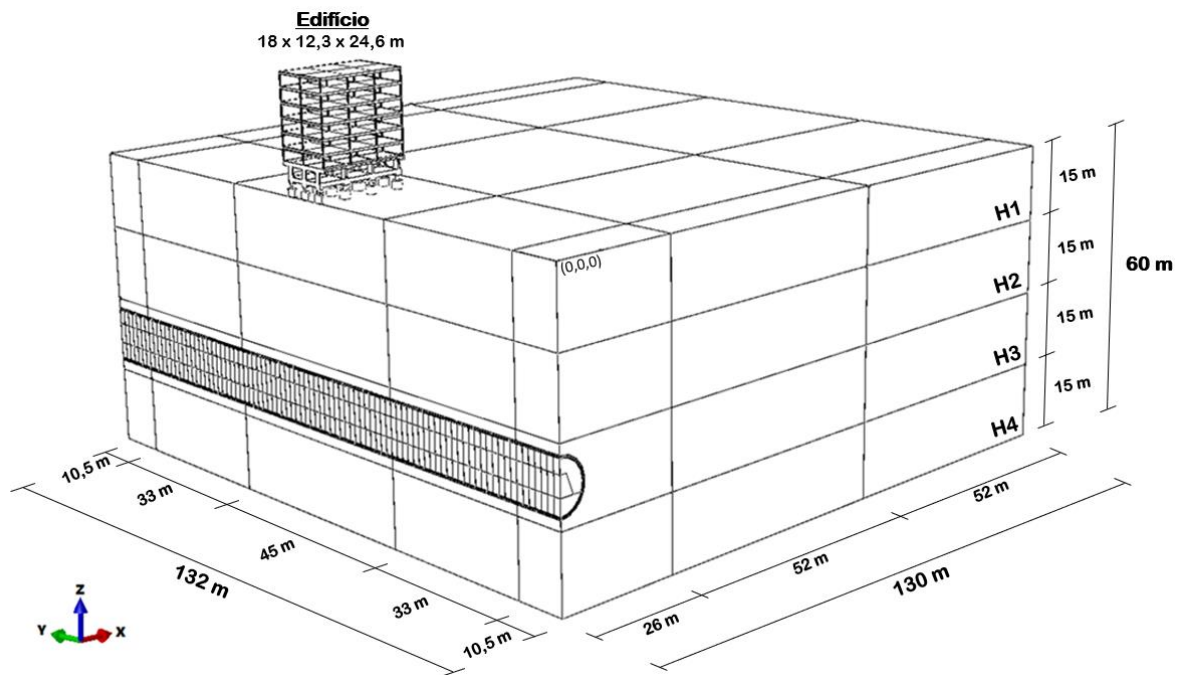


Figura A.5. Modelo inicialmente proposto para o caso hipotético.

Nessa primeira concepção, a condição de contorno de deslocamento lateral foi definida a uma distância de 25 vezes o raio do túnel. Assim, sabendo que o túnel tem 5 m de raio, essa condição representa uma distância de 125 m da extremidade da escavação. Esta atribuição foi fundamentada na experiência do autor em modelos similares. Com relação a vertical, a base engastada foi definida a uma profundidade de 60 m, atribuída arbitrariamente, como impedimento geotécnico aos deslocamentos e rotações. A otimização desses limites é discutida na Seção A.3.1.

A cobertura do túnel em estudo foi de 32,5 m (Figura A.5), valor este que representa, mais precisamente, 3,25 vezes seu diâmetro. Com relação a escavação, esta foi inicialmente dividida em 88 avanços de 1,5 m, totalizando os 132 m atribuídos na condição de contorno do Eixo Y (Figura A.4). Os demais detalhes desse modelo preliminar são discutidos na Seção A.2.

A.2 SIMULAÇÃO INICIAL DO ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

Em um primeiro momento, considerando o contexto relatado na Seção A.1, foi realizada uma simulação piloto que conduziu a otimização relatada na Seção A.3. Nesse momento, serão discutidos os procedimentos adotados no programa ABAQUS® com o intuito de fornecer rastreabilidade às simulações realizadas e expor, de maneira detalhada, a metodologia adotada. As próximas subseções descrevem as funções utilizadas no programa, na ordem apresentada na Figura A.6.

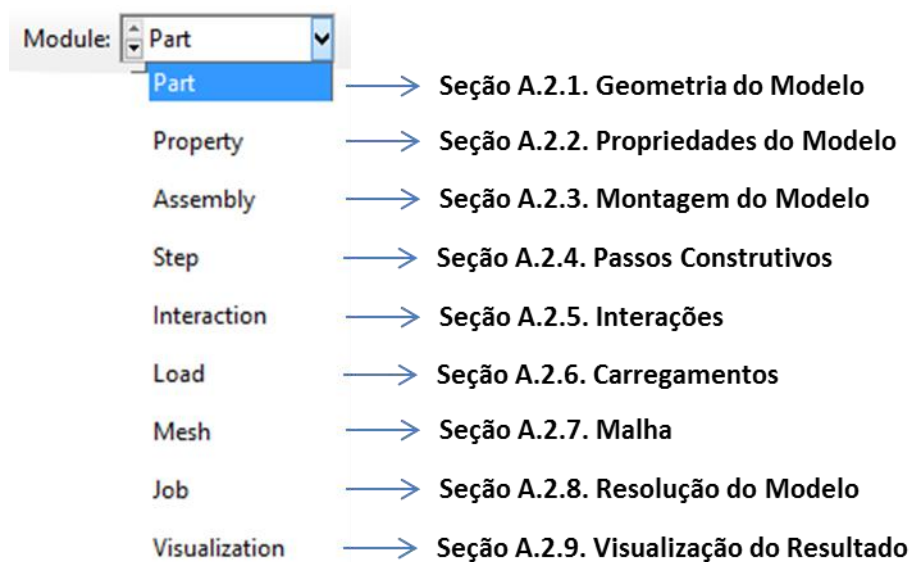


Figura A.6. Módulos utilizados no programa ABAQUS® e detalhados no Apêndice A.

A.2.1 GEOMETRIA DO MODELO

Primeiramente, foi proposta a geometria ilustrada na Figura A.5. Para a concepção do desenho, o ABAQUS® permite a realização em sua própria plataforma ou importação em arquivos em formato “.sat” do AutoCAD. Para a presente pesquisa, conforme exposto na Figura A.7, os desenhos foram importados pelo módulo “Part”.

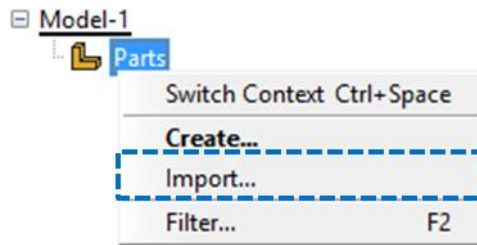


Figura A.7. Importação de desenho em formato “.sat”.

Como seleção alternativa, é possível seguir o seguinte caminho: *File, Import, Part*. Por ser um arquivo importado, foi dada atenção a localização do ponto de coordenadas (0,0,0) e a orientação do Eixos X, Y e Z.

Para os casos em que há a necessidade de estabelecer regras de contato ou informações particularizadas, é recomendável a importação separada. Por esse motivo, a simulação inicial incluiu três diferentes “*Parts*”, são elas: maciço, concreto projetado e edifício. Após a seleção de cada um desses desenhos, as “*Parts*” foram configuradas de acordo com o ilustrado na Figura A.8. Por esse motivo, cada importação teve seus elementos trabalhando de forma conjunta e obedeceu a escala atribuída inicialmente no AutoCAD.

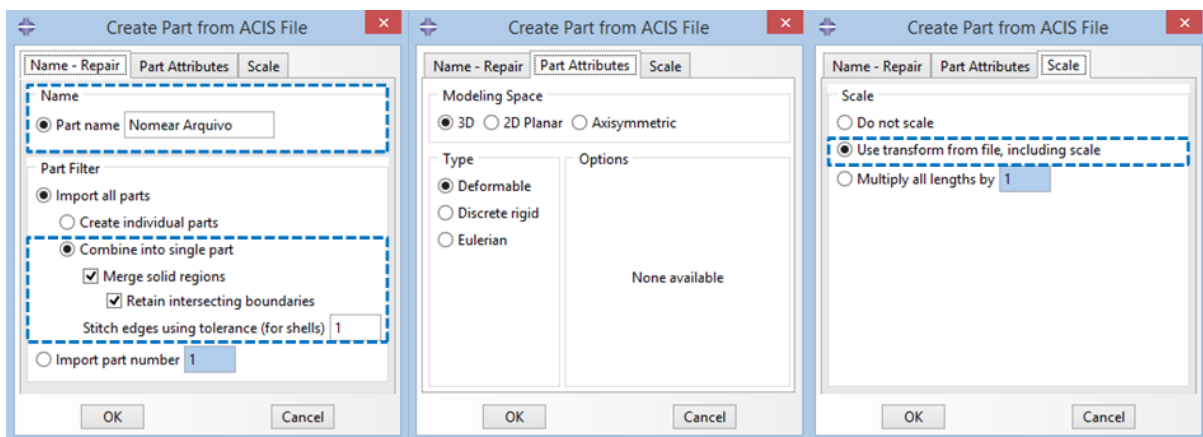


Figura A.8. Configuração das *Parts* importadas.

Em caso de necessidade de alterações nas *Parts* importadas, o programa possibilita edições no caminho ilustrado na Figura A.9: *Part, Manager*.

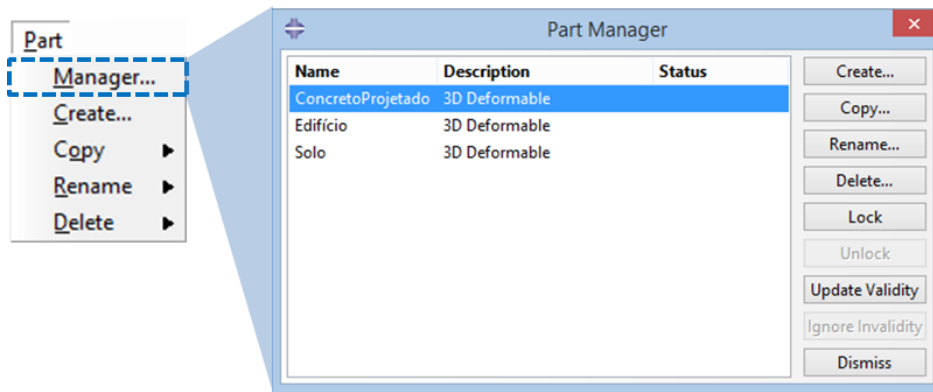


Figura A.9. Gerenciador das *Parts* importadas.

Antes de iniciar os próximos passos no modelo, foram definidos os *Sets* e as *Surfaces* de interesse para cada *Part* importada. De maneira resumida, abaixo são listadas as regiões de interesse que foram incluídas previamente no modelo:

I. *Part*: Concreto Projetado

- Concreto projetado completo (Figura A.10);
- Áreas que serão impedidas de deslocar no Eixo X e no Eixo Y (Figura A.11);
- Área de contato com o maciço (Figura A.12);
- Regiões com tamanho similar aos passos de escavação para comportar o recebimento da carga após o desconfiamento do maciço (Figura A.13).

II. *Part*: Edifício

- Edifício completo (Figura A.14);
- Áreas que serão impedidas de deslocar no Eixo X (Figura A.15);
- Área da base do tubulão que terá contato com o maciço (Figura A.16);
- Área das lajes que receberam carregamento (Figura A.17).

III. *Part*: Maciço

- Áreas que serão impedidas de deslocar nos Eixos X, Y e Z (Figura A.18);
- Cada um dos quatro horizontes estratigráficos (Figura A.19);
- Superfície do solo que terá contato com o edifício (Figura A.20);
- Superfície do maciço que terá contato com o concreto projetado (Figura A.21);
- Cada passo de escavação da calota (Figura A.22);
- Cada passo de escavação do núcleo (Figura A.22);
- Cada passo de escavação do arco invertido (Figura A.22).

Nas figuras abaixo se ilustram os *Sets* supracitados para o concreto projetado.

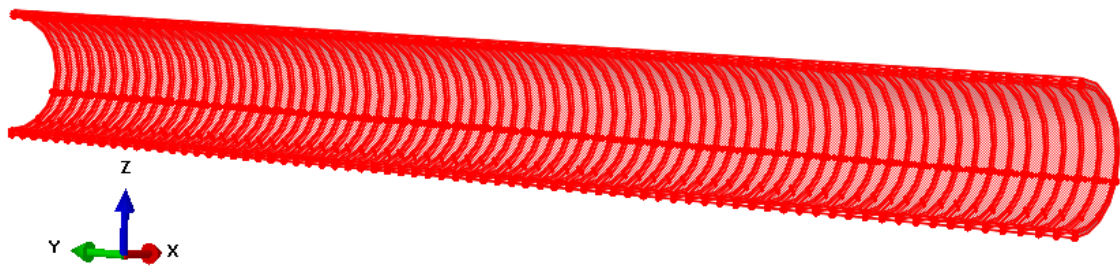


Figura A.10. *Set* atribuído ao concreto projetado completo.

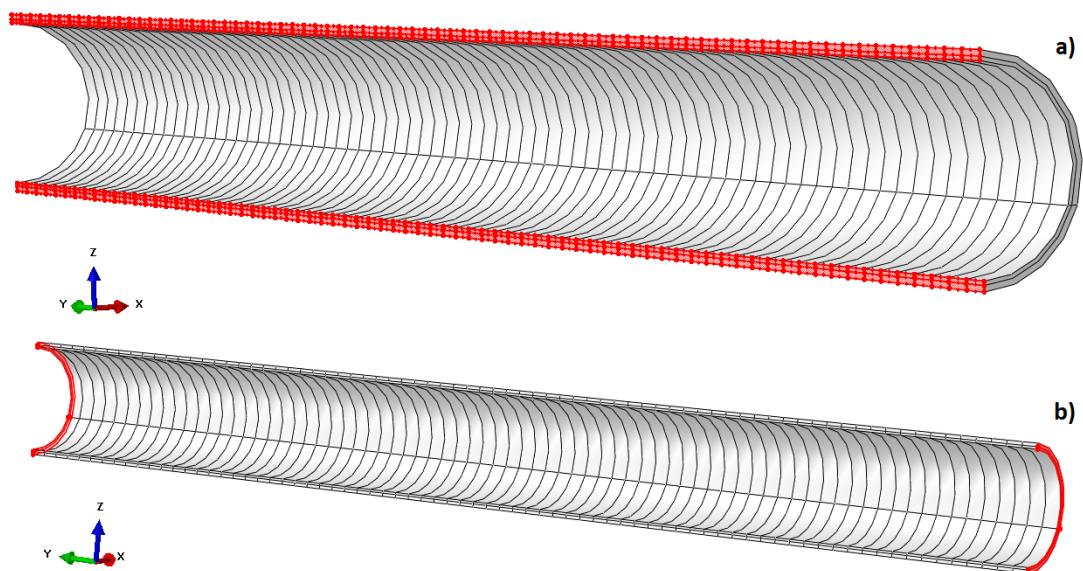


Figura A.11. *Sets* para as condições de contorno do concreto projetado: a) faces impedidas de deslocar no Eixo X; e (b) faces impedidas de deslocar no Eixo Y.

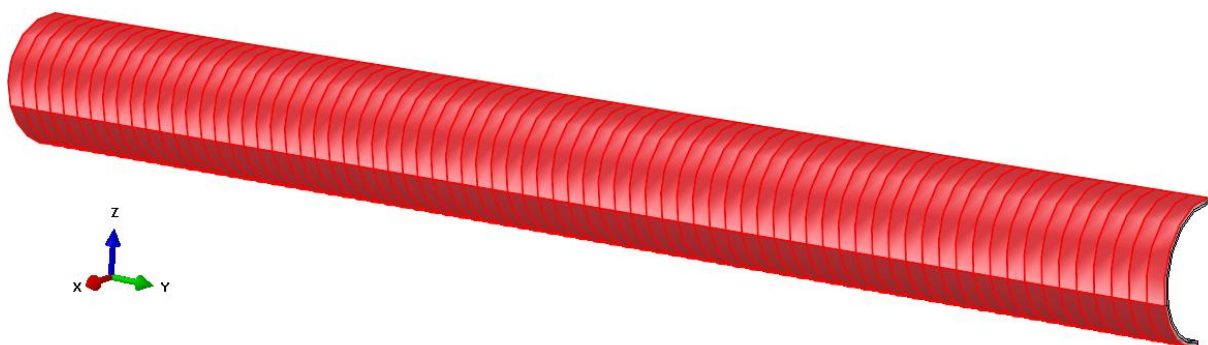


Figura A.12. Área de contato entre o concreto projetado e o maciço.

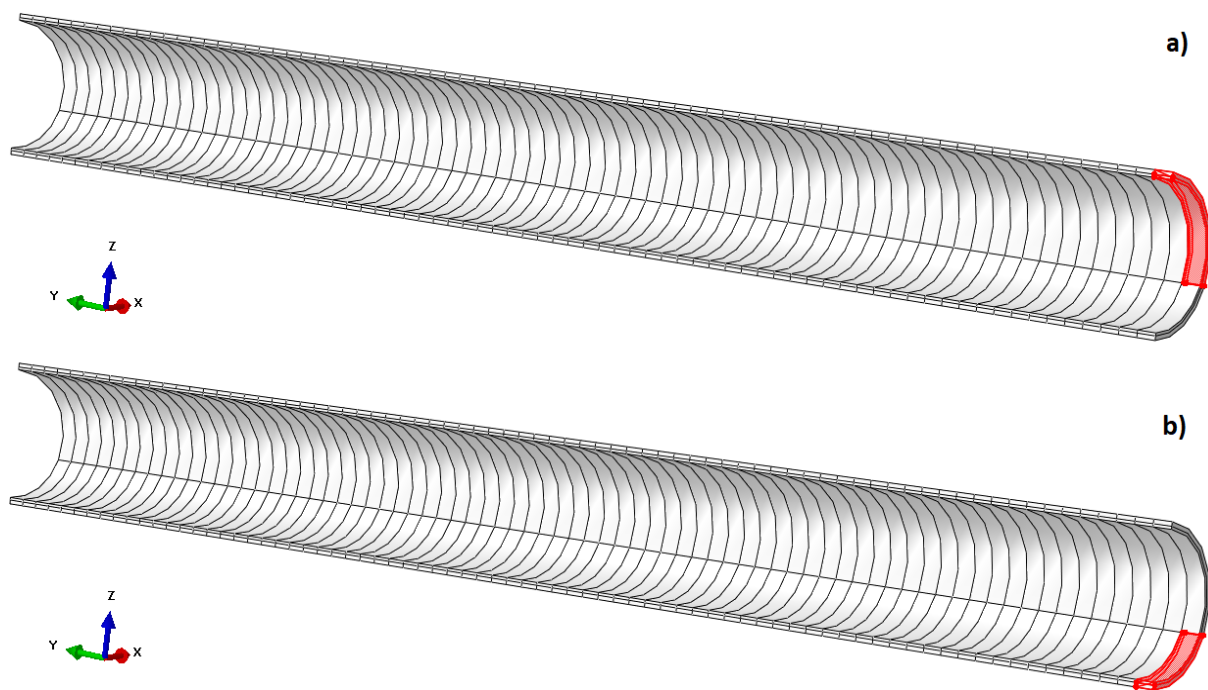


Figura A.13. Exemplo de *Sets* para inclusão parcial do concreto projetado e da camada de sacrifício: a) Ilustração do *Set* a ser acionado na escavação da primeira calota; e (b Ilustração do *Set* a ser acionado na escavação do primeiro arco invertido.

Com relação ao edifício, as figuras abaixo destacam outros *Sets* de destaque.

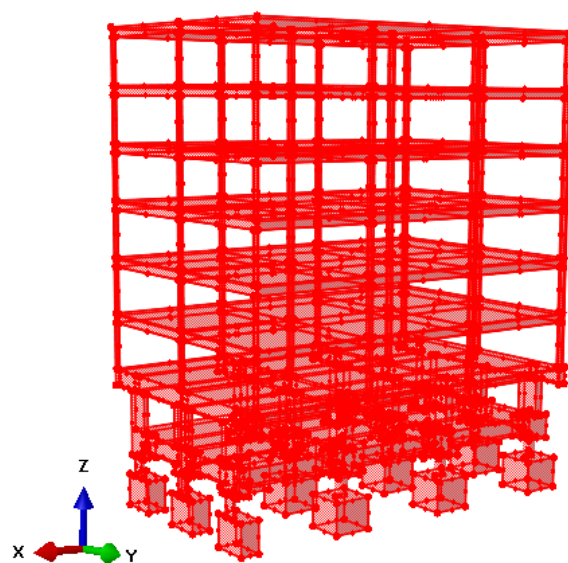


Figura A.14. *Set* atribuído ao edifício completo.

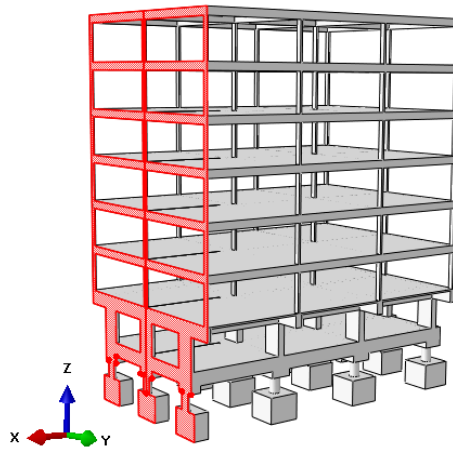


Figura A.15. *Sets* para as condições de contorno do edifício: faces impedidas de deslocar no Eixo X.

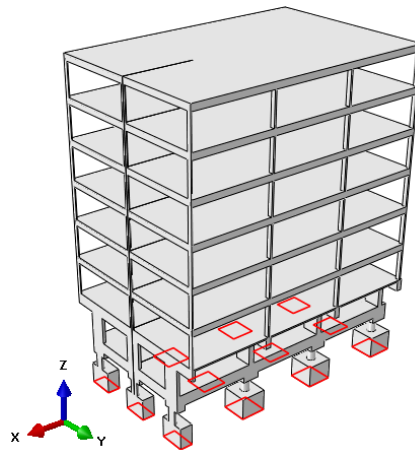


Figura A.16. *Set* atribuído para a base dos elementos de fundação do edifício.

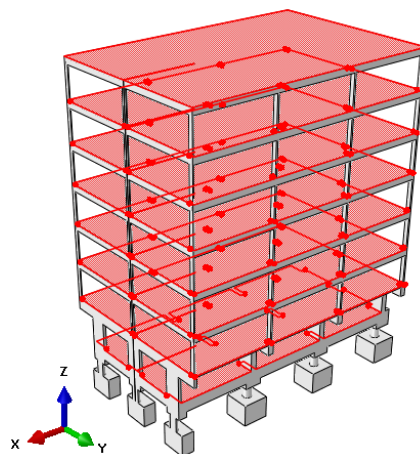


Figura A.17. *Set* atribuído para as lajes do edifício submetidas ao carregamento.

Para a *Part 3* “Maciço”, as figuras abaixo ilustram os *Sets* destacados.

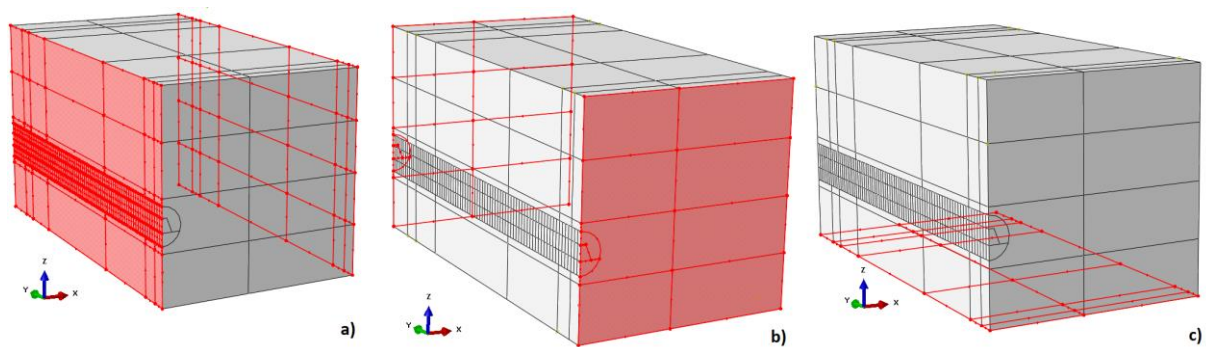


Figura A.18. *Sets* para as condições de contorno do maciço: a) faces impedidas de deslocar no Eixo X; b) faces impedidas de deslocar no Eixo Y; e c) face engastada.

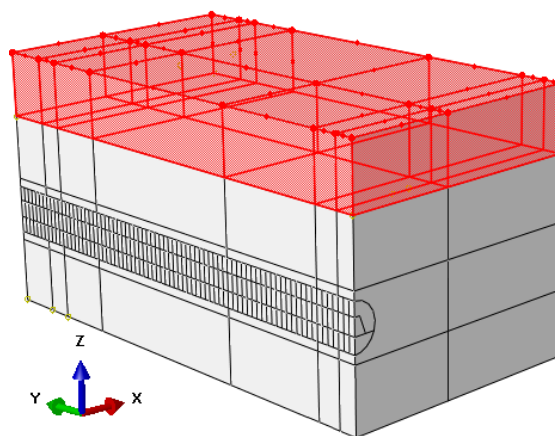


Figura A.19. Exemplo de *Set* atribuído ao Horizonte 1 do maciço.

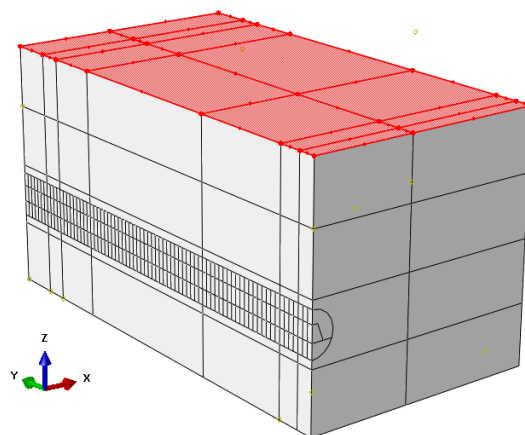


Figura A.20. *Set* atribuído à superfície do maciço que terá contato com o edifício.

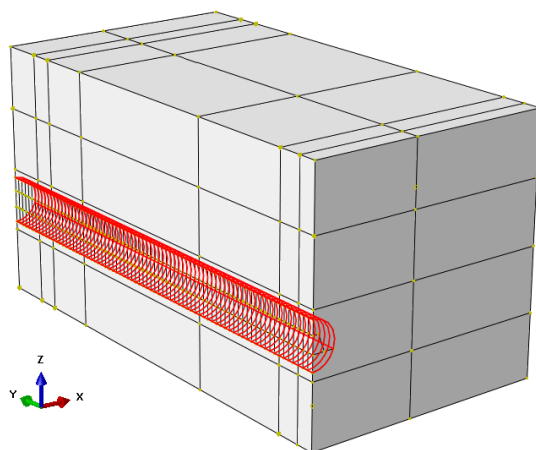


Figura A.21. *Set* do maciço para o contato com o concreto projetado.

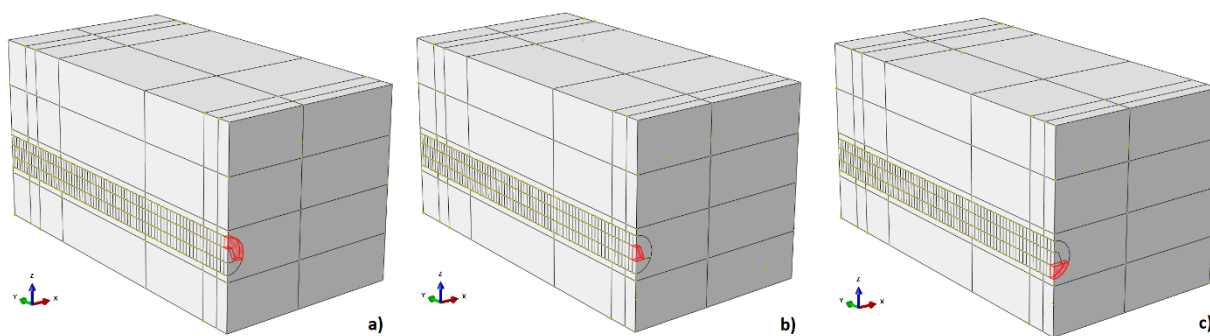


Figura A.22. Exemplo dos *Sets* atribuídos à escavação parcializada do maciço: a) escavação da primeira calota; b) escavação do primeiro núcleo; e c) escavação do primeiro arco invertido.

Dentre outros caminhos alternativos para seleção e inclusão das regiões supracitadas, foi utilizado o menu lateral do programa na matriz de cada *Part*. Na Figura A.23 é ilustrado a ferramenta de inclusão dos *Sets* e *Surfaces* utilizados nessa tese.

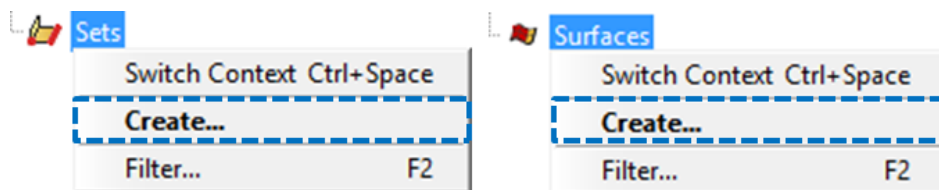


Figura A.23. Opções para criação de *Sets* e *Surfaces*.

De maneira análoga ao exposto para as *Parts*, os *Sets* e *Surfaces*, assim como outras funcionalidades, apresentam seu próprio gerenciador de alterações. Esses gerenciadores podem ser acessados a qualquer momento e auxiliar na edição e ajustes que forem necessários.

A.2.2 PROPRIEDADES DO MODELO

O módulo *Property* disponibiliza as ferramentas para o usuário definir os modelos constitutivos dos materiais, as seções geométricas ligadas à rigidez e, por fim, a função de correlacionar os materiais e as geometrias pré-estabelecidas nos *Sets* (vide Seção A.2.1). Na Figura A.24 é exposto como o programa disponibiliza as funções para o usuário definir o modelo constitutivo que deseja utilizar.

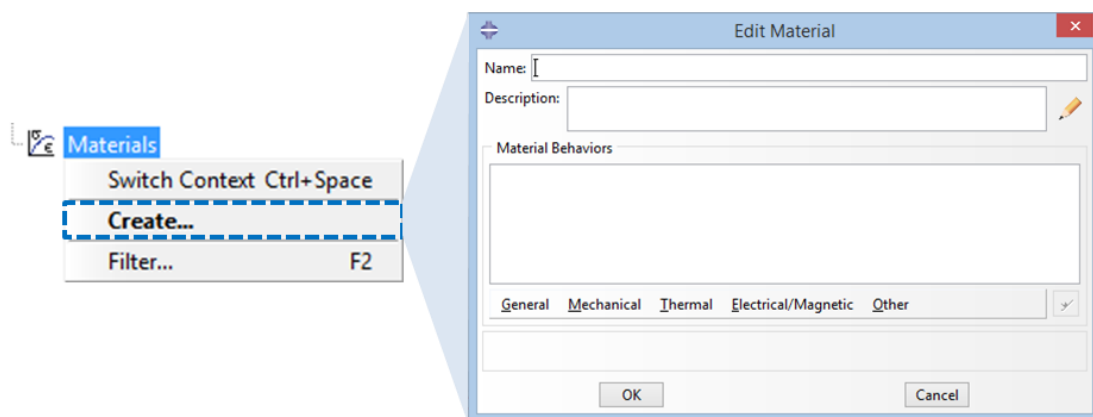


Figura A.24. Opções para atribuição do modelo constitutivo ao material.

Na presente pesquisa, por ser um estudo de caso hipotético, os parâmetros foram estimados e são apresentados na Seção 6.1.1.

O ABAQUS® não adota um padrão para as unidades de medida que são atribuídas a cada parâmetro. Por esse motivo, o usuário deve ser encarregado de uniformizar os dados de entrada. Nessa pesquisa foi utilizado o Sistema Internacional de Unidades (SI). De forma ilustrativa, na Figura A.25 apresentam-se as possibilidades de inserção dos parâmetros geotécnicos para o modelo de Mohr Coulomb em uma camada estratigráfica.

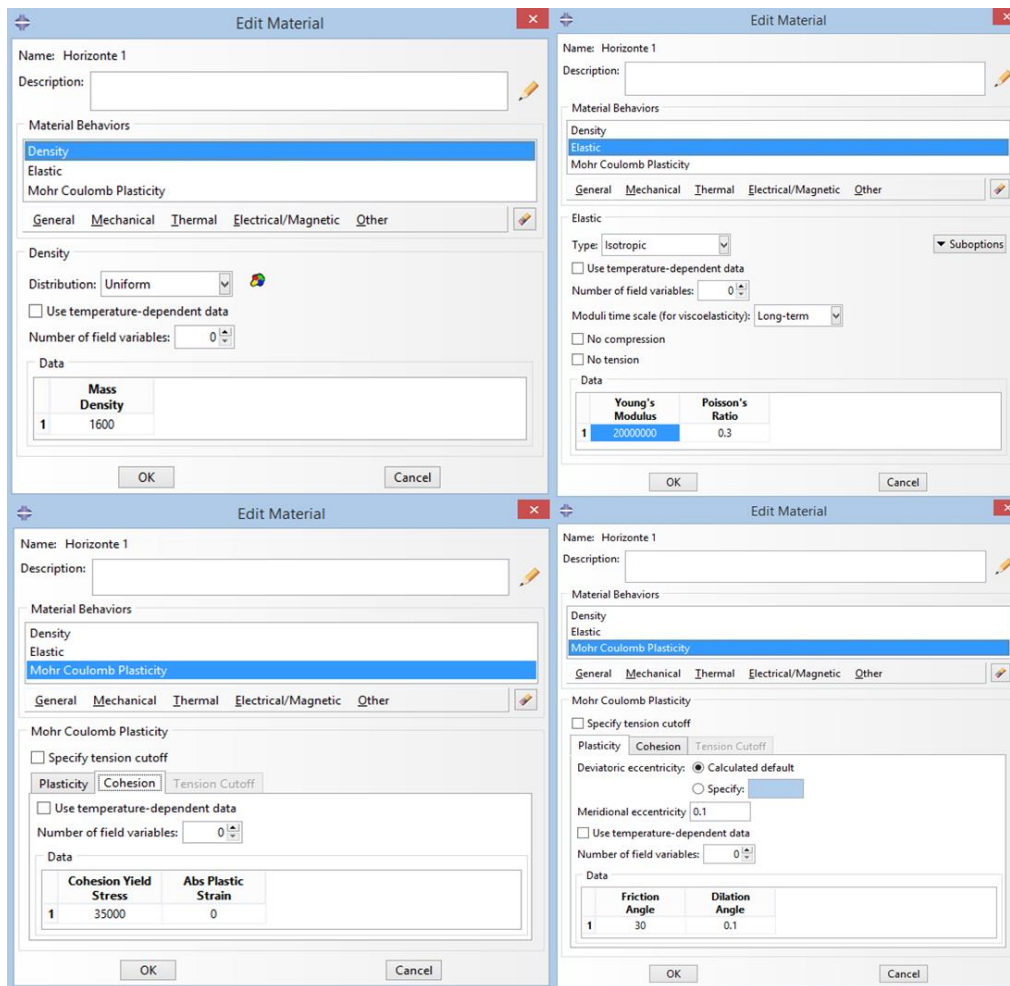


Figura A.25. Exemplo de atribuição das propriedades para um material com o comportamento guiado pelo modelo de Mohr Coulomb.

Para cada material deverá ser definida uma seção e, nesse modelo, foi atribuída uma condição de sólido homogêneo. Para executar esse passo foi utilizado o comando exposto na Figura A.26 e tem-se como alternativa, no módulo *Property*, o caminho *Section, Create*.

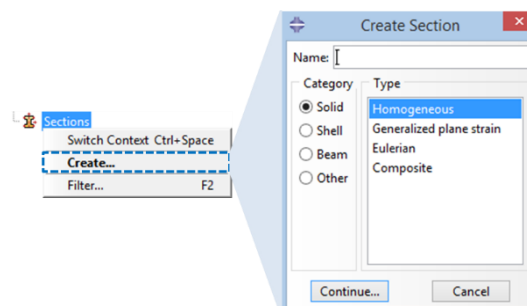


Figura A.26. Atribuição de seção sólida e homogênea aos materiais.

Após essa definição, cada seção foi correlacionada com os *Sets* da geometria do modelo. Na Figura A.27 apresenta-se um exemplo do realizado com o Horizonte 1 do maciço.

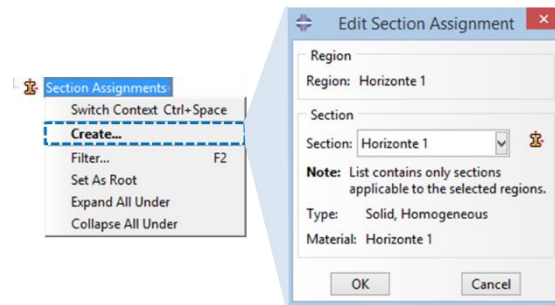


Figura A.27. Atribuição de seção aos *Sets* pré-estabelecidos.

Com a definição dos modelos constitutivos dos materiais, das seções geométricas e a correlação com os *Sets* preestabelecidos, a rotina avançou ao módulo de montagem do modelo.

A.2.3 MONTAGEM DO MODELO

O módulo de montagem do modelo (*Assembly*) disponibiliza as ferramentas para o usuário definir os arranjos geométricos das partes que foram importadas (Seção A.2.1). Como as três partes já foram importadas do CAD com compatibilidade no posicionamento no espaço, a montagem fica simplificada. Na Figura A.28 é ilustrada a criação do modelo com a combinação das três diferentes *Parts*. Uma opção alternativa, no módulo *Assembly*, é o caminho *Instance, Create*.

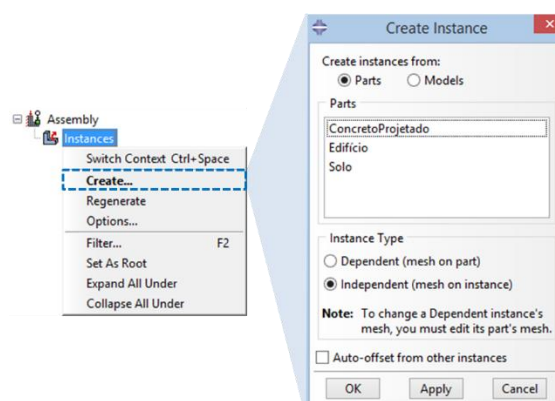


Figura A.28. Montagem do modelo no módulo *Assembly*.

As três *Parts* foram criadas com malhas independentes, conforme ilustrado na Figura A.28. Nessa etapa é importante certificar-se do posicionamento e orientação do Eixo XYZ e, para o modelo em questão, essa definição é evidenciada na Figura A.5.

A.2.4 PASSOS CONSTRUTIVOS

O módulo *Step* disponibiliza as ferramentas para o usuário definir as ações em tempos distintos. É nesse momento que foi realizada a concepção da escavação parcializada. Para a criação de cada passo construtivo foi realizada a ação ilustrada na Figura A.29. O *Step 2* “Geoestático” foi o único a receber a condição *Geostatic*, uma vez que os demais foram criados como *Static General*.

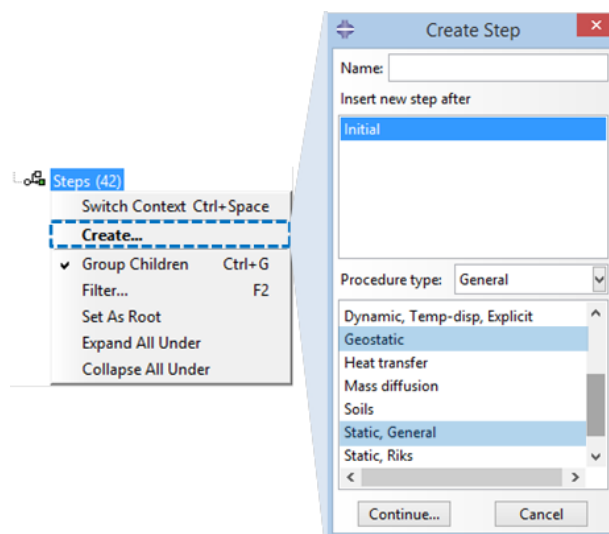


Figura A.29. Criação de um novo passo construtivo com destaque aos tipos *Geostatic* e *Static General*.

Para facilitar o entendimento da subdivisão da escavação do túnel, na Figura A.30 são ilustradas as 264 partições de escavação do túnel, dentro das 88 seções transversais. Ao total, o modelo inicial inclui 443 passos de escavação porque tanto a calota quanto o arco invertido têm que ser executados em duas etapas distintas para utilização da camada de sacrifício (Seção 6.3.1). Ademais, há três passos iniciais para inclusão de: condições de contorno, condição geoestática e carregamento externos.

	ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5	ST 6	ST 7	ST 8	ST 9	ST 10	...	ST 79	ST 80	ST 81	ST 82	ST 83	ST 84	ST 85	ST 86	ST 87	ST 88	
EMBOQUE	P1	P2	P4	P6	P8	P11	P14	P17	P20	P23	...	P230	P233	P236	P239	P242	P245	P248	P251	P254	P257	DESEMBOQUE
	P3	P5	P7	P10	P13	P16	P19	P22	P25	P28	...	P235	P238	P241	P244	P247	P250	P253	P256	P259	P261	
	P9	P12	P15	P18	P21	P24	P27	P30	P33	P36	...	P243	P246	P249	P252	P255	P258	P260	P262	P263	P264	

Figura A.30. Ilustração das 264 partições (P) de escavação do túnel, dentro das 88 seções transversais (ST).

Na Figura A.30 é possível notar que os avanços da calota podem ser duplos e alcançar um balanço de 3,0 m (Figura A.4). O núcleo pode atingir até três passos à frente do arco invertido, totalizando uma distância de 4,5 m. Com essa sequência de escavação definida, o modelo foi subdividido em 443 passos distintos, são eles:

- *Step 1* “Inicial”
 - Atribuir o contato entre tubulão e o solo (Seção A.2.5);
 - Definir as condições geoestáticas (Figura A.31);
 - Definir as condições de contorno do modelo (Seção A.2.1).
- *Step 2* “Geoestático” - *Geostatic*
 - Definir a ação da gravidade (Seção A.2.6);
 - Desativar a *Part* de Concreto Projetado (Figura A.10);
 - Desativar a *Part* do Edifício (Figura A.14).
- *Step 3* “Carregamento” – *Static, General*
 - Ativar a *Part* do Edifício (Figura A.14);
 - Incluir carregamentos nas lajes do Edifício (Seção A.2.6).
- *Step 4* ao 443 “Escavações” (Figura A.30) – *Static, General*
 - Desativar *Set* do maciço para a escavação parcializada e incluir camada de sacrifício, quando for calota ou arco invertido (Figura A.22);
 - Desativar *Set* da camada de sacrifício utilizada no passo anterior e incluir novas camadas de concreto projetado e sacrifício (Figura A.13).

A condição geoestática apresentada na Tabela A.2 está relacionada à geometria do modelo (Figura A.5) e as propriedades dos materiais. Ressalta-se a importância de estabelecer um marco para o Ponto (0,0,0) que seja conhecido e de fácil localização.

Tabela A.2. Resumo da condição geoestática

Estratigrafia	Peso Específico (N/m ³)	Gravidade (m/s ²)	Coordenada vertical (m)		Tensão (Pa)		Coeficiente lateral X, Y
			Topo	Base	Topo	Base	
Horizonte 1	17.000	9,81	0	-15	0	250.155	0,50
Horizonte 2	19.000		-15	-30	250.155	529.740	
Horizonte 3	21.000		-30	-45	529.740	838.755	
Horizonte 4	21.000		-45	-60	838.755	1.147.770	

No programa, os dados apresentados na Tabela A.2 são atribuídos de acordo com o caminho exemplificado na Figura A.31.

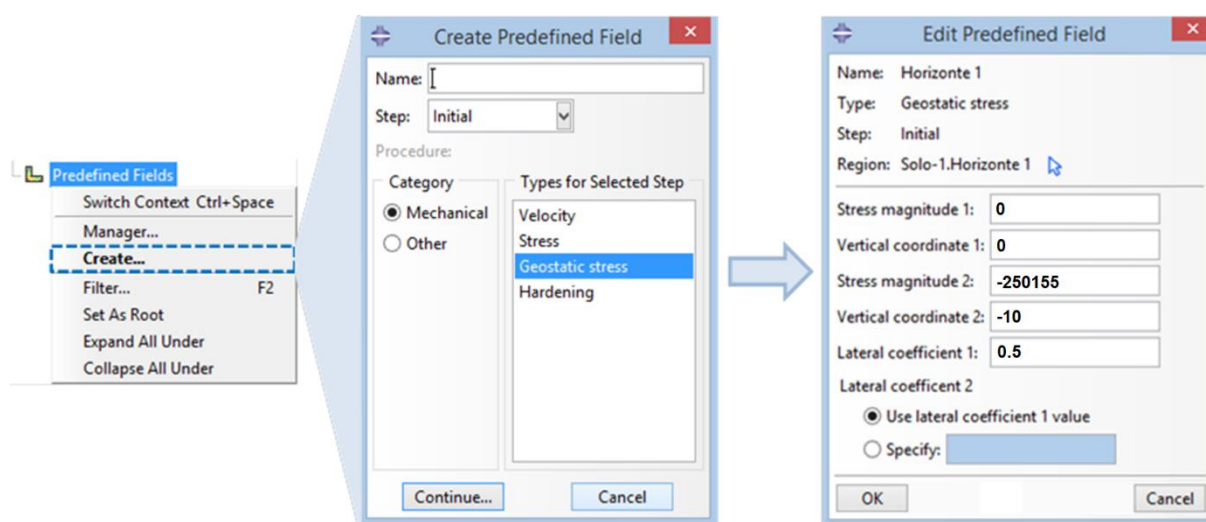


Figura A.31. Exemplo de atribuição das condições geoestáticas ao Horizonte 1.

Após a definição dos passos construtivos, o programa avança para as interações entre as diferentes *Parts* importadas (Seção A.2.1) e unidas na montagem (Seção A.2.3).

A.2.5 INTERAÇÕES

O módulo *Interaction* disponibiliza as ferramentas para o usuário definir as leis de contato entre as diferentes *Parts*. Para o caso em questão, a interação entre “solo-concreto projetado” e “solo-edifício”, tiveram duas relações distintas.

O concreto projetado foi considerado fixado ao maciço por um contato denominado *Tie* (Figura A.32). Nesse caso, a parede do solo (Figura A.21) foi considerada como superfície *Master* e o concreto projetado (Figura A.12) como *Slave*.

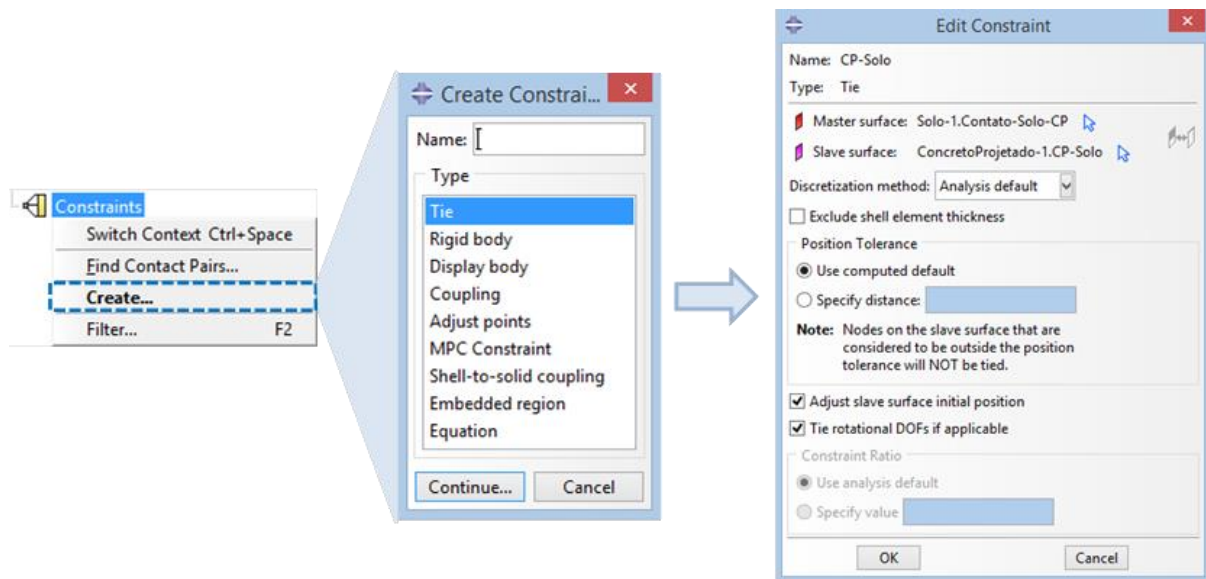


Figura A.32. Contato entre o concreto projetado e o maciço.

No caso da interação entre o edifício e o maciço, a relação foi efetuada por meio de uma função de comportamento mecânico tangencial e normal, em *Interaction Properties* (Figura A.33).

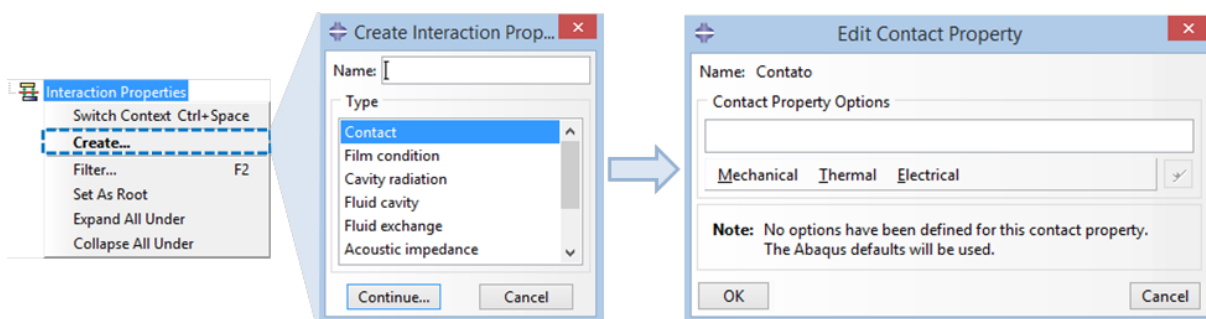


Figura A.33. Contato entre o edifício e o maciço.

Para adição da função de comportamento mecânico tangencial, utilizou-se uma *Friction Formulation – Penalty* com um coeficiente de atrito igual a 0,39 (Figura A.34).

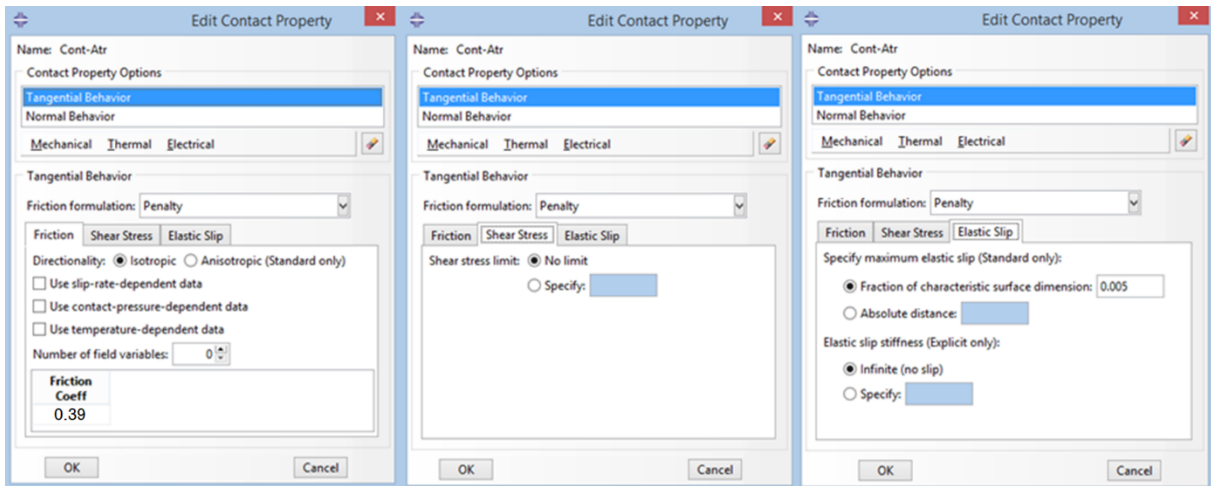


Figura A.34. Comportamento tangencial para o contato entre o edifício e o maciço.

Em complemento ao comportamento tangencial, utilizou-se uma formulação de comportamento mecânico normal (Figura A.35).

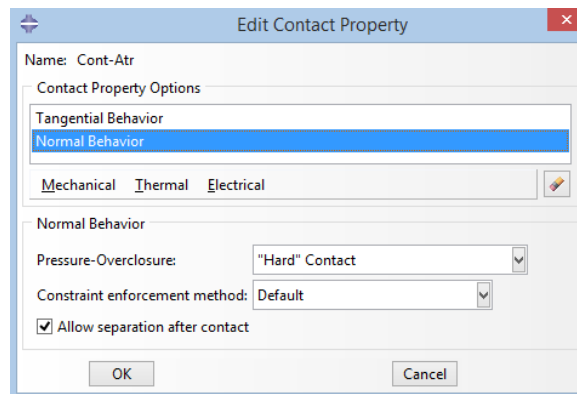


Figura A.35. Comportamento normal para o contato entre o edifício e o maciço.

Essa interação entre o edifício e o maciço foi adicionada ao *Step 1 "Initial"* na guia de *Interaction* (Figura A.36).

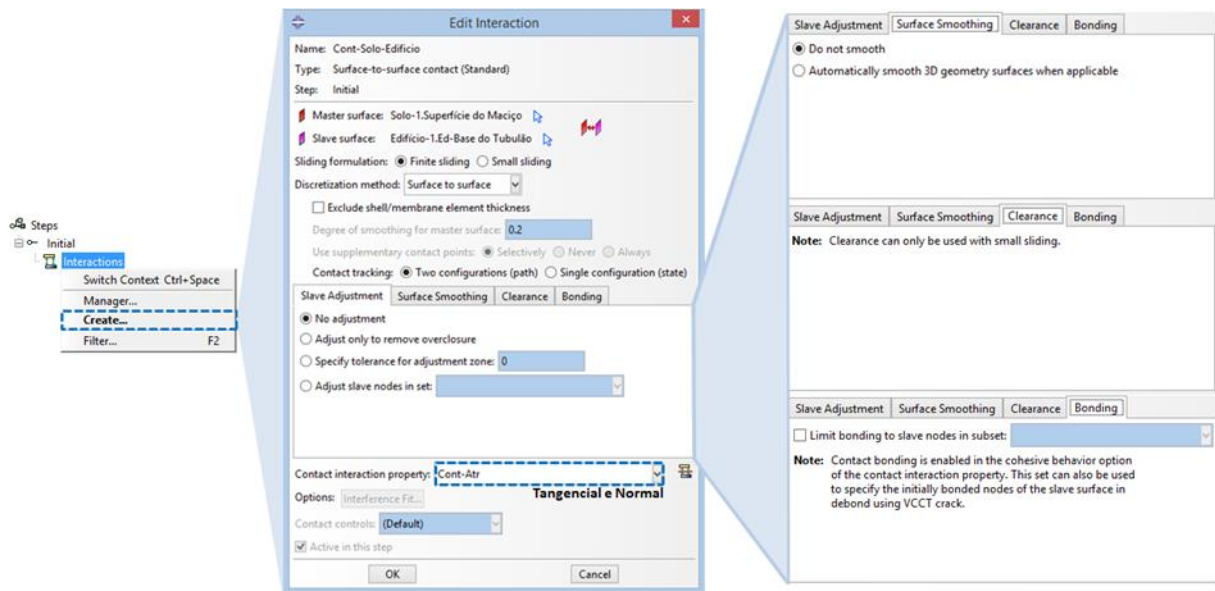


Figura A.36. Adição da interação no Step 1 “Initial”.

A.2.6 CARREGAMENTOS

O módulo *Load* disponibiliza as ferramentas para o usuário definir os carregamentos que serão impostos e as restrições de movimento do modelo. Primeiramente, no Step 2 “Geoestático” (vide Seção A.2.4), foi incluída a gravidade com magnitude de $9,81 \text{ m/s}^2$ (Figura A.37). Essa força é atuante em todo o modelo e foi aplicada ao Componente 3, ou seja, ao Eixo Z.

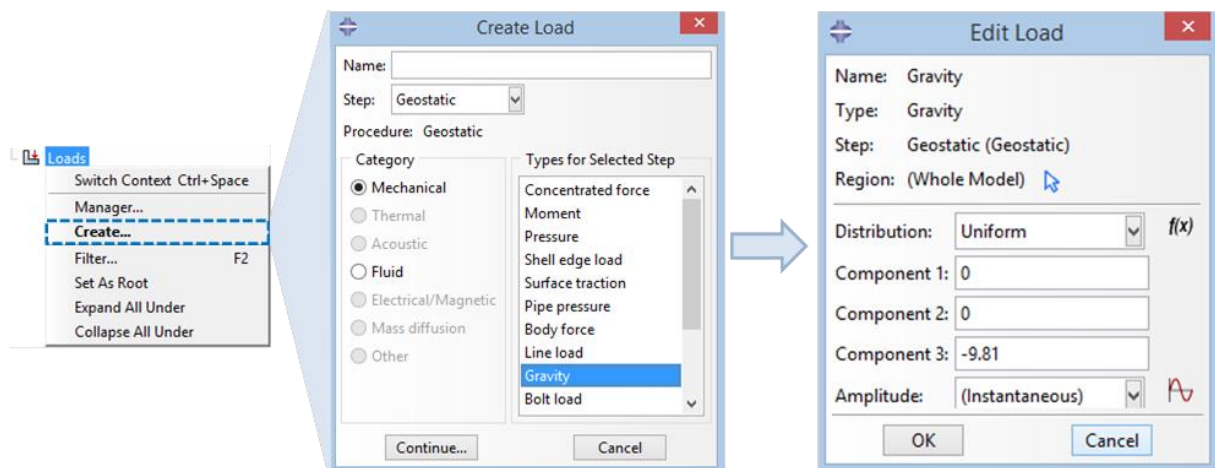


Figura A.37. Definição da atuação da gravidade.

Ainda relacionado ao carregamento, mas já no *Step 3* “Carregamento” (vide Seção A.2.4), foi definida a aplicação de uma carga do tipo *Pressure* de 1.000 Pa sobre as lajes do edifício (Figura A.17), incluindo o térreo. Na Figura A.38 é exemplificada essa operação no ABAQUS®.

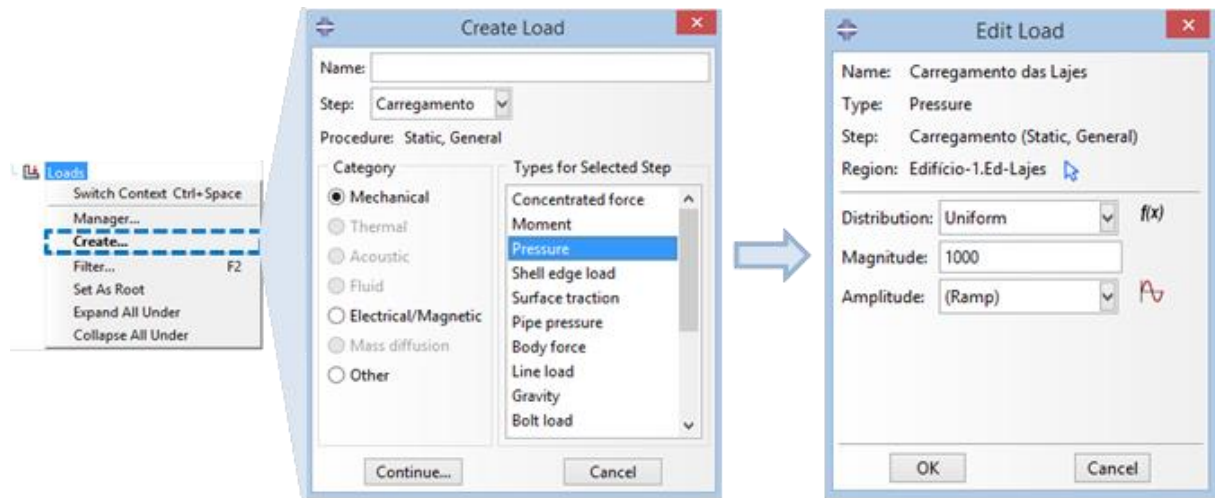


Figura A.38. Aplicação de 1.000 Pa nas lajes do edifício.

Durante as operações desse módulo, é possível certifica-se de que os esforços correspondem à ação desejada, conforme ilustrado na Figura A.39.

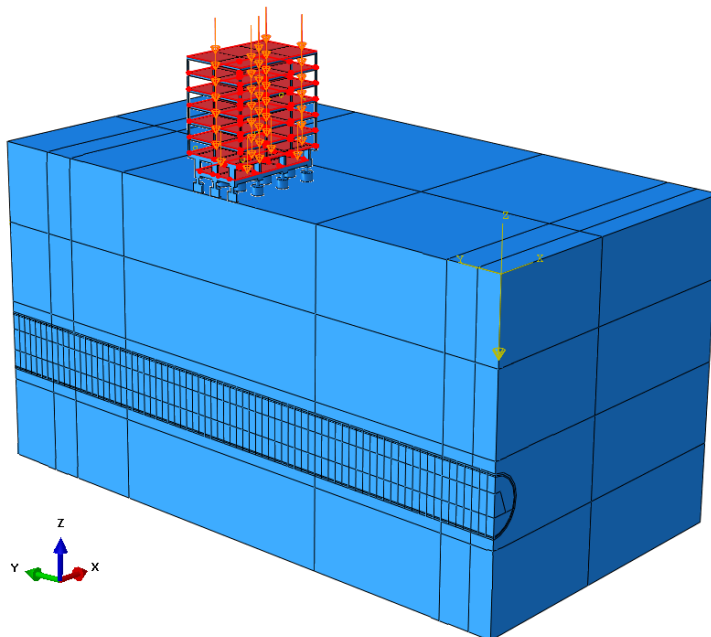


Figura A.39. Ilustração dos carregamentos impostos ao modelo.

Com relação às restrições de movimento nas fronteiras, as *Boundary Conditions (BCs)* foram incluídas no modelo de acordo com o procedimento exposto na Figura A.40.

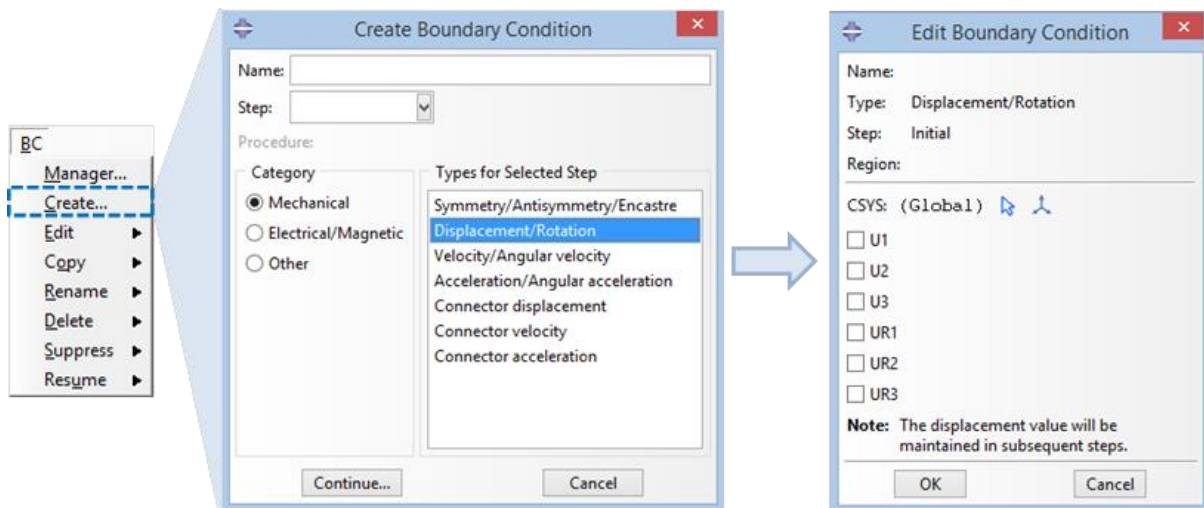


Figura A.40. Definição das restrições de deslocamento e rotação nas fronteiras.

Na descrição das *Parts* e dos *Sets*, na Seção A.2.1, são detalhadas as faces restritas a deslocamentos e/ou rotações no modelo proposto. Destaca-se que o programa utiliza a letra “U” para os deslocamentos e “R” para as rotações. Com relação aos números, o 1 representa o Eixo X, 2 o Eixo Y e 3 é o Eixo Z.

A.2.7 MALHA

O módulo *Mesh* disponibiliza as ferramentas para o usuário definir como deseja atribuir e refinar a malha do modelo. Em um primeiro momento, com o intuito de obter uma análise preliminar sobre a escavação do túnel, a geometria se limita as subdivisões apresentadas na Seção A.1. De qualquer forma, ressalta-se que a malha é objeto de otimização discutido na Seção A.3.2.

Para definir as formas dos elementos que foram utilizados no modelo, foi adotado o procedimento ilustrado na Figura A.41. Destaca-se que foi adotada uma malha hexaédrica para o concreto projetado e camada de sacrifício e uma outra tetraédrica para o maciço e o edifício.

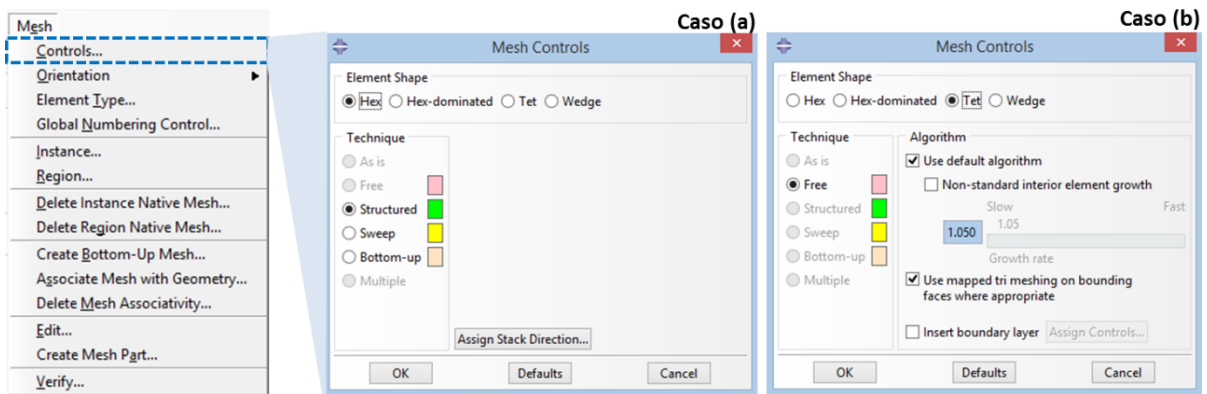


Figura A.41. Formas dos elementos adotados na simulação inicial: (a) elementos hexaédricos ao concreto projetado e a camada de sacrifício; e (b) elementos tetraédricos atribuídos adotados maciço e edifício.

Na definição do tipo de elemento, a Figura A.41 apresenta as escolhas atribuídas aos elementos hexaédricos e tetraédricos.

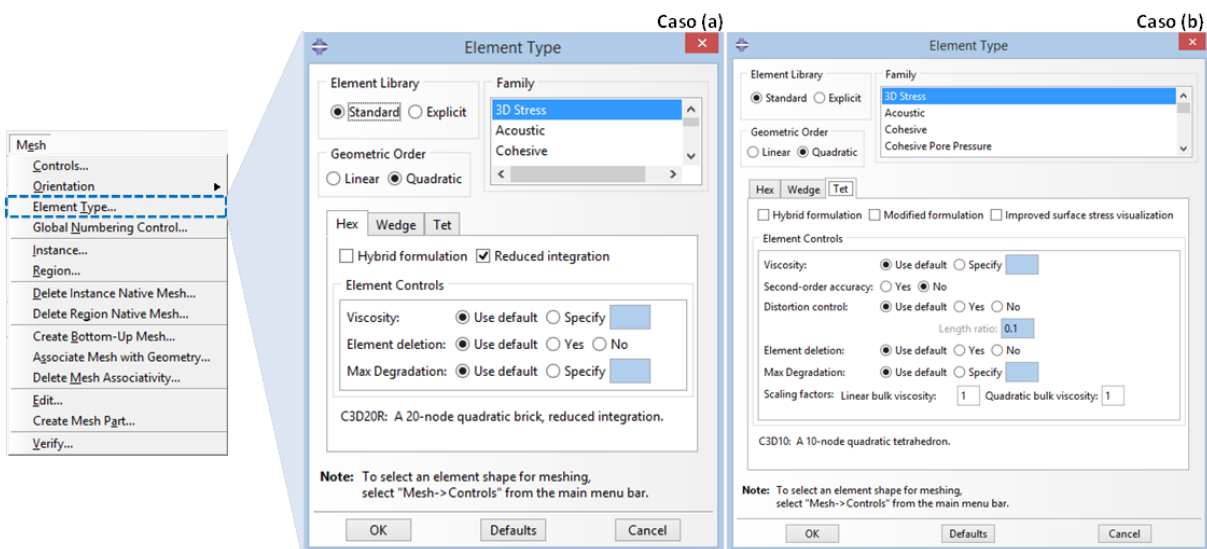


Figura A.42. Características atribuídas aos elementos: (a) elementos hexaédricos; e (b) elementos tetraédricos.

Finalizadas as definições supracitadas, prosseguiu-se para a atribuição dos tamanhos dos elementos. Conforme ilustrado na Figura A.43, o programa prevê a opção de controlar o

tamanho das partes da geometria ou seguir em função de arestas pré-determinadas. Para o caso inicialmente proposto, optou-se pela determinação dos tamanhos globais das partes.

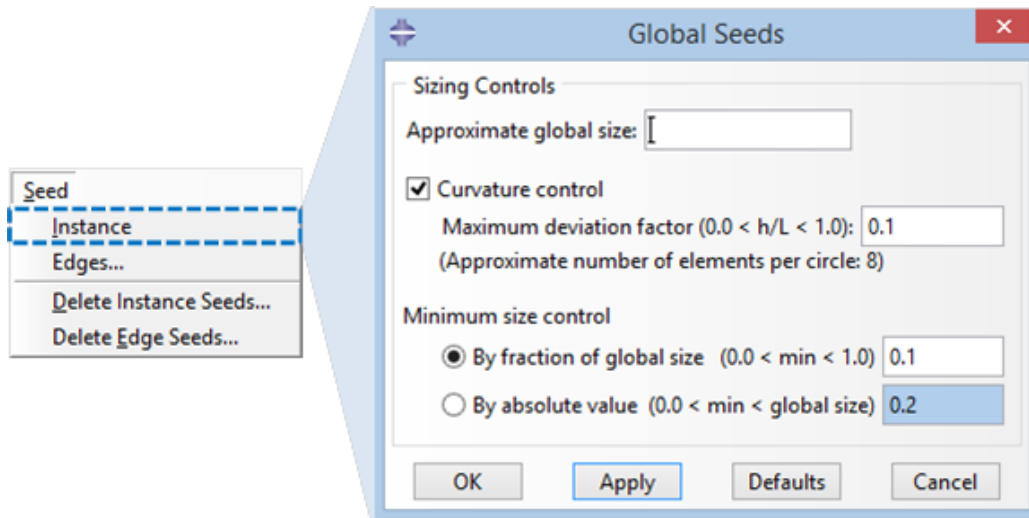


Figura A.43. Definição do tamanho global dos elementos geométricos.

Na Seção A.3.2 foram detalhados os refinamentos da malha para que os resultados tivessem a acurácia desejada. Ainda de forma visual, na Figura A.44 pode-se observar uma perspectiva geral da malha gerada nesse primeiro modelo.

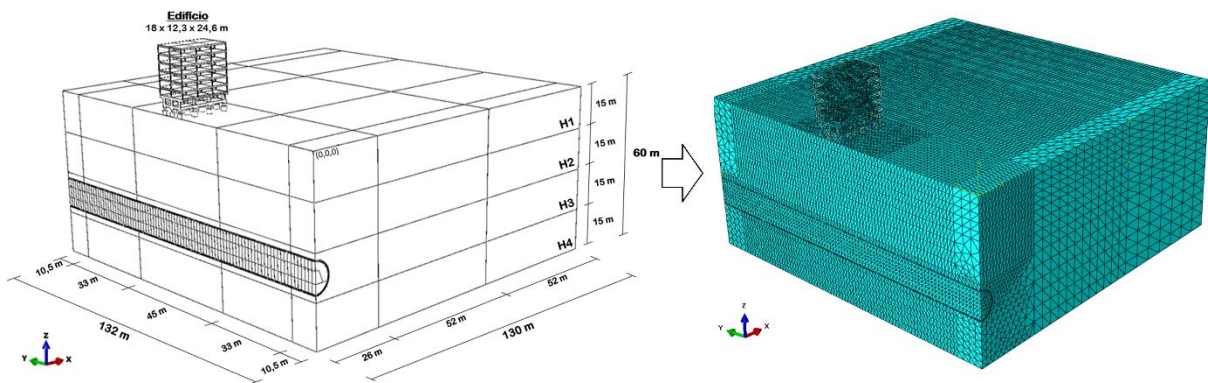


Figura A.44. Visão geral da malha gerada na simulação inicial.

A.2.8 RESOLUÇÃO DO MODELO

O módulo *Job* disponibiliza as ferramentas para o usuário definir as condições de resolução do modelo, detalhado nas seções anteriores. Na Figura A.45 é apresentada a forma como o programa disponibiliza as funções para o usuário.

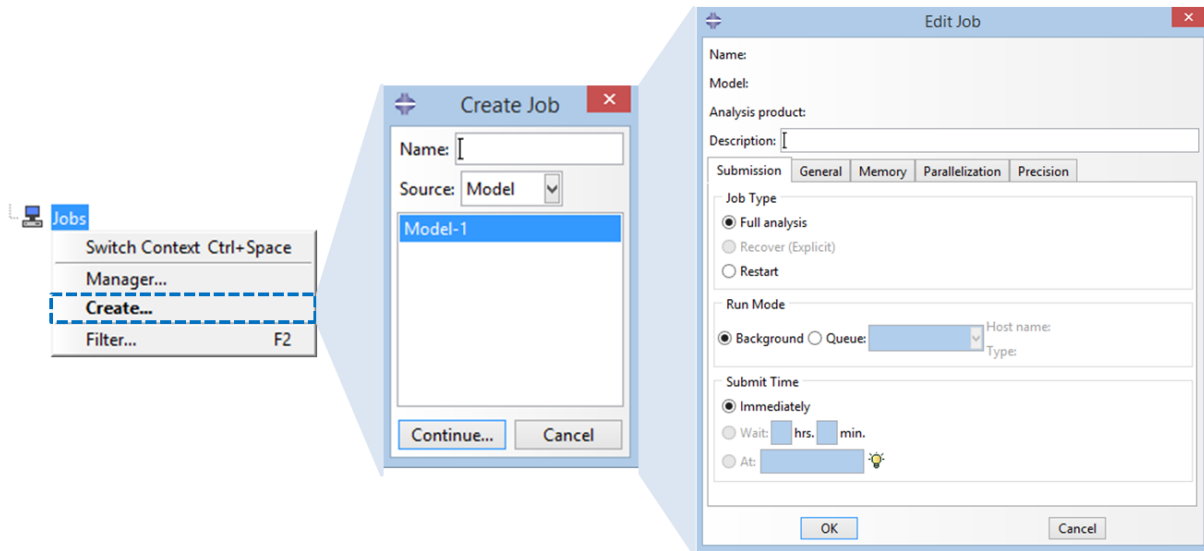


Figura A.45. Atribuição das condições para resolução do modelo.

Além das condições padrões, na aba *Parallelization* foi alterada a função de utilizar múltiplos processadores para o limite de 32 núcleos, imposto pelo computador utilizado. Após a criação do *Job*, o programa prevê as opções ilustradas na Figura A.46.

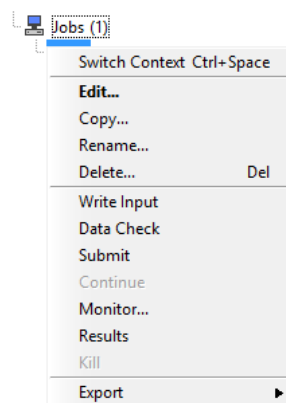


Figura A.46. Opções do *Job* criado.

A opção *Edit* permite alterar as condições impostas na ação detalhada na Figura A.45. A função *Data Check* permite uma verificação prévia do modelo, em um tempo reduzido. A seleção do *Submit* inicia a resolução do modelo. O *Monitor* (Figura A.47) permite verificar a resolução do problema enquanto o *Job* está em andamento ou depois de finalizado. Por fim, o *Results* direciona para a visualização do resultado, detalhada na Seção A.2.9.

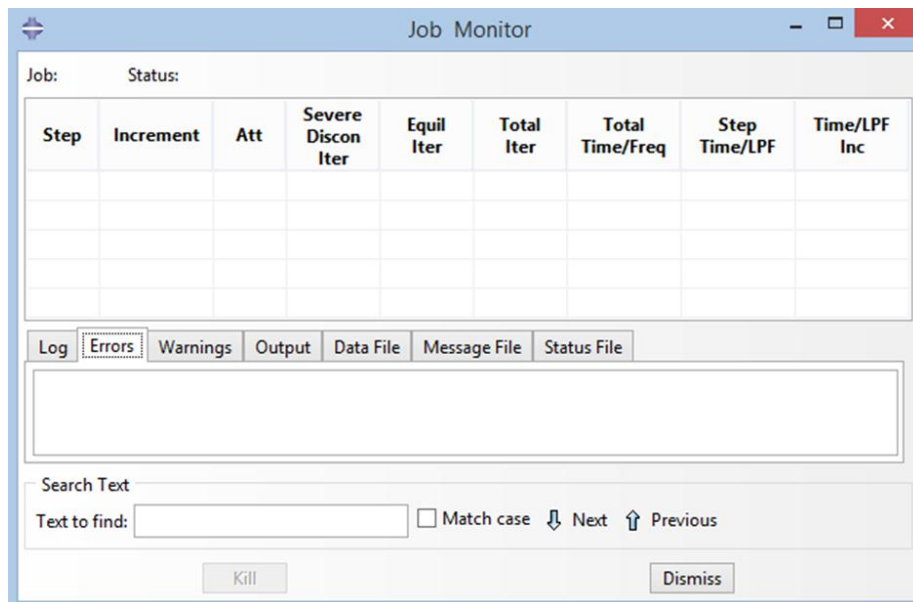


Figura A.47. Função *Monitor* do *Job*.

Caso a resolução tenha problemas, alertas serão descritos na aba *Erros* e *Warnings*. É preciso ficar atento para que essas notificações não estejam impedindo um bom rendimento do modelo ou, até mesmo, acarretando resultados inadequados.

A.2.9 VISUALIZAÇÃO DO RESULTADO

O módulo *Visualization* disponibiliza as ferramentas para o usuário verificar os resultados obtidos no *Job*. Nessa etapa, diversas são as possibilidades de visualização e importação dos resultados. Destaca-se a possibilidade de extrair os dados de pontos de controle em formato de tabela eletrônica, função largamente utilizada na Seção A.3. Assim, essa seção tem o intuito de expor algumas das funções mais utilizadas nesse modelo, entretanto, sem o intuito de abranger todas as possibilidades previstas no programa.

Primeiramente, atenta-se a ferramenta *Field Output* onde o usuário define quais os dados deseja visualizar. Sabendo que o programa utiliza a letra “U” para designar os deslocamentos e “S” para as tensões, na Figura A.48 é apresentada possibilidades de visualização. Apesar disso, ressalta-se que o programa não se limita aos dados de tensão-deslocamento.

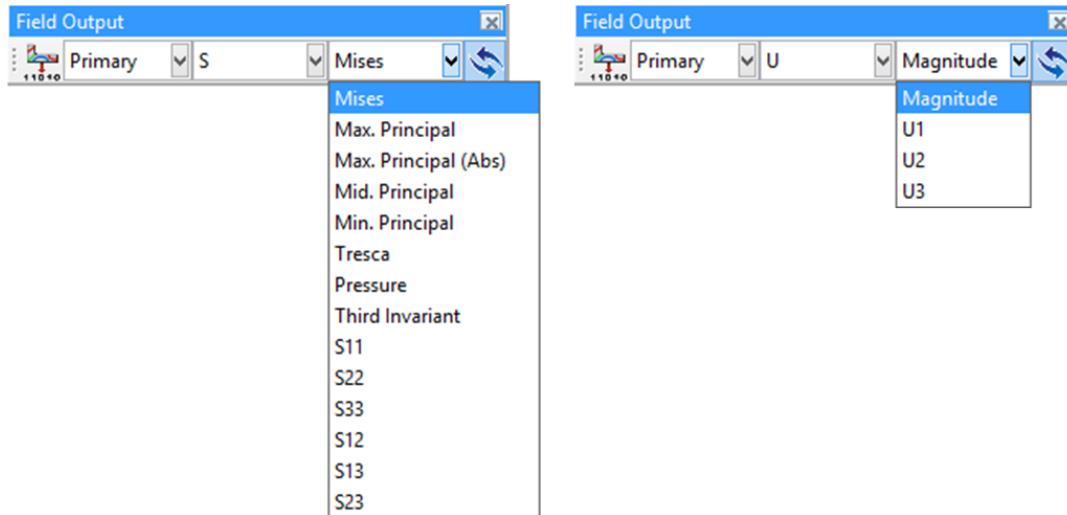


Figura A.48. Opções de visualização dos resultados de tensão-deslocamento.

Definidos os dados que o usuário deseja visualizar, a aba de ferramentas do *Visualization* (Figura A.49) permite a criação de pontos de controle, caminhos de interesse, identificação separada de quaisquer unidades criadas, além de exportar vídeos e imagens.

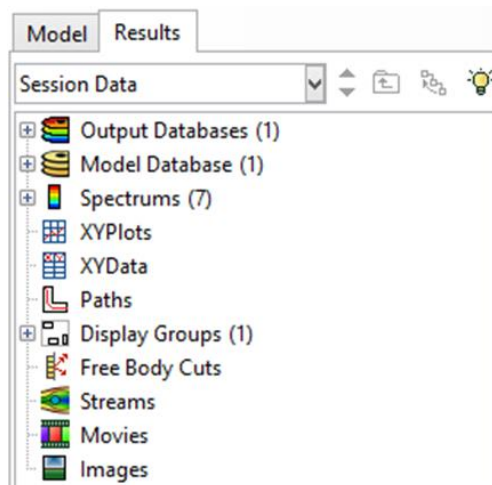


Figura A.49. Aba de ferramentas do módulo *Visualization*.

Nos resultados apresentados nessa tese, foi alterada a cor de fundo para branco seguindo o caminho *View, Graphic Options, Viewport Background, Solid, White*. A depender do desenho que está sendo apresentado, a legenda também foi alterada em *Viewport, Viewport Annotation Options, Legend, Text, Set Font*.

Por ser uma simulação inicial, os resultados de tensão-deslocamento não são discutidos nessa seção. Os dados aqui obtidos foram trabalhados na Seção A.3 com o intuito de otimizar a malha e a geometria. Posteriormente, com o modelo ajustado, é iniciada a análise dos resultados sob uma perspectiva de engenharia.

A.3 OTIMIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO INICIAL

O refinamento da geometria e da malha é importante para as simulações numéricas, especialmente para aferição das influências das bordas e para assegurar-se de que elemento já está com o nível de detalhes suficiente para não interferir na precisão do resultado. Para essa pesquisa, adiciona-se o fato de que será feita uma análise estatística e, por esse motivo, o tempo de processamento também é de suma importância.

Para unificar os dados na etapa de refinamento, todas as simulações apresentadas nessa seção foram executadas no mesmo computador que tem as configurações expostas na Figura A.50.



Figura A.50. Configurações do computador utilizado nas simulações de otimização.

Para permitir a operação do processador de forma ininterrupta, foi adotado como limitante os 128 GB de memória de acesso aleatório (*Random Access Memory*) instalada. Assim, o tempo de processamento de cada simulação pode ser comparado de forma não tendenciosa.

A.3.1 REFINAMENTO DO DOMÍNIO

A geometria inicialmente proposta na Seção A.1 foi avaliada com o intuito de verificar a possibilidade de redução dos limites laterais do modelo (X, Y) ou, eventualmente, a necessidade de aumento. Essa análise é de suma importância para garantir que as restrições de movimento nas bordas não influenciam a acurácia desejada para o resultado.

Recapitulando o relato na Seção A.1, a restrição de deslocamento nos extremos de X e Y está relacionada a uma proporção de 25 vezes o raio do túnel, enquanto o Eixo Z tem uma imposição exclusivamente geomecânica. Por esse motivo, o refinamento foi realizado apenas nas direções X e Y.

Para o Eixo X foram previstos nove caminhos de controle, entre a superfície e o teto do túnel, cada um com 200 pontos equidistantes. Esses caminhos são localizados no centro do plano XZ e estão na direção do Eixo X (Figura A.51). Os 11 caminhos são espaçados em 4 m, atribuindo exceção a primeira e última linha de controle.

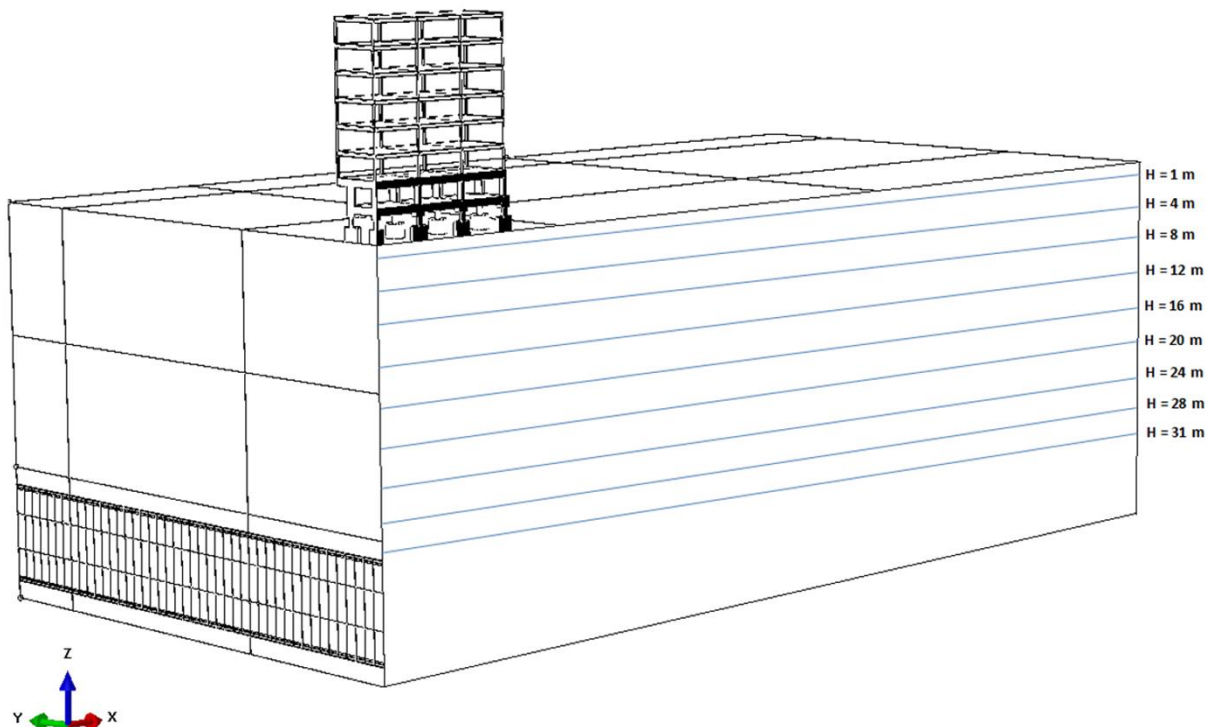


Figura A.51. Caminhos de controle avaliados na direção do Eixo X.

Para verificar a influência das bordas nas tensões máximas principais e nos deslocamentos ao decorrer desses caminhos, foi utilizada a funcionalidade apresentada na Figura A.52 e na Figura A.53.

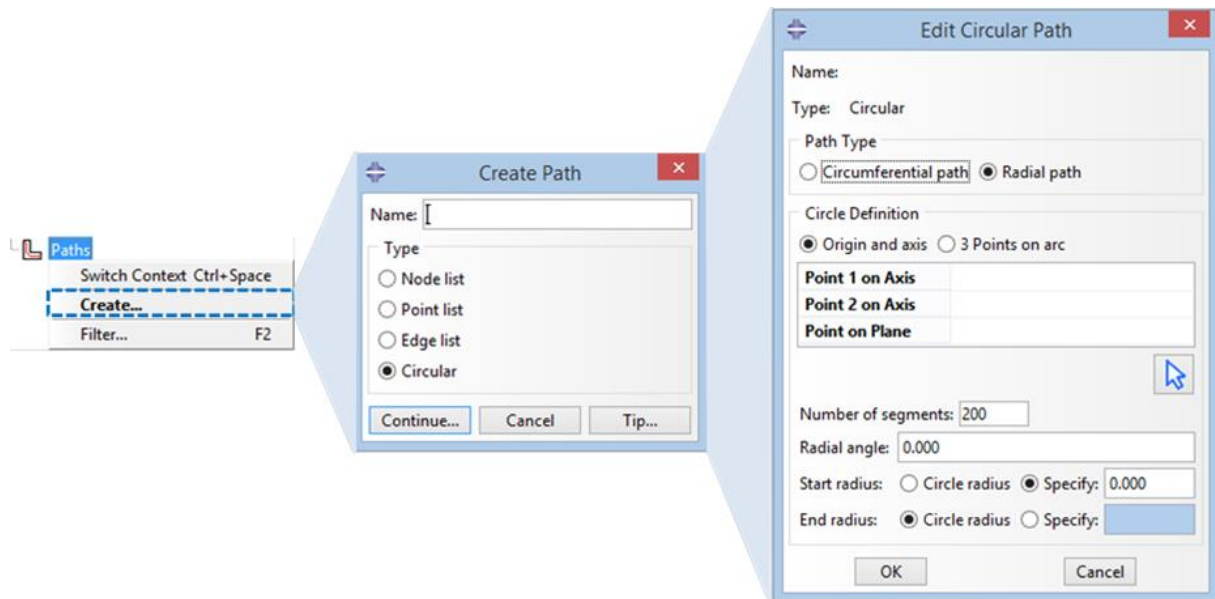


Figura A.52. Criação dos caminhos de controle no Eixo X.

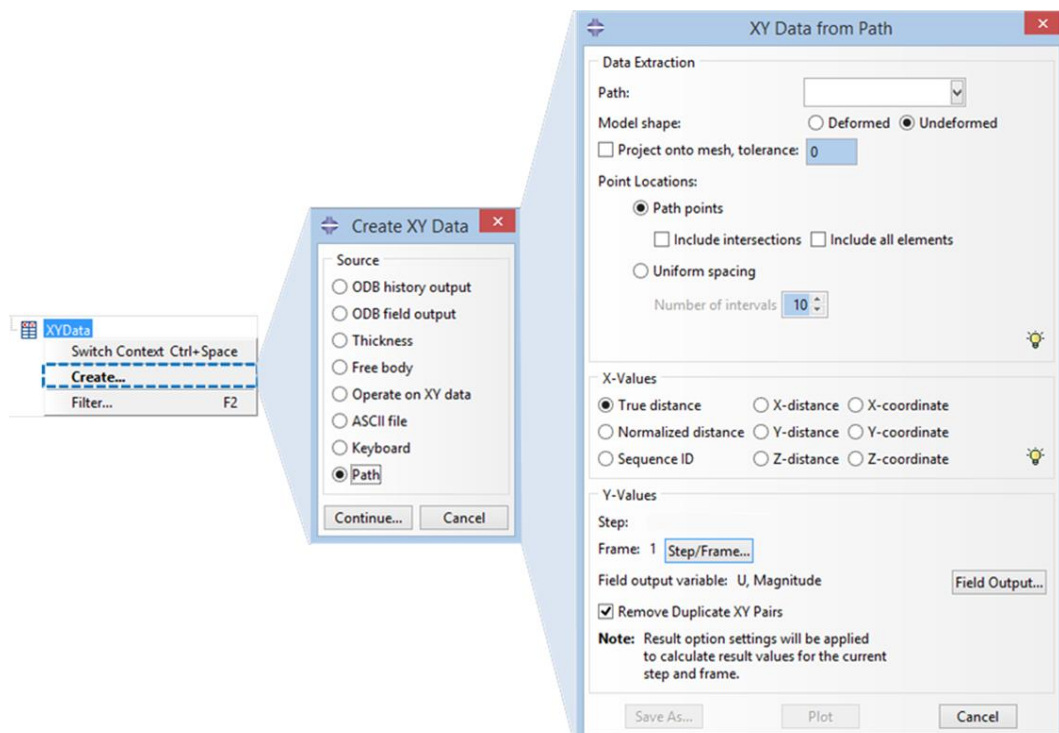


Figura A.53. Obtenção dos resultados de deslocamento para o caminho criado.

Para obter os dados de tensão, o caminho é similar ao supracitado, devendo apenas ser alterada a opção em *Field Output* (Figura A.53). Com o *Path* criado, é possível plotar os dados ou obtê-los no formato de planilha eletrônica (Figura A.54).

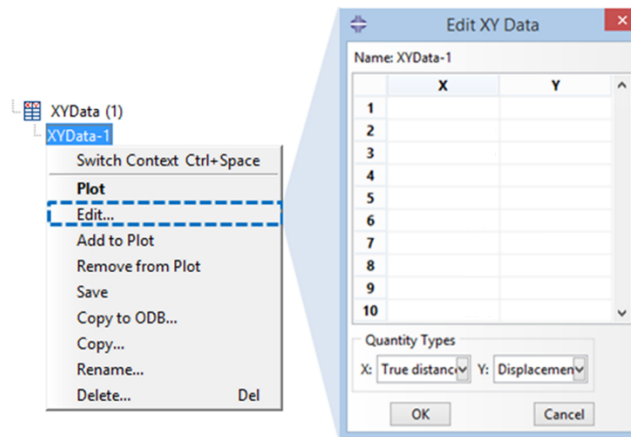


Figura A.54. Exemplo de obtenção dos resultados do *Path* em planilha eletrônica.

Ao importar os dados para o programa *Microsoft Excel*, foi possível detalhar os resultados de deslocamentos (Figura A.55) para o último *Step* de escavação.

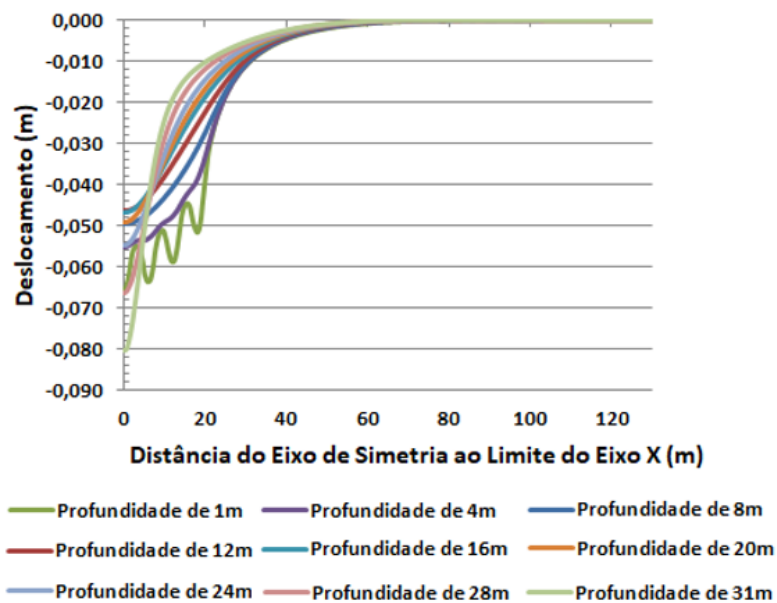


Figura A.55. Deslocamentos ao longo dos caminhos de controle do Eixo X.

O caminho de controle mais próximo da fundação do edifício, com 1 m de profundidade, foi o que teve a convergência crítica, em 59,15 m. Com isso, considerando os parâmetros geotécnicos mais pessimistas, foi possível reduzir a abrangência do Eixo X de 130 m para 60 m.

No Eixo Y a tolerância adotada também foi de 1 mm, entretanto, no atual contexto, essa variação foi relacionada aos passos de escavação e não mais a distância para o contorno. Isso quer dizer que quando a escavação atingir influência maior ou igual a 1 mm em algum dos pontos de controle, o limite deve ser estabelecido como o último passo do arco invertido. Para o controle dessa variação no Eixo Y, foram previstos quatro pontos de interesse localizados nos bordos do edifício (Figura A.56).

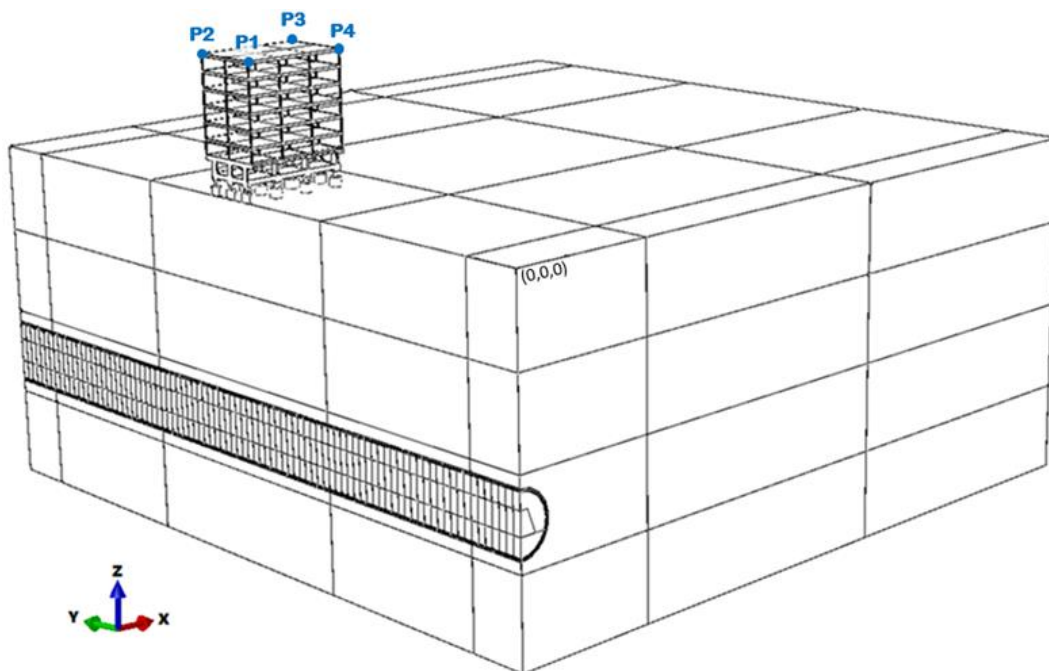


Figura A.56. Pontos de controle atribuídos para otimização do domínio no Eixo Y.

Para criação dos pontos de interesse, o procedimento é exemplificado na Figura A.57. De maneira complementar, a seleção dos pontos foi efetuada pelo caminho *Elements/Nodes, Edit Selection*.

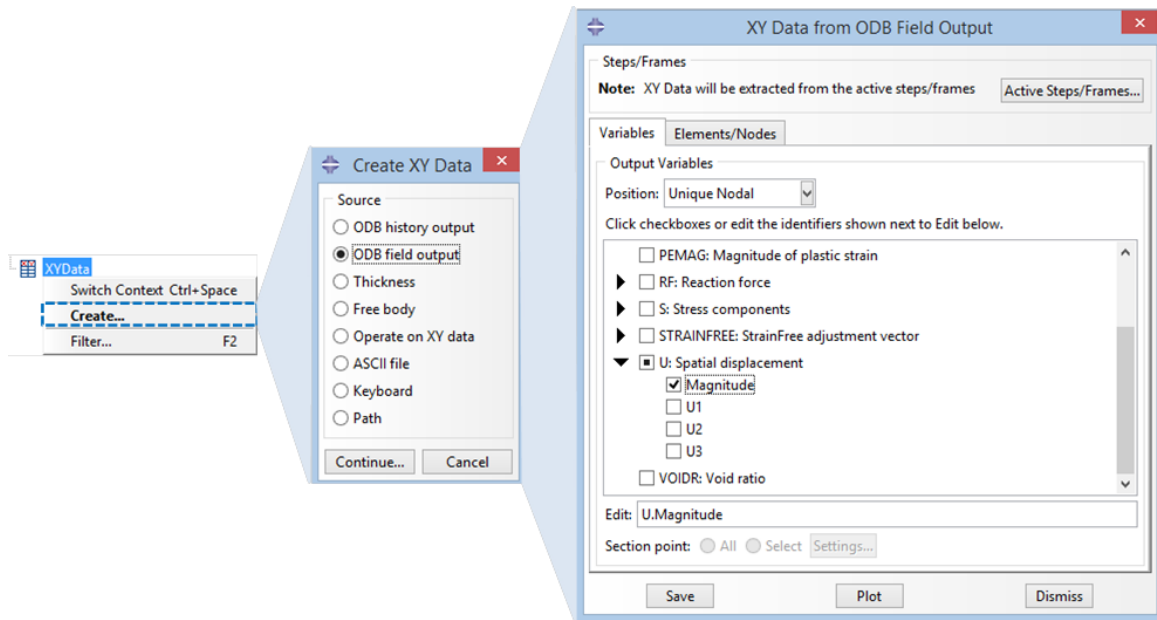


Figura A.57. Criação dos pontos de controle para o Eixo Y.

De maneira análoga a realizada para o Eixo X, foi possível detalhar os resultados de deslocamentos (Figura A.58) para o último *Step* de escavação. Para o Eixo Y, os dados foram analisados em cada um dos 443 *Steps*.

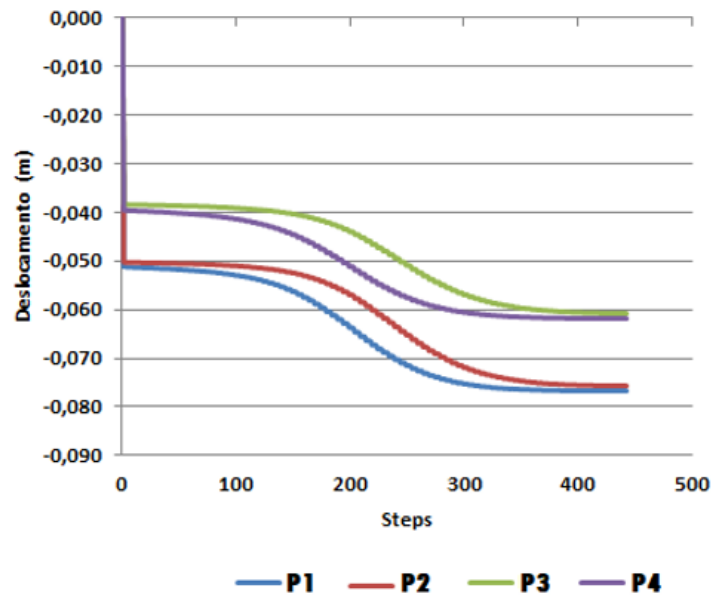


Figura A.58. Deslocamentos ao longo dos pontos de controle do Eixo Y.

Considerando a metodologia proposta, foi possível reduzir a abrangência do Eixo Y de 132 m para 112,5 m. Essa redução também acarretou, conseqüentemente, na alteração de 443 para 378 *steps* a serem calculados pelo modelo. Ademais, este processo considerou a influência do emboque e desemboque, discutida em maiores detalhes na Seção 6.2.2. De maneira ilustrativa, as seções transversais analisadas são expostas na Figura A.59.

ST 1	...	ST 7	ST 8	...	ST 11	ST 12	ST 13	ST 14	ST 15	ST 16	...	ST 68	ST 69	ST 70	ST 71	ST 72	ST 73	...	ST 81	ST 82	...	ST 88
P 1	...	P 14	P 17	...	P 26	P 29	P 32	P 35	P 38	P 41	...	P 197	P 200	P 203	P 206	P 209	P 212	...	P 236	P 239	...	P 257
P 3	...	P 19	P 22	...	P 31	P 34	P 37	P 40	P 43	P 46	...	P 202	P 205	P 208	P 211	P 214	P 217	...	P 241	P 244	...	P 261
P 9	...	P 27	P 30	...	P 39	P 42	P 45	P 48	P 51	P 54	...	P 210	P 213	P 216	P 219	P 222	P 225	...	P 249	P 252	...	P 264
Condição de Contorno (7 seções = 10,5 m) Emboque		Sem impacto na edificação (4 seções = 6 m)		Zona de importância para interação do túnel com edifício (61 seções = 91,5 m)										Sem impacto na edificação (9 seções = 13,5 m)		Condição de Contorno (7 seções = 10,5 m) Desemboque						

Figura A.59. Controle para otimização do Eixo Y: ilustração das 264 partições (P) de escavação do túnel, dentro das 88 seções transversais (ST).

Como pode se observar na Figura A.59, as condições de contorno estabelecidas na Seção 6.2.2, relacionados ao emboque e desemboque, foram consideradas para não influenciar no resultado da análise. Ademais, foram mapeadas duas zonas de escavação que podem ser retiradas sem que a interação do túnel com o edifício seja comprometida. A primeira região foi delimitada ao notar-se uma influência no *Step* 41 e, por isso, a necessidade de travar a seção transversal 11 (ST 11), que inclui o último arco invertido escavado (P39). A segunda parte, mais próxima do desemboque, foi estabelecida ao não se identificar impacto com a escavação da P212 da ST73. Assim, as seções transversais em verde para calota, bancada e arco invertido, puderam ser suprimidas do modelo sem alteração significativa nos resultados. Estas reduções totalizaram onze seções transversais, sendo quatro mais próximas ao emboque e outras nove mais próximas ao desemboque. Por fim, o modelo passou a ser representado pelas 61 seções transversais centrais, além das outras 14 que delimitam a condições de contorno, cada uma com 1,5 m de extensão.

Recapitulando o exposto nessa Seção, o Eixo X teve o limite reduzido de 130 m para 60 m e o Eixo Y de 132 m para 112,5 m. Estes dados são sintetizados na Tabela A.3 para possibilitar uma consulta rápida ao exposto.

Tabela A.3. Limites estabelecidos para restrição de deslocamento

	Modelo Inicial	Modelo Otimizado	Redução (%)
Eixo X	130 m	60 m	53,8
Eixo Y	132 m	112,5 m	14,7

Com as novas dimensões propostas, os *Steps* de escavação do túnel foram reprogramados. A geometria otimizada passou a ser representada pela Figura A.61

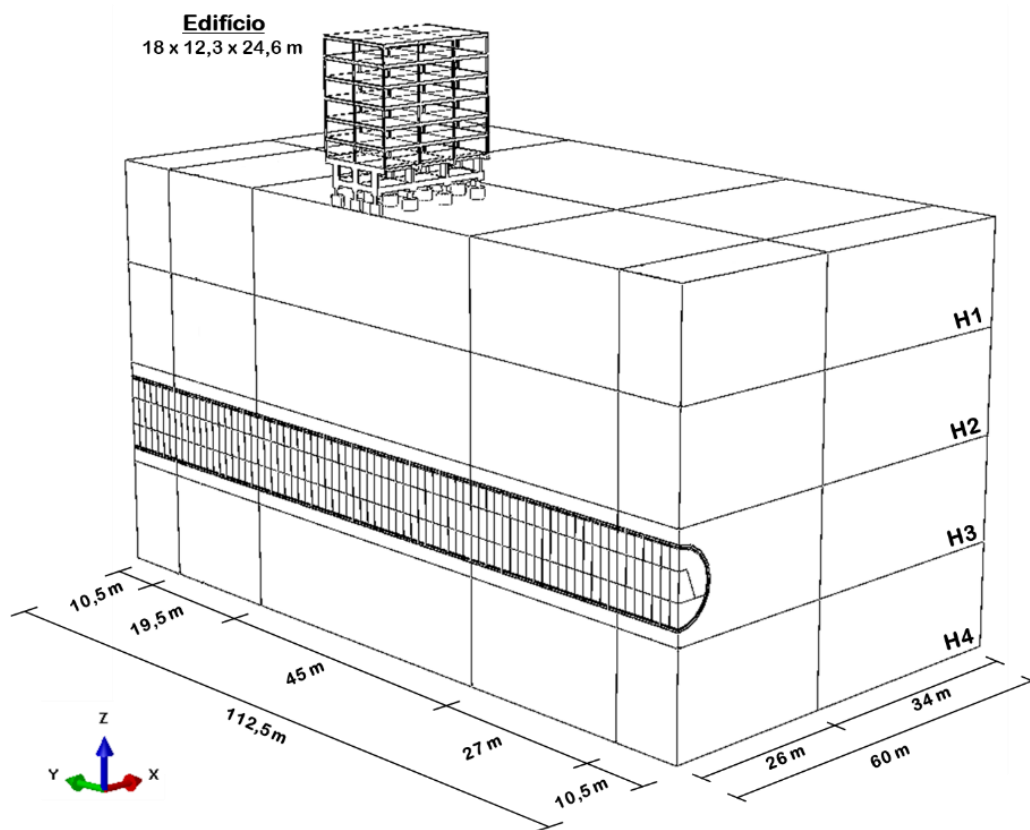


Figura A.60. Geometria após otimização do domínio.

A.3.2 REFINAMENTO DA MALHA

A malha inicialmente proposta na Seção A.2.7 foi avaliada com o intuito de verificar a necessidade de refinamento, especialmente nas regiões de maior interesse para a análise. Essa avaliação é de suma importância para garantir que a malha proposta não influencia na acurácia desejada para o resultado e, tão pouco, onera de forma desnecessária o tempo de processamento dos dados.

O estudo do refinamento da malha já foi planejado antes mesmo das reduções geométricas propostas na Seção A.3.1 e é ilustrado na Figura A.61. A malha do maciço foi subdividida em 24 diferentes regiões para priorizar o refinamento nas zonas de maior importância. Isso quer dizer que, para cada camada estratigráfica, foram definidas seis diferentes zonas de refinamento. Ademais, as estruturas do concreto projetado e do edifício também possuem características particulares. Após a otimização do domínio, a única alteração foi que a Zona F parou de existir no modelo.

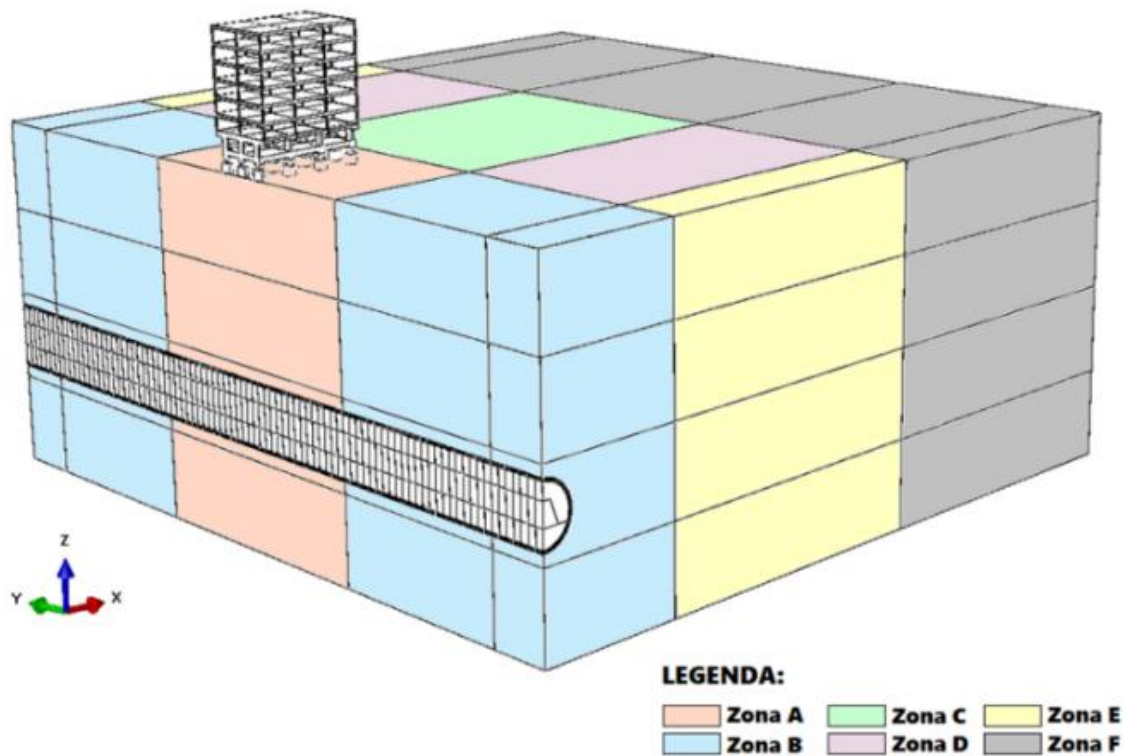


Figura A.61. Divisão da geometria otimizada em quatro quadrantes.

Para que o refinamento fosse eficiente nas três *Parts* importadas, as regiões foram avaliadas separadamente na seguinte sequência: maciço, concreto projetado e edifício. Nessa etapa, para atribuição da malha, as regiões selecionadas pelo caminho exposto na Figura A.62.

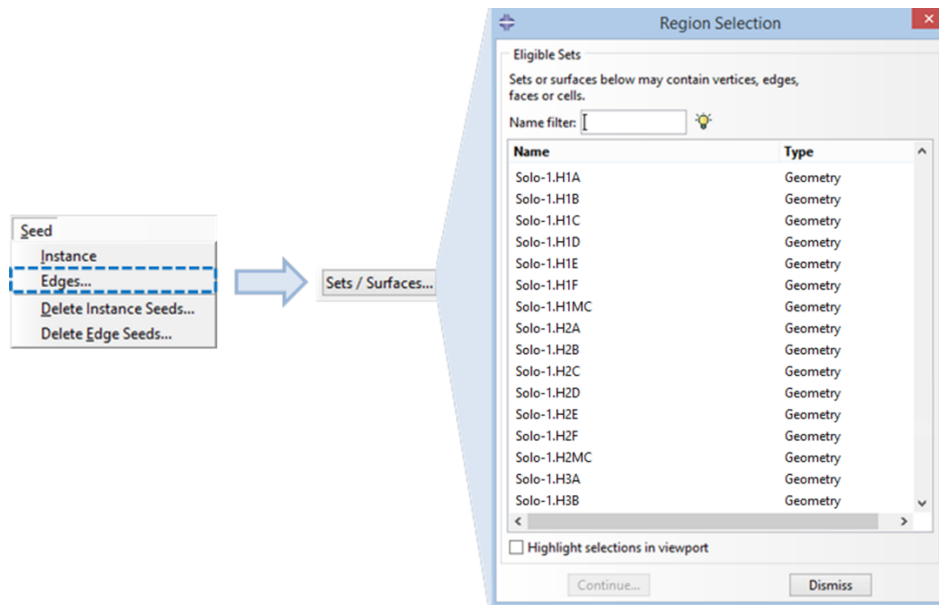


Figura A.62. Seleção das regiões de interesse para refinamento da malha.

As nomenclaturas das regiões do maciço, identificadas na Figura A.62, são referenciadas por sua localização perante cada Horizonte (H) e as Zona da Malha de A até F. Por exemplo, a região sobreposta ao edifício é identificada pelo código *H1A* (Figura A.61) por estar no primeiro horizonte estratigráfico e na Zona A.

A.3.2.1 REFINAMENTO DA MALHA DO MACIÇO

Para o maciço, a forma hexaédrica dos elementos permaneceu provendo melhor convergência aos resultados no modelo otimizado. Assim, apresentada a subdivisão do modelo otimizado, foram testadas sete diferentes malhas para o maciço, conforme detalhado na Tabela A.4.

Tabela A.4. Malhas analisadas para o maciço

Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
H1A	1,50	1,58	1,65	1,82	2,00	2,20	2,42
H1B	3,00	3,15	3,30	3,63	3,99	4,39	4,83
H1C	4,50	4,95	5,40	6,48	7,78	9,33	10,00
H1D	6,00	6,90	7,80	10,00	10,00	10,00	10,00
H1E	7,50	9,38	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
H2A	2,50	2,63	2,75	3,03	3,33	3,66	4,03

Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
H2B	4,00	4,20	4,40	4,84	5,32	5,86	6,44
H2C	5,50	6,05	6,60	7,92	9,50	10,00	10,00
H2D	7,00	8,05	9,10	10,00	10,00	10,00	10,00
H2E	8,50	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
H3A	1,50	1,58	1,65	1,82	2,00	2,20	2,42
H3B	1,50	1,58	1,65	1,82	2,00	2,20	2,42
H3C	3,00	3,30	3,60	4,32	5,18	6,22	7,46
H3D	4,50	5,18	5,85	7,61	9,89	10,00	10,00
H3E	6,00	7,50	9,00	10,00	10,00	10,00	10,00
H4A	2,50	2,63	2,75	3,03	3,33	3,66	4,03
H4B	4,00	4,20	4,40	4,84	5,32	5,86	6,44
H4C	5,50	6,05	6,60	7,92	9,50	10,00	10,00
H4D	7,00	8,05	9,10	10,00	10,00	10,00	10,00
H4E	8,50	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Edifício				1,00			
Concreto Projetado				0,50			
Solo Adicional + Concreto Projetado				0,50			

O tamanho aproximado das subdivisões das malhas foi variado de acordo com o estabelecido na Tabela A.5.

Tabela A.5. Variações nos tamanhos das subdivisões da malha

	M1 → M2	M1 → M3	M3 → M4	M4 → M5	M5 → M6	M6 → M7
Zona A	+ 5%	+ 10%	+ 10%	+ 10%	+ 10%	+ 10%
Zona B	+ 5%	+ 10%	+ 10%	+ 10%	+ 10%	+ 10%
Zona C	+ 10%	+ 20%	+ 20%	+ 20%	+ 20%	+ 20%
Zona D	+ 15%	+ 30%	+ 30%	+ 30%	+ 30%	+ 30%
Zona E	+ 25%	+ 50%	+ 50%	+ 50%	+ 50%	+ 50%

Dito isso, para permitir uma avaliação expedita, visual, da ordem de grandeza dos elementos perante o modelo, na Figura A.63 apresenta-se uma visão geral das malhas analisadas.

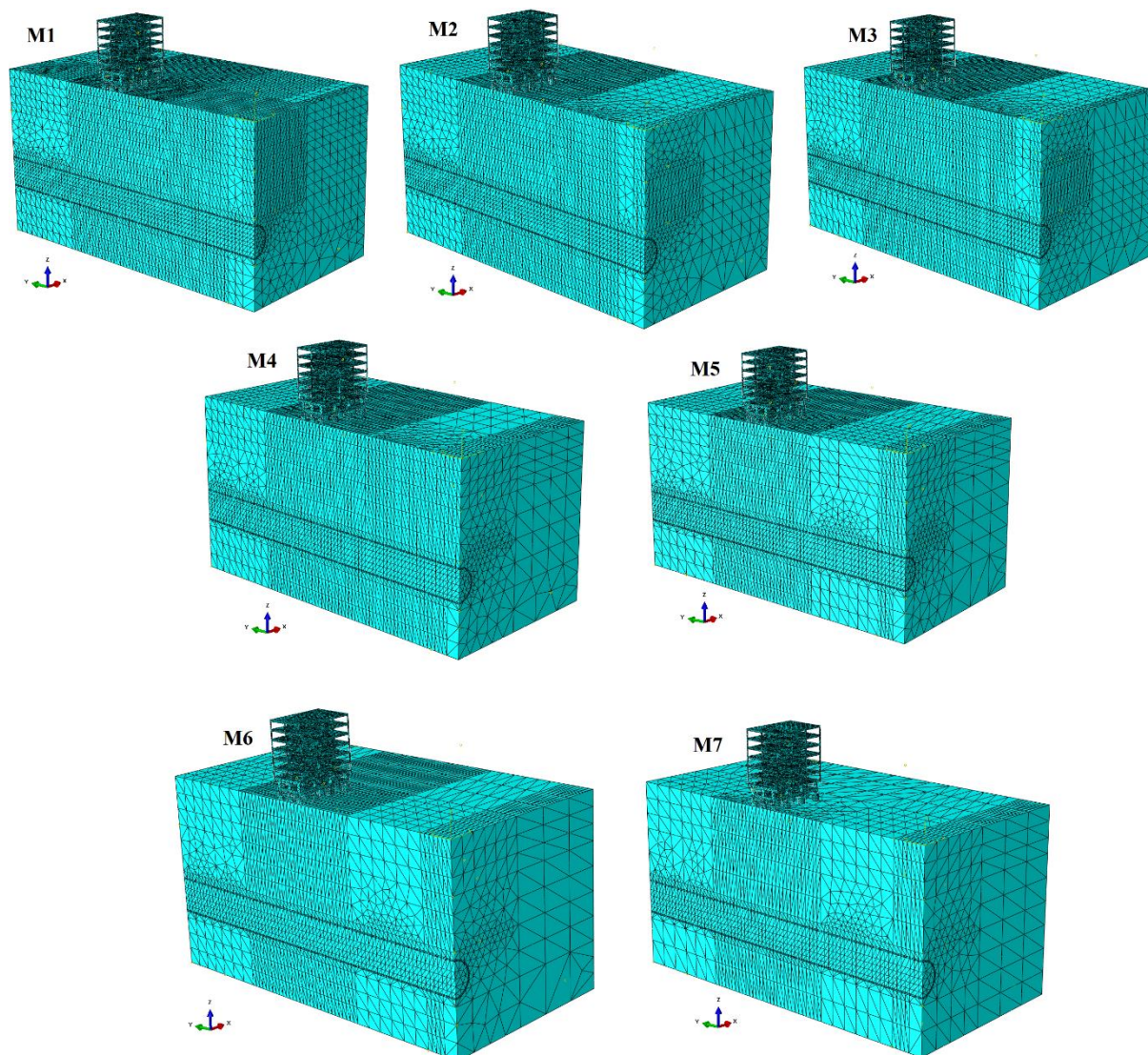


Figura A.63. As sete malhas analisadas para o maciço com domínio otimizado.

Na Tabela A.6 são apresentados os esforços computacionais aplicados para efetuar os cálculos numéricos propostos por cada uma das seis malhas supracitadas. Ressalta-se que os 128 GB de memória de acesso aleatório (*Random Access Memory* – RAM), instaladas no computador utilizado, foram utilizados como limitante. Isso para que os tempos de processamento pudessem ser comparados de forma não tendenciosa.

Tabela A.6. Informações sobre as malhas e os tempos de processamento na perspectiva de refinamento do maciço

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Número de nós	387.779	315.983	292.948	238.102	222.208	203.693	178.866
Número de elementos	253.438	201.607	185.064	144.494	132.989	119.625	101.813
Consumo de RAM	34 GB	26 GB	23 GB	19 GB	15 GB	14,0 GB	12,0 GB
Tempo de Cálculo (seg)	228.882	125.737	113.012	48.108	40.951	31.085	18.308

Na Figura A.64 apresenta-se uma relação entre o número de nós e o tempo de processamento para as sete malhas apresentadas na Tabela A.4. O refinamento da malha para o maciço se limitou a essas sete diferentes configurações, pois já foi possível notar uma convergência dos resultados, conforme exposto posteriormente nessa Seção.

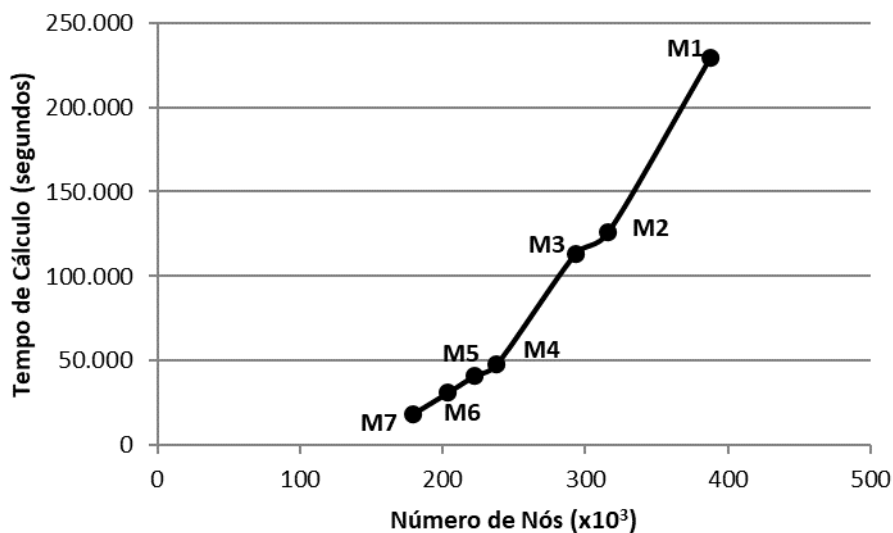


Figura A.64. Tempo de cálculo e número de nós para as sete diferentes malhas do maciço.

Para avaliar a convergência dos resultados durante o processo de refinamento da malha, nas regiões do maciço e do concreto projetado, foram avaliados os deslocamentos em onze pontos distintos. Os pontos escolhidos têm sua localização identificada na Tabela A.7.

Tabela A.7. Localização dos pontos de controle para o refinamento da malha no maciço e concreto projetado

Região	Nó	Coordenadas (X, Y, Z)		
		X	Y	Z
Horizonte 1 (0 a 15 m)	B1	0		
	B2	30	56,25	-7,5
	B3	60		
Horizonte 2 (15 a 30 m)	B4	0		
	B5	30	56,25	-22,5
	B6	60		
Horizonte 3 (30 a 45 m)	B7	30	56,25	-37,5
	B8	60		
	B9	0		
Horizonte 4 (45 a 60 m)	B10	30	56,25	-52,5
	B11	60		

Com relação aos deslocamentos (U , *Magnitude*), para os pontos de controle no maciço, no último *Step* da escavação, as variações encontradas estão detalhadas na Tabela A.8.

Tabela A.8. Deslocamentos (U , *Magnitude*) nos pontos de controle ao final da escavação – refinamento do maciço

		M1 (m)	M2 (m)	M3 (m)	M4 (m)	M5 (m)	M6 (m)	M7 (m)
Horizonte 1 (0 a 15 m)	Nó B1	0,0483	0,0473	0,0467	0,0468	0,0457	0,0459	0,0436
	Nó B2	0,0115	0,0113	0,0111	0,0111	0,0108	0,0109	0,0107
	Nó B3	0,0011	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Horizonte 2 (15 a 30 m)	Nó B4	0,0527	0,0512	0,0503	0,0512	0,0492	0,0495	0,0472
	Nó B5	0,0068	0,0067	0,0066	0,0066	0,0064	0,0065	0,0064
	Nó B6	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003
Horizonte 3 (30 a 45 m)	Nó B7	0,0045	0,0044	0,0043	0,0043	0,0042	0,0042	0,0041
	Nó B8	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
Horizonte 4 (45 a 60 m)	Nó B9	0,0151	0,0149	0,0149	0,0149	0,0147	0,0147	0,0148
	Nó B10	0,0017	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0015
	Nó B11	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Para não acarretar uma exposição exaustiva dos dados, optou-se pela ilustração de um ponto para cada horizonte estratigráfico. Os pontos escolhidos são aqueles destacados na Tabela A.8

e que sofrem mais influenciados da escavação do túnel e do edifício. Assim, nota-se na Figura A.65 que as variações de deslocamento entre as malhas M4, M3, M2 e M1 são pequenas e indicam convergência.

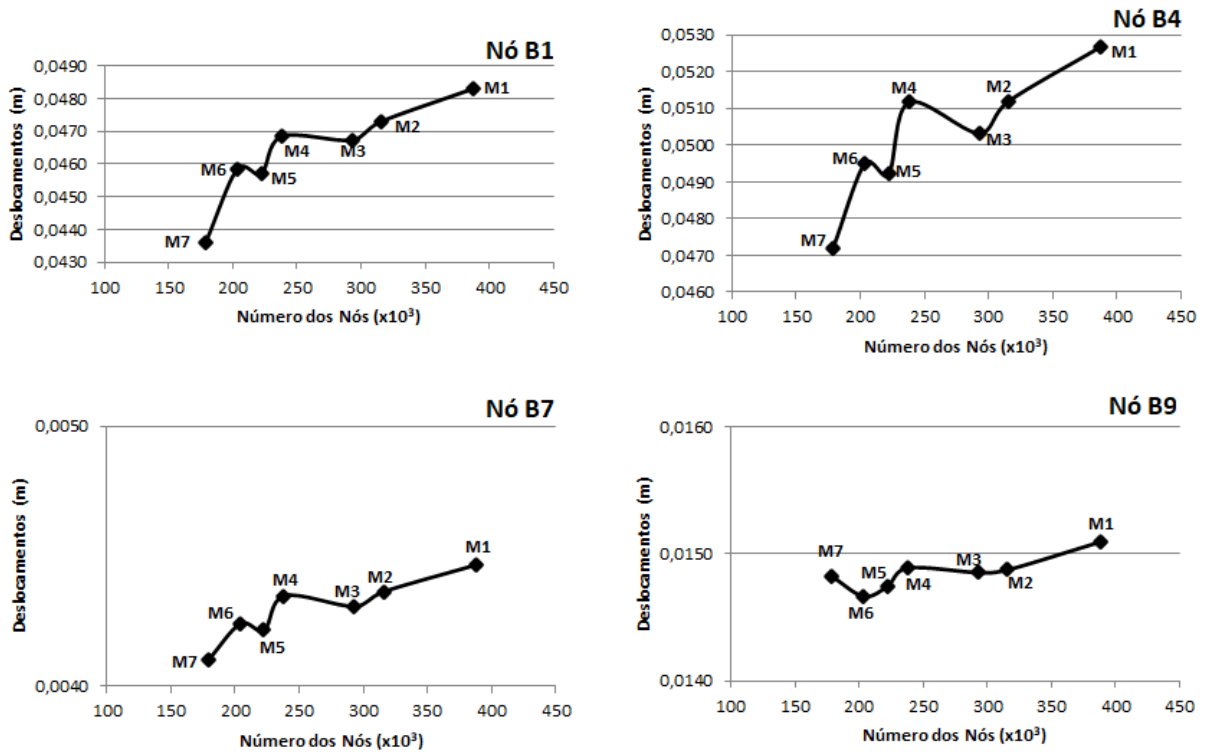


Figura A.65. Deslocamentos (U , $Magnitude$), no refinamento do maciço, com destaque para as variações de 1 mm: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.

Conhecidos os deslocamentos, na

Tabela A.9 e na Figura A.66 apresentam-se os resultados das derivadas dos intervalos de deslocamento pela média geométrica do número de nós. Ressalta-se que nas imagens, com o intuito de facilitar a visualização de convergência dos resultados, não foi prefixada uma escala para o Eixo Y.

Tabela A.9. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do maciço: final da escavação

		M1/M2 ($\times 10^{-9}$ m)	M2/M3 ($\times 10^{-9}$ m)	M3/M4 ($\times 10^{-9}$ m)	M4/M5 ($\times 10^{-9}$ m)	M5/M6 ($\times 10^{-9}$ m)	M6/M7 ($\times 10^{-9}$ m)
Horizonte 1 (0 a 15 m)	Nó B1	13,8	24,5	2,0	71,9	9,0	90,3
	Nó B2	2,9	8,2	1,1	19,7	6,5	10,6
	Nó B3	0,1	0,4	0,1	1,4	1,3	0,7
Horizonte 2 (15 a 30 m)	Nó B4	20,5	37,7	15,2	123,0	15,9	92,6
	Nó B5	1,8	3,8	0,5	11,8	3,3	4,4
	Nó B6	0,1	0,2	0,1	0,4	1,0	1,5
Horizonte 3 (30 a 45 m)	Nó B7	1,4	2,5	0,7	8,3	1,4	5,6
	Nó B8	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6	0,8
Horizonte 4 (45 a 60 m)	Nó B9	3,1	1,0	0,7	9,2	4,2	6,4
	Nó B10	0,5	0,9	0,2	3,2	0,5	2,0
	Nó B11	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0
Média Simples		3,2	4,0	7,2	1,9	22,7	4,0

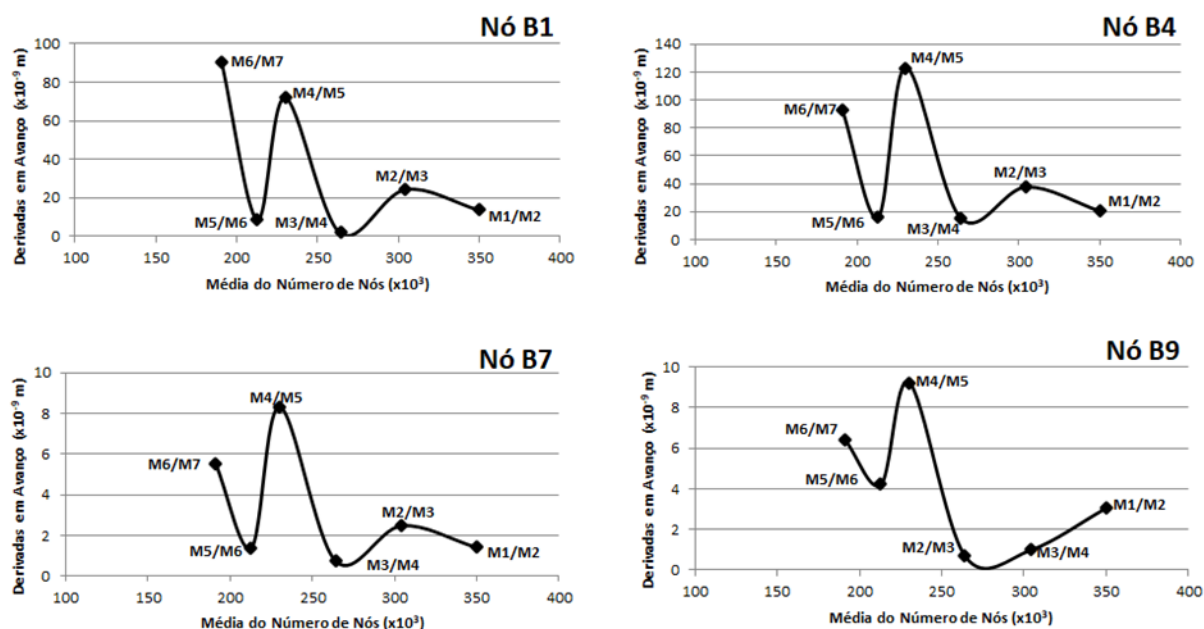


Figura A.66. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós – refinamento do maciço: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.

Outro indicador escolhido, previamente utilizado por Raposo (2016), é a variação percentual entre os deslocamentos de malhas vizinhas, chamado de desvio em avanço uma vez que a diferença é dividida pelo valor em avanço. Nesse caso, também não foi prefixada uma escala para o Eixo Y e o indicador é apresentado na Tabela A.10 e na Figura A.67.

Tabela A.10. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do maciço: final da escavação

		M1/M2 (%)	M2/M3 (%)	M3/M4 (%)	M4/M5 (%)	M5/M6 (%)	M6/M7 (%)
Horizonte 1 (0 a 15 m)	Nó B1	2,102	1,208	0,232	2,501	0,363	5,143
	Nó B2	1,861	1,698	0,532	2,893	1,105	2,468
	Nó B3	0,770	0,879	0,508	2,150	2,385	1,650
Horizonte 2 (15 a 30 m)	Nó B4	2,872	1,725	1,634	3,972	0,593	4,868
	Nó B5	1,902	1,327	0,453	2,924	0,947	1,694
	Nó B6	4,476	1,710	3,527	2,642	8,071	13,834
Horizonte 3 (30 a 45 m)	Nó B7	2,315	1,322	0,937	3,130	0,606	3,359
	Nó B8	5,331	1,430	2,180	2,752	7,178	12,416
Horizonte 4 (45 a 60 m)	Nó B9	1,476	0,156	0,251	0,993	0,531	1,075
	Nó B10	2,278	1,287	0,812	3,312	0,555	3,287
	Nó B11	0,459	1,011	0,497	1,882	1,906	0,547
Média Simples		5,4	2,3	1,3	1,1	2,7	2,2

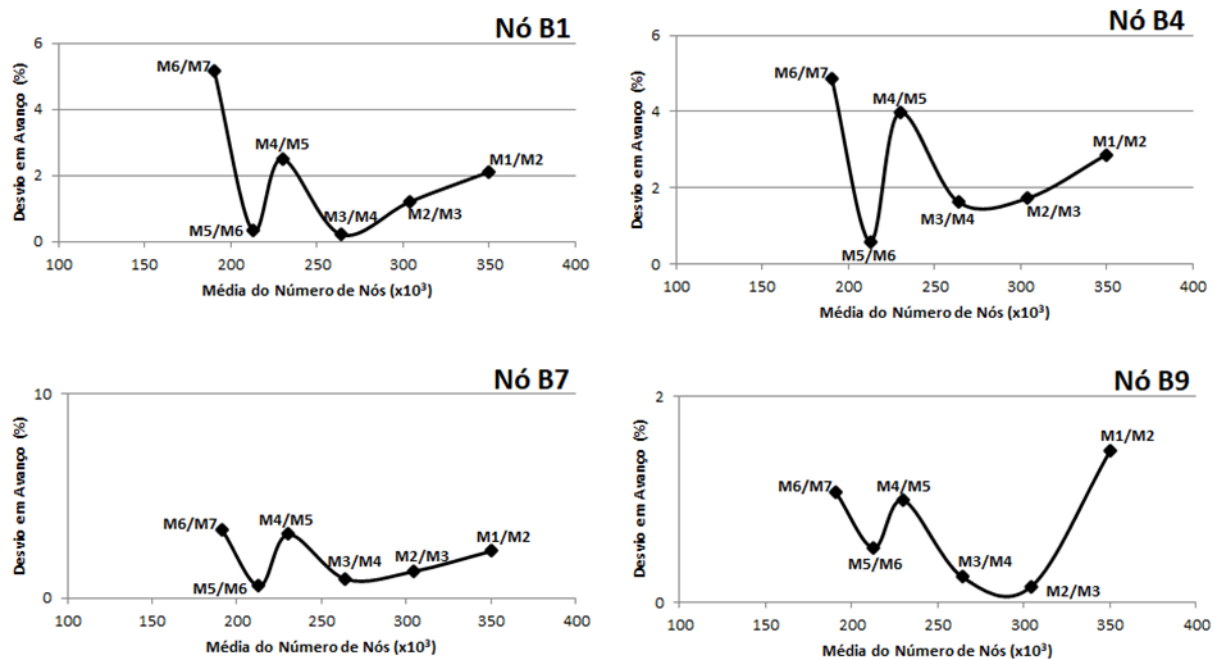


Figura A.67. Desvios percentuais em avanço do deslocamento, para o refinamento do maciço, nos pontos de controle: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.

Isto posto, além dos resultados apresentados para os deslocamentos, os outros dois indicadores reforçam que as variações entre as malhas M4, M3, M2 e M1 são pequenas. De qualquer forma, em um caso prático, deve-se avaliar a diferença no tempo de processamento entre as malhas

(Figura A.64) e a precisão requerida para o problema. Para esta tese, optou-se por seguir com a malha mais refinada no maciço para que não houvesse problemas de convergência na interface entre os elementos de diferentes proporções no edifício e no concreto projetado.

A.3.2.2 REFINAMENTO DA MALHA DO CONCRETO PROJETADO

Para o concreto projetado, a forma tetraédrica dos elementos permaneceu provendo melhor convergência aos resultados para o modelo otimizado. Assim, foram testadas outras seis diferentes malhas, conforme detalhado na Tabela A.11.

Tabela A.11. Malhas analisadas para o concreto projetado

Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)					
	M1CP	M2CP	M3CP	M4CP	M5CP	M6CP
Concreto Projetado	0,50	0,55	0,45	0,40	0,35	0,30
Solo Adicional + Concreto Projetado	0,50	0,55	0,45	0,40	0,35	0,30
H1A				1,50		
H1B				3,00		
H1C				4,50		
H1D				6,00		
H1E				7,50		
H2A				2,50		
H2B				4,00		
H2C				5,50		
H2D				7,00		
H2E				8,50		
H3A				1,50		
H3B				1,50		
H3C				3,00		
H3D				4,50		
H3E				6,00		
H4A				2,50		
H4B				4,00		
H4C				5,50		
H4D				7,00		
H4E				8,50		
Edifício				1,0		

Nota-se que a malha M1CP é similar a M1 do maciço e, assim, ainda foram testadas configurações com mais e com menos nós. Na Tabela A.12 são apresentados os esforços computacionais aplicados para efetuar os cálculos numéricos propostos por cada uma das seis malhas supracitadas. Novamente, os 128 GB de memória de acesso aleatório (*Random Access Memory* – RAM), instaladas no computador utilizado, foram adotados como limitante.

Tabela A.12. Informações sobre as malhas e os tempos de processamento na perspectiva do refinamento do concreto projetado

	M1CP	M2CP	M3CP	M4CP	M5CP	M6CP
Número de nós	238.102	233.582	241.492	263.642	272.672	308.342
Número de elementos	144.494	141.794	146.519	159.569	164.969	186.119
Tempo de Cálculo (segundos)	48.108	49.151	48.215	51.365	51.933	53.365

Na Figura A.68 apresenta-se uma relação entre o número de nós e o tempo de processamento para as seis malhas testadas no concreto projetado.

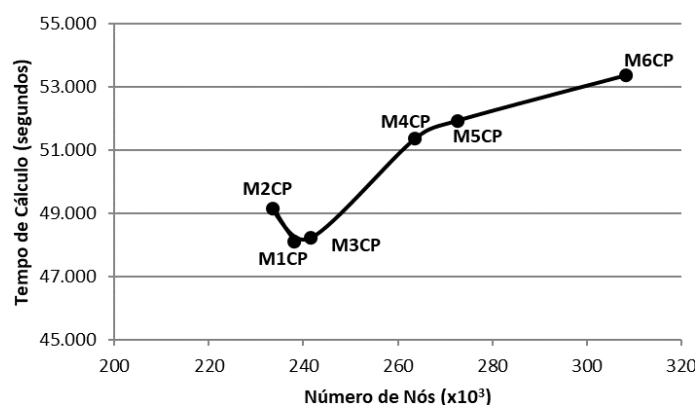


Figura A.68. Tempo de cálculo e número de nós para as seis diferentes malhas do concreto projetado.

Nota-se que da M1CP para M2CP o tempo de processamento aumentou, ainda que o número de nós e elementos tenha diminuído. Isto aconteceu devido ao tempo de convergência de cada um dos passos ter se estendido. Por esse motivo, não foram testadas outras configurações com tamanho aproximado do concreto projetado maior que 0,55 m. Exceto para esta perspectiva, o tempo de processamento foi aumentando em relação direta com o número de nós.

Para o maciço e o concreto projetado foram avaliados os mesmos 11 pontos de controle que estão descritos na Tabela A.7. Os deslocamentos (U , *Magnitude*), para o último *Step* da escavação, são detalhados na Tabela A.13 e na Figura A.69.

Tabela A.13. Deslocamentos (U , *Magnitude*) nos pontos de controle ao final da escavação na perspectiva do refinamento do concreto projetado

		M1 (m)	M2 (m)	M3 (m)	M4 (m)	M5 (m)	M6 (m)
Horizonte 1 (0 a 15 m)	Nó B1	0,0468	0,0470	0,0468	0,0465	0,0465	0,0465
	Nó B2	0,0111	0,0112	0,0111	0,0111	0,0111	0,0110
	Nó B3	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Horizonte 2 (15 a 30 m)	Nó B4	0,0512	0,0514	0,0510	0,0506	0,0506	0,0506
	Nó B5	0,0066	0,0067	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066
	Nó B6	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Horizonte 3 (30 a 45 m)	Nó B7	0,0043	0,0044	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
	Nó B8	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Horizonte 4 (45 a 60 m)	Nó B9	0,0149	0,0149	0,0149	0,0148	0,0148	0,0148
	Nó B10	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
	Nó B11	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

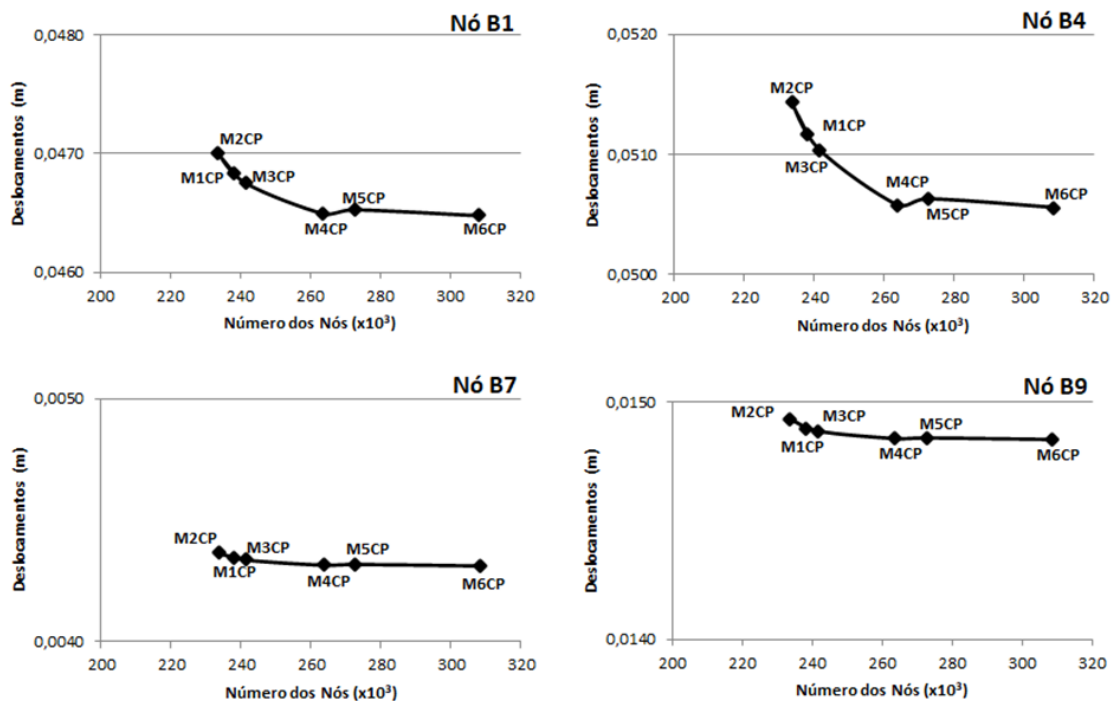


Figura A.69. Deslocamentos (U , *Magnitude*), no refinamento do concreto projetado, com destaque para as variações de 1 mm: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.

Conhecidos os deslocamentos, na Tabela A.14 e na Figura A.70 apresentam-se os resultados das derivadas dos intervalos de deslocamento pela média geométrica do número de nós. Novamente, com o intuito de facilitar a visualização de convergência dos resultados, não foi prefixada uma escala para o Eixo Y.

Tabela A.14. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do concreto projetado: final da escavação

		M1CP/M2CP ($\times 10^{-9}$ m)	M1CP/M3CP ($\times 10^{-9}$ m)	M3CP/M4CP ($\times 10^{-9}$ m)	M4CP/M5CP ($\times 10^{-9}$ m)	M5CP/M6CP ($\times 10^{-9}$ m)
Horizonte 1	Nó B1	37,0	24,3	11,4	3,5	1,4
	Nó B2	11,8	7,0	2,6	1,0	0,5
	Nó B3	1,1	0,3	0,1	0,1	0,1
Horizonte 2	Nó B4	59,6	38,6	20,8	5,5	2,0
	Nó B5	7,3	3,9	1,2	0,5	0,3
	Nó B6	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Horizonte 3	Nó B7	4,4	2,8	1,0	0,4	0,2
	Nó B8	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
Horizonte 4	Nó B9	8,8	3,5	1,4	0,3	0,2
	Nó B10	1,7	1,0	0,3	0,1	0,1
	Nó B11	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Média Simples		12,0	7,4	3,5	1,0	0,4

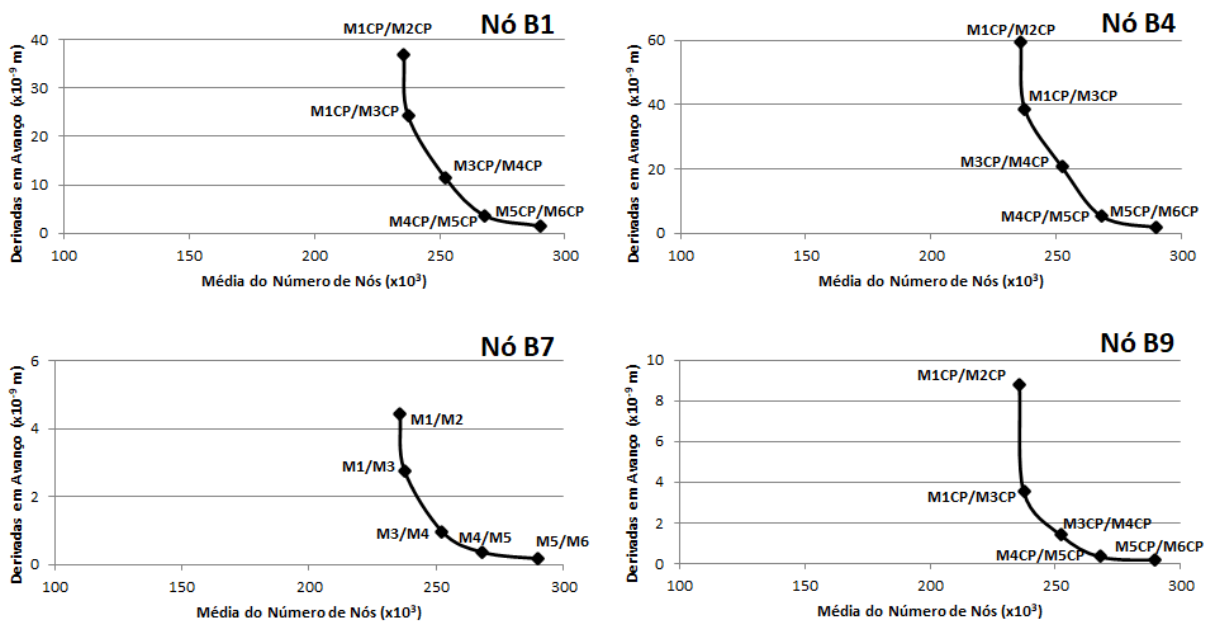


Figura A.70. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós – refinamento do concreto projetado: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.

Para a exposição do desvio em avanço também não foi prefixada uma escala para o Eixo Y e o indicador é apresentado na Tabela A.15 e na Figura A.71.

Tabela A.15. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do concreto projetado: final da escavação

		M1CP/M2CP (%)	M1CP/M3CP (%)	M3CP/M4CP (%)	M4CP/M5CP (%)	M5CP/M6CP (%)
Horizonte 1	Nó B1	0,356	0,176	0,542	0,068	0,105
	Nó B2	0,476	0,214	0,513	0,083	0,150
	Nó B3	0,494	0,107	0,312	0,071	0,256
Horizonte 2	Nó B4	0,524	0,256	0,909	0,097	0,143
	Nó B5	0,494	0,199	0,417	0,072	0,153
	Nó B6	0,402	0,282	0,153	0,002	0,397
Horizonte 3	Nó B7	0,457	0,216	0,495	0,074	0,138
	Nó B8	0,025	0,345	0,971	0,015	0,068
Horizonte 4	Nó B9	0,265	0,081	0,209	0,021	0,046
	Nó B10	0,475	0,214	0,398	0,072	0,126
	Nó B11	0,281	0,117	0,591	0,055	0,057
Média Simples		0,4	0,2	0,5	0,1	0,1

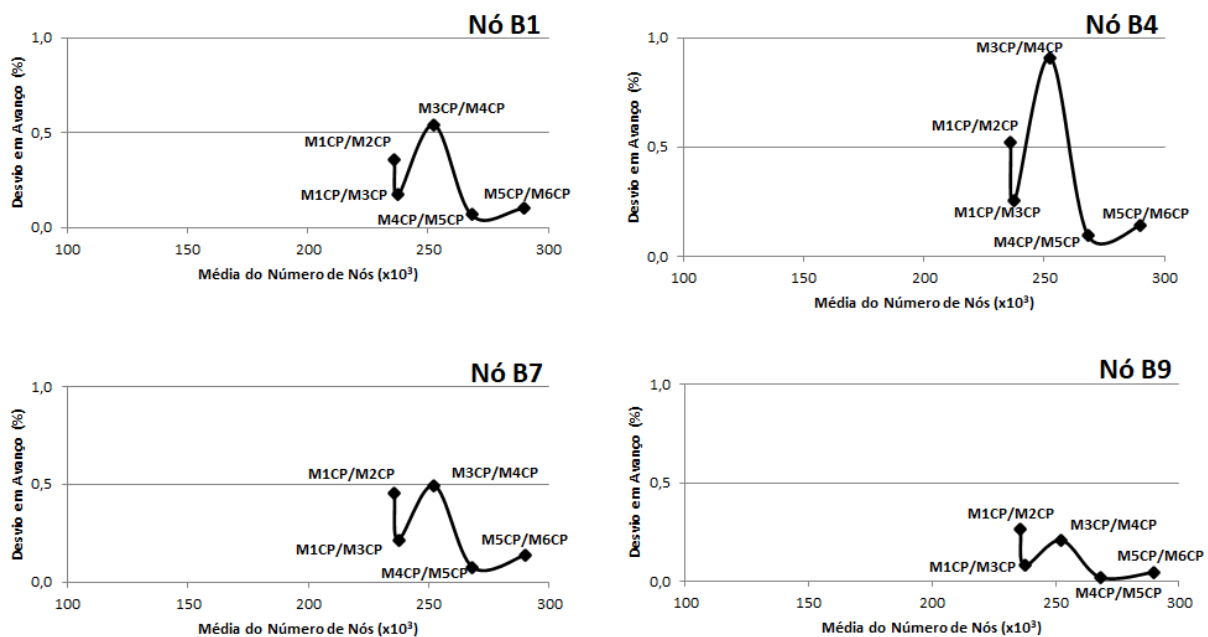


Figura A.71. Desvios percentuais em avanço do deslocamento, para o refinamento do maciço, nos pontos de controle: a) Ponto B1; b) Ponto B4; c) Ponto B7; e d) Ponto B9.

Para a malha do concreto projetado foi possível notar uma significativa convergência dos resultados a partir da M4CP. Ademais, esta malha se mostrou compatível com o obtido no maciço e, por isso, foi adotada.

A.3.2.3 REFINAMENTO DA MALHA DO EDIFÍCIO

Para o edifício, a forma tetraédrica dos elementos permaneceu provendo melhor convergência aos resultados para o modelo otimizado. Assim, foram testadas outras seis diferentes malhas, conforme detalhado na Tabela A.16.

Tabela A.16. Malhas analisadas para o edifício

Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)					
	M1CP	M2CP	M3CP	M4CP	M5CP	M6CP
Edifício	1,0	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
Concreto Projetado	0,40					
Solo Adicional + Concreto Projetado	0,40					
H1A	1,50					
H1B	3,00					
H1C	4,50					
H1D	6,00					
H1E	7,50					
H2A	2,50					
H2B	4,00					
H2C	5,50					
H2D	7,00					
H2E	8,50					
H3A	1,50					
H3B	1,50					
H3C	3,00					
H3D	4,50					
H3E	6,00					
H4A	2,50					
H4B	4,00					
H4C	5,50					
H4D	7,00					
H4E	8,50					

Nota-se que a malha M1E é similar a M4CP do concreto projetado e, assim, foram testadas configurações com mais e com menos nós. Na Tabela A.17 são apresentados os esforços computacionais aplicados para efetuar os cálculos numéricos propostos por cada uma das seis malhas supracitadas. Novamente, os 128 GB de memória de acesso aleatório (*Random Access Memory* – RAM), instaladas no computador utilizado, foram adotados como limitante.

Tabela A.17. Informações sobre as malhas e os tempos de processamento na perspectiva do edifício

	M1E	M2E	M3E	M4E	M5E	M6E
Número de nós	263.642	256.401	274.258	278.232	296.545	322.522
Número de elementos	159.569	155.867	164.700	166.670	176.009	189.058
Tempo de Cálculo (segundos)	51.365	50.987	52.349	52.148	52.514	53.202

Na Figura A.72 apresenta-se uma relação entre o número de nós e o tempo de processamento para as seis testadas no edifício.

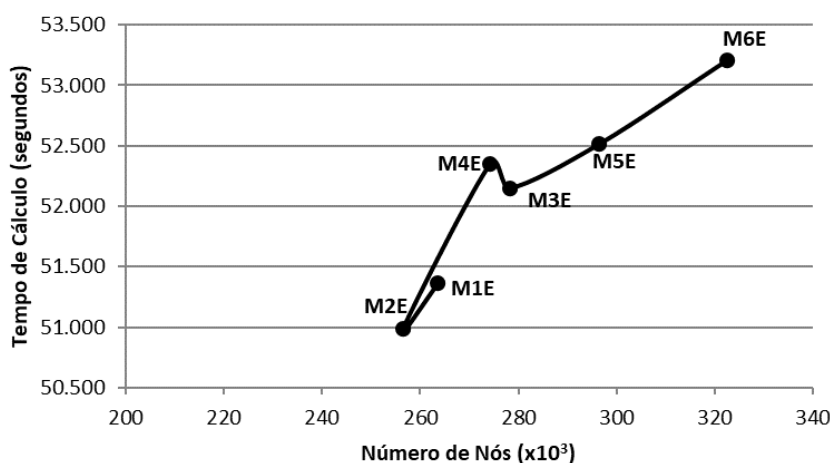


Figura A.72. Tempo de cálculo e número de nós para as cinco diferentes malhas do edifício.

Para avaliar a convergência dos resultados durante o processo de refinamento da malha, no edifício, foram avaliados os deslocamentos em quatro pontos distintos. Os pontos escolhidos têm sua localização ilustrada na Figura A.56.

Com relação aos deslocamentos (U , *Magnitude*), para os pontos de controle no edifício, no último *Step* da escavação, as variações encontradas estão detalhadas na Tabela A.18 e na Figura A.73.

Tabela A.18. Deslocamentos (U , *Magnitude*) nos pontos de controle ao final da escavação – refinamento do edifício

		M1E (m)	M2E (m)	M3E (m)	M4E (m)	M5E (m)
Edifício	Nó B1	0,0715	0,0713	0,0716	0,0714	0,0715
	Nó B2	0,0711	0,0710	0,0711	0,0710	0,0711
	Nó B3	0,0566	0,0566	0,0563	0,0562	0,0560
	Nó B4	0,0571	0,0571	0,0567	0,0566	0,0563

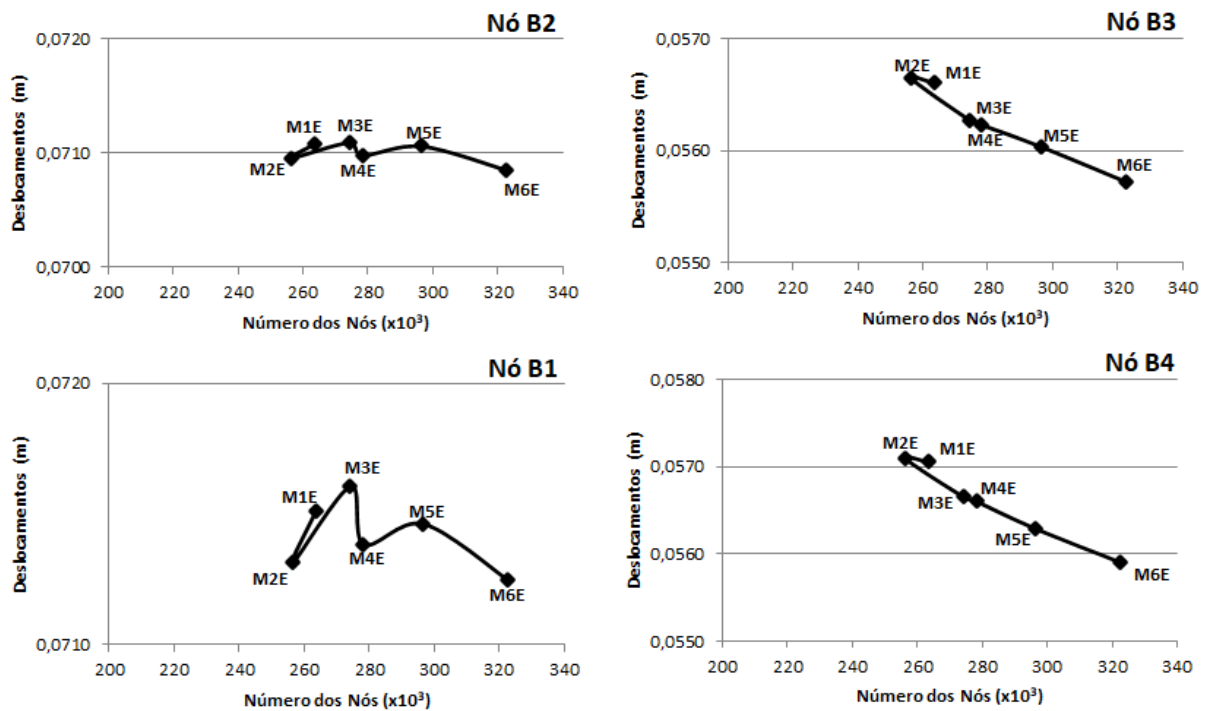


Figura A.73. Deslocamentos (U , *Magnitude*), no refinamento do edifício, com destaque para as variações de 1 mm.

Conhecidos os deslocamentos, na Tabela A.19 e na Figura A.74 apresentam-se os resultados das derivadas dos intervalos de deslocamento pela média geométrica do número de nós. Novamente, com o intuito de facilitar a visualização de convergência dos resultados, não foi prefixada uma escala para o Eixo Y.

Tabela A.19. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós
 – refinamento do edifício: final da escavação

	M1E/M2E ($\times 10^{-9}$ m)	M2E/M3E ($\times 10^{-9}$ m)	M3E/M4E ($\times 10^{-9}$ m)	M4E/M5E ($\times 10^{-9}$ m)	M5E/M6E ($\times 10^{-9}$ m)	
Edifício	Nó B1	27,7	8,6	55,6	4,3	8,2
	Nó B2	17,9	1,0	29,0	4,5	8,3
	Nó B3	5,9	30,8	11,6	10,7	12,0
	Nó B4	6,0	37,4	13,1	17,1	14,7
Média Simples	14,4	19,5	27,3	9,2	10,8	

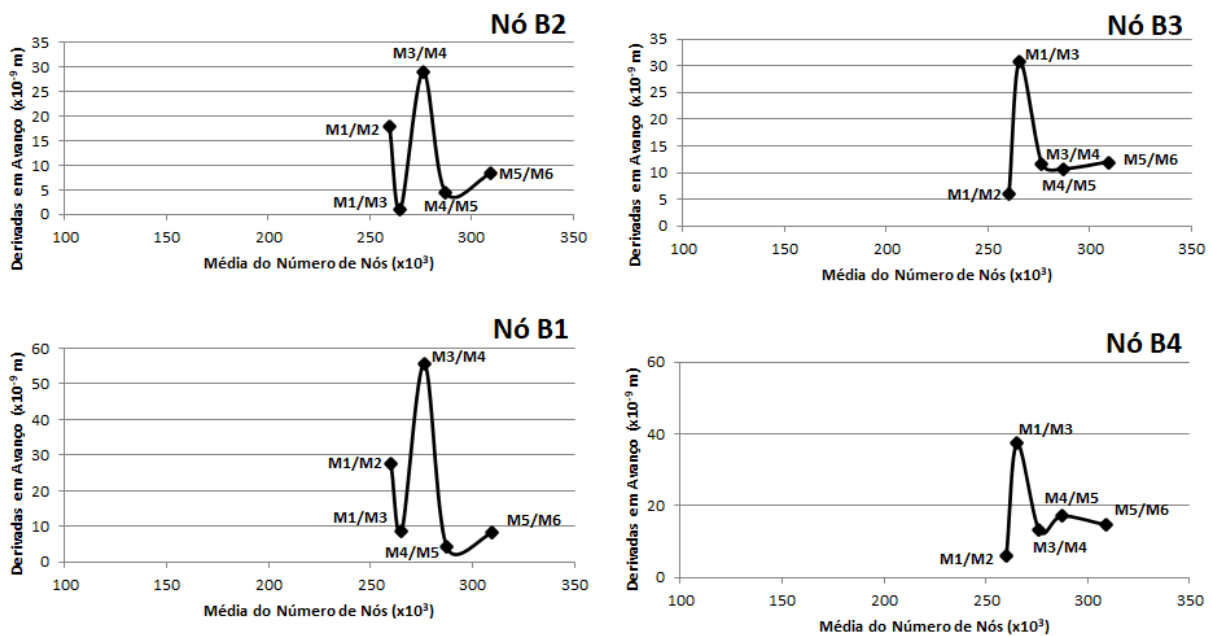


Figura A.74. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do edifício.

Para a exposição do desvio em avanço também não foi prefixada uma escala para o Eixo Y e o indicador é apresentado na

Tabela A.20 e na Figura A.75.

Tabela A.20. Derivadas em avanço do deslocamento pela média geométrica do número de nós na perspectiva do refinamento do edifício: final da escavação

	M1E/M2E (%)	M2E/M3E (%)	M3E/M4E (%)	M4E/M5E (%)	M5E/M6E (%)	
Edifício	Nó B1	0,281	0,127	0,309	0,109	0,299
	Nó B2	0,183	0,014	0,162	0,116	0,306
	Nó B3	0,076	0,582	0,082	0,350	0,558
	Nó B4	0,077	0,701	0,092	0,558	0,683
Média Simples	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5	

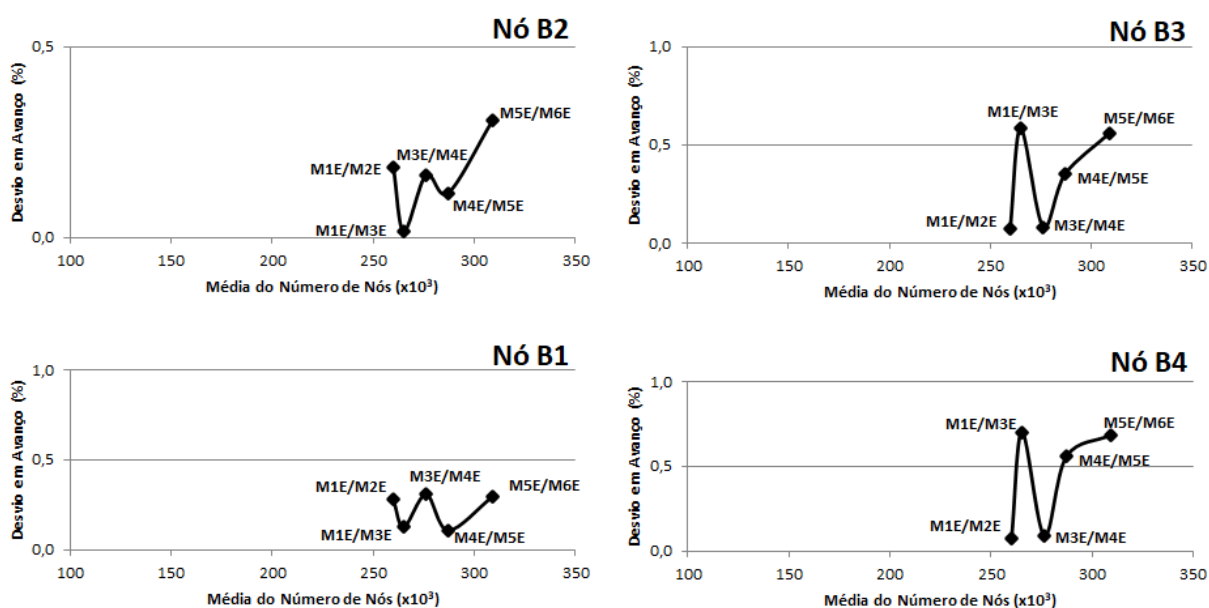


Figura A.75. Desvios percentuais em avanço do deslocamento, para o refinamento do edifício, nos pontos de controle.

Nota-se que as variações entre as malhas M4E, M5E e M6E são mínimas e, ao considerar a diferença no tempo de processamento (Figura A.72), a análise finaliza com a opção pela malha M4E (Figura A.76).

Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)	
	M4CP	
Edifício	0,80	
Concreto Projetado	0,40	
Solo Adicional - Concreto Projetado	0,40	
H1A	1,50	
H1B	3,00	
H1C	4,50	
H1D	6,00	
H1E	7,50	
H2A	2,50	
H2B	4,00	
H2C	5,50	
H2D	7,00	
H2E	8,50	
H3A	1,50	
H3B	1,50	
H3C	3,00	
H3D	4,50	
H3E	6,00	
H4A	2,50	
H4B	4,00	
H4C	5,50	
H4D	7,00	
H4E	8,50	

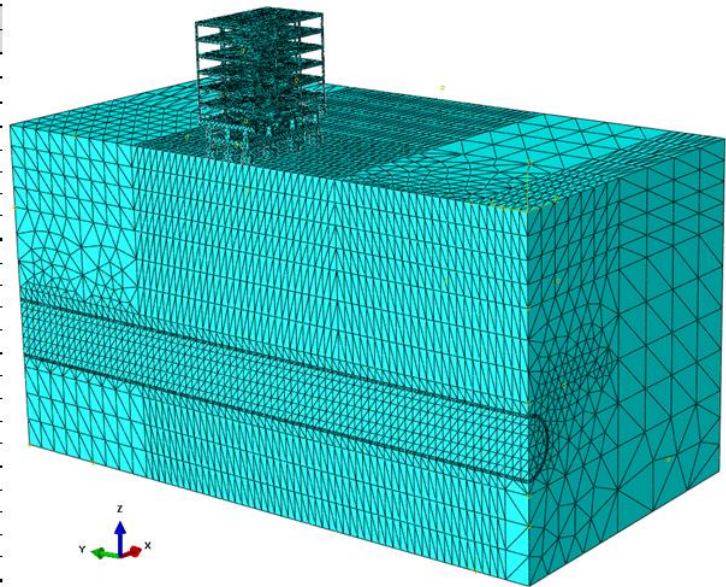


Figura A.76. Modelo com geometria e malha otimizada.

A.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS

Para obtenção das 170 amostras, com aproveitamento otimizado da capacidade computacional, foram propostas duas estruturas de código. Estas estruturas têm o intuito de organizar a amostragem (Seção A.4.1) e alimentar o programa com os dados necessários (Seção A.4.2). Isto posto, para dar rastreabilidade ao executado nesta tese e possibilitar que pesquisas futuras utilizem os dados obtidos como ponto de partida, apresentam-se em maiores detalhes, nas seções subsequentes, os códigos propostos.

O detalhamento dos códigos inclui a identificação das linhas, conforme exposto no Python. Ademais, também se consideram os espaçamentos do texto perante a margem, em parágrafos, como forma de estruturar as dependências entre as linhas.

A.4.1 CÓDIGO PARA ESTRUTURAR O CONJUNTO DAS AMOSTRAS

A primeira etapa do código, da linha 1 a 14, é dedicada a importar os pacotes de dados necessários para a resolução do problema.

Linha 1: # -*- coding: utf-8 -*-

Linha 2:

Linha 3: import os

Linha 4: import subprocess

Linha 5: import pandas as pd
Linha 6: import numpy as np
Linha 7: import pandas as pd
Linha 8: from skopt.space import Space
Linha 9: from skopt.sampler import Lhs
Linha 10: from scipy.stats import lognorm
Linha 11: from scipy.optimize import fsolve
Linha 12: import math
Linha 13: import warnings
Linha 14:

Ao considerar que o modelo otimizado já fez a análise de convergência e dos alertas comunicados pelo programa, têm-se nas linhas 15 e 16 a proposta de ignorar os pontos de atenção a convergência do modelo.

Linha 15: warnings.filterwarnings('ignore', 'The iteration is not making good progress')

Linha 16:

Da linha 17 até a 44 são definidas as funções de interesse para resolução do problema.

Linha 17: def find_s_scl(myclip_a,myclip_b,alpha,cv):

Linha 18: def equations(p):

Linha 19: s, scl = p

Linha 20: return (cv-((lognorm.stats(s, loc=myclip_a, scale=scl, moments='v'))**0.5)/(lognorm.stats(s, loc=myclip_a, scale=scl, moments='m'))), myclip_b-lognorm.ppf(alpha, s,loc=myclip_a,scale=scl))

Linha 21: count = 0

Linha 22: while True:

Linha 23: `x, y = fsolve(equations, (0.1+count*0.05, 0.2*myclip_a))`

Linha 24: `error = round(1000*np.linalg.norm(np.array(equations((x, y))),1))`

Linha 25: `count = count + 1`

Linha 26: `if error == 0:`

Linha 27: `break`

Linha 28: `return [(x,y),list(equations((x, y)))]`

Linha 29:

Linha 30: `def gen_func(pts,inpvv):`

Linha 31: `myclip_a,my_CV,myclip_b,alpha = inpvv`

Linha 32: `fitt=find_s_scl(myclip_a,myclip_b,alpha,my_CV)`

Linha 33: `s, scl = fitt[0]`

Linha 34: `return lognorm.ppf(pts, s,loc=myclip_a,scale=scl)`

Linha 35:

Linha 36:

Linha 37: `def gen_func_SF(pts,inpvv):`

Linha 38: `myclip_a,my_CV,myclip_b,alpha = inpvv`

Linha 39: `return (myclip_b-myclip_a)*pts + myclip_a`

Linha 40:

Linha 41: `def chunks(lst, n):`

Linha 42: `szc=int(len(lst)/n)`

Linha 43: `return [lst[i:i + szc] for i in range(0, len(lst), szc)]`

Linha 44:

Da linha 45 até a 52 são direcionados os diretórios e configurações do job. Destaca-se que a simbologia de chaves é inclusa para citar o que é necessário prover como dado de entrada, mas não deverá fazer parte do código.

Linha 45: `abaqus_path =[{caminho do arquivo`}]'`

Linha 46: w_dir = ['{caminho do diretório}']

Linha 47: scrp_path=[w+'{caminho do arquivo python}' for w in w_dir]

Linha 48: inp_model=[w+'{arquivo .cae do ABAQUS}' for w in w_dir]

Linha 49: ncpus_simu = {número de simuladores a serem utilizados}

Linha 50: job_name = '{inserir nome do job}'

Linha 51: work_dir = ['{diretório da saída}']

Linha 52:

Da linha 53 até a 59 são detalhadas as regras de amostragem por hipercubo latino.

Linha 53: lhs = Lhs(lhs_type="centered", criterion='maximin')

Linha 54: space = Space([(0, 1.) for x in range(34)])

Linha 55: n_samples = 170

Linha 56: x = lhs.generate(space.dimensions, n_samples, random_state=11)

Linha 57: val_init = 1

Linha 58: val_fim = n_samples/2

Linha 59:

Da linha 60 até a 101 têm-se a imposição das características das variáveis atribuídas ao modelo numérico. Sequencialmente, como proposto na linha 60, são descritas as seguintes características: valor mínimo, coeficiente de variação, valor superior e a probabilidade dos valores serem inferiores ao limite superior.

Linha 60: #[min_val, cv, val_sup, P(v<val_sup)]

Linha 61: prho_CA=[2500,0.075,2600,0.95]

Linha 62: pE_CA=[30000000000,0.1,32000000000,0.95]

Linha 63: pnu_CA=[0.2,0.05,0.25,0.95]

Linha 64:

Linha 65: prho_CP=[2400,0.075,2500,0.95]

Linha 66: pE_CP=[30500000000,0.1,32500000000,0.95]

Linha 67: pnu_CP=[0.2,0.05,0.25,0.95]

Linha 68:

Linha 69: prho_H1=[1700,0.075,1800,0.95] #Srivastava2009

Linha 70: pE_H1=[14000000,0.34,40000000,0.95] #Kayser2013,Srivastava2009

Linha 71: pnu_H1=[0.3,0.05,0.4,0.95] #Vini

Linha 72: pphi_H1=[35,0.1,40,0.95] #Kayser2013

Linha 73: pdila_H1=[1.0,0.1,2.0,0.95] #Vini

Linha 74: pcohe_H1=[10000,0.4,15000,0.95] #Vini+Kayser2013

Linha 75:

Linha 76: prho_H2=[1900,0.075,2000,0.95]

Linha 77: pE_H2=[40000000,0.34,70000000,0.95]

Linha 78: pnu_H2=[0.3,0.05,0.4,0.95]

Linha 79: pphi_H2=[40,0.1,45,0.95]

Linha 80: pdila_H2=[1.0,0.1,2.0,0.95]

Linha 81: pcohe_H2=[20000,0.4,25000,0.95]

Linha 82:

Linha 83: prho_H3=[2100,0.075,2200,0.95]

Linha 84: pE_H3=[70000000,0.34,110000000,0.95]

Linha 85: pnu_H3=[0.3,0.05,0.4,0.95]

Linha 86: pphi_H3=[45,0.1,50,0.95]

Linha 87: pdila_H3=[5,0.1,10,0.95]

Linha 88: pcohe_H3=[30000,0.4,35000,0.95]

Linha 89:

Linha 90: prho_H4=[2100,0.075,2200,0.95]

Linha 91: pE_H4=[70000000,0.34,110000000,0.95]

Linha 92: pnu_H4=[0.3,0.05,0.4,0.95]

Linha 93: pphi_H4=[45,0.1,50,0.95]

Linha 94: pdila_H4=[10,0.1,15,0.95]

Linha 95: pcohe_H4=[30000,0.4,35000,0.95]

Linha 96:

Linha 97: pk0_H1=[0.4,0.1,0.7,0.95]

Linha 98: pk0_H2=[0.4,0.1,0.7,0.95]

Linha 99: pk0_H3=[0.4,0.1,0.7,0.95]

Linha 100: pk0_H4=[0.4,0.1,0.7,0.95]

Linha 101:

Da linha 102 a 142 são geradas as funções pré-definidas, aplicadas as variáveis aleatórias.

Linha 102: rho_CA=gen_funct_SF(np.array(x).T[0],prho_CA)

Linha 103: E_CA=gen_funct_SF(np.array(x).T[1],pE_CA)

Linha 104: nu_CA=gen_funct_SF(np.array(x).T[2],pnu_CA)

Linha 105:

Linha 106: rho_CP=gen_funct_SF(np.array(x).T[3],prho_CP)

Linha 107: E_CP=gen_funct_SF(np.array(x).T[4],pE_CP)

Linha 108: nu_CP=gen_funct_SF(np.array(x).T[5],pnu_CP)

Linha 109:

Linha 110: rho_H1=gen_funct_SF(np.array(x).T[6],prho_H1)

Linha 111: E_H1=gen_funct_SF(np.array(x).T[7],pE_H1)

Linha 112: nu_H1=gen_funct_SF(np.array(x).T[8],pnu_H1)

Linha 113: phi_H1=gen_funct_SF(np.array(x).T[9],pphi_H1)

Linha 114: dila_H1=gen_funct_SF(np.array(x).T[10],pdila_H1)

Linha 115: cohe_H1=gen_funct_SF(np.array(x).T[11],pcohe_H1)

Linha 116:

Linha 117: rho_H2=gen_funct_SF(np.array(x).T[12],prho_H2)

Linha 118: E_H2=gen_funct_SF(np.array(x).T[13],pE_H2)

Linha 119: nu_H2=gen_funct_SF(np.array(x).T[14],pnu_H2)

Linha 120: phi_H2=gen_funct_SF(np.array(x).T[15],pphi_H2)

Linha 121: dila_H2=gen_funct_SF(np.array(x).T[16],pdila_H2)

Linha 122: cohe_H2=gen_funct_SF(np.array(x).T[17],pcohe_H2)

Linha 123:

Linha 124: rho_H3=gen_funct_SF(np.array(x).T[18],prho_H3)

Linha 125: E_H3=gen_funct_SF(np.array(x).T[19],pE_H3)

Linha 126: nu_H3=gen_funct_SF(np.array(x).T[20],pnu_H3)

Linha 127: phi_H3=gen_funct_SF(np.array(x).T[21],pphi_H3)

Linha 128: dila_H3=gen_funct_SF(np.array(x).T[22],pdila_H3)

Linha 129: cohe_H3=gen_funct_SF(np.array(x).T[23],pcohe_H3)

Linha 130:

Linha 131: rho_H4=gen_funct_SF(np.array(x).T[24],prho_H4)

Linha 132: E_H4=gen_funct_SF(np.array(x).T[25],pE_H4)

Linha 133: nu_H4=gen_funct_SF(np.array(x).T[26],pnu_H4)

Linha 134: phi_H4=gen_funct_SF(np.array(x).T[27],pphi_H4)

Linha 135: dila_H4=gen_funct_SF(np.array(x).T[28],pdila_H4)

Linha 136: cohe_H4=gen_funct_SF(np.array(x).T[29],pcohe_H4)

Linha 137:

Linha 138: k0_H1 = gen_funct_SF(np.array(x).T[30],pk0_H1)

Linha 139: k0_H2 = gen_funct_SF(np.array(x).T[31],pk0_H2)

Linha 140: k0_H3 = gen_funct_SF(np.array(x).T[32],pk0_H3)

Linha 141: k0_H4 = gen_funct_SF(np.array(x).T[33],pk0_H4)

Linha 142:

Da linha 143 a 153 são estabelecidas as regras de obtenção dos parâmetros para todo o intervalo de 170 amostras. Destaca-se que estão definidos dois conjuntos de valores, representando dois modelos distintos, que devem ser solucionados simultaneamente.

Linha 143: for l in range(int(val_init),int(val_fim)):

Linha 144:

Linha 145:
par_CA=[rho_CA[2*1],E_CA[2*1],nu_CA[2*1],rho_CA[2*1+1],E_CA[2*1+1],nu_CA[2*1+1]]

Linha 146:
par_CP=[rho_CP[2*1],E_CP[2*1],nu_CP[2*1],rho_CP[2*1+1],E_CP[2*1+1],nu_CP[2*1+1]]

Linha 147:
par_H1=[rho_H1[2*1],E_H1[2*1],nu_H1[2*1],phi_H1[2*1],dila_H1[2*1],cohe_H1[2*1],rho_H1[2*1+1],E_H1[2*1+1],nu_H1[2*1+1],phi_H1[2*1+1],dila_H1[2*1+1],cohe_H1[2*1+1]]

Linha 148:
par_H2=[rho_H2[2*1],E_H2[2*1],nu_H2[2*1],phi_H2[2*1],dila_H2[2*1],cohe_H2[2*1],rho_H2[2*1+1],E_H2[2*1+1],nu_H2[2*1+1],phi_H2[2*1+1],dila_H2[2*1+1],cohe_H2[2*1+1]]

Linha 149:
par_H3=[rho_H3[2*1],E_H3[2*1],nu_H3[2*1],phi_H3[2*1],dila_H3[2*1],cohe_H3[2*1],rho_H3[2*1+1],E_H3[2*1+1],nu_H3[2*1+1],phi_H3[2*1+1],dila_H3[2*1+1],cohe_H3[2*1+1]]

Linha 150:
par_H4=[rho_H4[2*1],E_H4[2*1],nu_H4[2*1],phi_H4[2*1],dila_H4[2*1],cohe_H4[2*1],rho_H4[2*1+1],E_H4[2*1+1],nu_H4[2*1+1],phi_H4[2*1+1],dila_H4[2*1+1],cohe_H4[2*1+1]]

Linha 151:
par_k0=[k0_H1[2*1],k0_H2[2*1],k0_H3[2*1],k0_H4[2*1],k0_H1[2*1+1],k0_H2[2*1+1],k0_H3[2*1+1],k0_H4[2*1+1]]

Linha 152:

Linha 153:

Da linha 154 a 162 são determinados os pares de conjunto de informações das variáveis aleatórias que serão solucionadas simultaneamente. Destaca-se que a opção por um intervalo igual a 2, descrito na Linha 161, é direcionado para possibilitar resoluções paralelas em mais de um computador, se/quando possível. Desta forma, permite-se, por exemplo, que os *Jobs* de nomeação com números pares sejam destinados a um computador, enquanto os ímpares podem ser atribuídos a outra máquina.

Linha 154: `par_CA_1,par_CA_2 = chunks(par_CA,2)`

Linha 155: `par_CP_1,par_CP_2 = chunks(par_CP,2)`

Linha 156: `par_H1_1,par_H1_2 = chunks(par_H1,2)`

Linha 157: `par_H2_1,par_H2_2 = chunks(par_H2,2)`

Linha 158: `par_H3_1,par_H3_2 = chunks(par_H3,2)`

Linha 159: `par_H4_1,par_H4_2 = chunks(par_H4,2)`

Linha 160: `par_k0_1,par_k0_2 = chunks(par_k0,2)`

Linha 161: `namjob1,namjob2=[job_name+str(j) for j in range(2)]`

Linha 162:

Da linha 163 a 188 são definidos os conjuntos de valores das variáveis aleatórias que serão utilizadas nas simulações.

Linha 163: `par1=pd.DataFrame(`

Linha 164: `{`

Linha 165: `'Material' : ['{nome dos materiais}'],`

Linha 166: `'Density(kg/m3)' : [par_CA_1[0], par_CP_1[0], par_H1_1[0], par_H2_1[0], par_H3_1[0], par_H4_1[0]],`

Linha 167: `'Young Modulus (Pa)' : [par_CA_1[1], par_CP_1[1], par_H1_1[1], par_H2_1[1], par_H3_1[1], par_H4_1[1]],`

Linha 168: `'Poisson Coefficient (-)' : [par_CA_1[2], par_CP_1[2], par_H1_1[2], par_H2_1[2], par_H3_1[2], par_H4_1[2]],`

Linha 169: `'Friction Angle (degrees)' : ['-','- ', par_H1_1[3], par_H2_1[3], par_H3_1[3], par_H4_1[3]],`

Linha 170: 'Dilantancy Angle (degrees)' : ['- ', '-', par_H1_1[4], par_H2_1[4], par_H3_1[4], par_H4_1[4]],

Linha 171: 'Cohesion (Pa)' : ['- ', '-', par_H1_1[5], par_H2_1[5], par_H3_1[5], par_H4_1[5]],

Linha 172: 'k0' : ['- ', '-', par_k0_1[0], par_k0_1[1], par_k0_1[2], par_k0_1[3]]

Linha 173: }

Linha 174:)

Linha 175:

Linha 176: par2=pd.DataFrame(

Linha 177: {

Linha 178: 'Material' : ['Concreto Armado', 'Concreto Projetado', 'Horizonte 1', 'Horizonte 2', 'Horizonte 3', 'Horizonte 4'],

Linha 179: 'Density(kg/m3)' : [par_CA_2[0], par_CP_2[0], par_H1_2[0], par_H2_2[0], par_H3_2[0], par_H4_2[0]],

Linha 180: 'Young Modulus (Pa)' : [par_CA_2[1], par_CP_2[1], par_H1_2[1], par_H2_2[1], par_H3_2[1], par_H4_2[1]],

Linha 181: 'Poisson Coefficient (-)' : [par_CA_2[2], par_CP_2[2], par_H1_2[2], par_H2_2[2], par_H3_2[2], par_H4_2[2]],

Linha 182: 'Friction Angle (degrees)' : ['- ', '-', par_H1_2[3], par_H2_2[3], par_H3_2[3], par_H4_2[3]],

Linha 183: 'Dilantancy Angle (degrees)' : ['- ', '-', par_H1_2[4], par_H2_2[4], par_H3_2[4], par_H4_2[4]],

Linha 184: 'Cohesion (Pa)' : ['- ', '-', par_H1_2[5], par_H2_2[5], par_H3_2[5], par_H4_2[5]],

Linha 185: 'k0' : ['- ', '-', par_k0_2[0], par_k0_2[1], par_k0_2[2], par_k0_2[3]]

Linha 186: }

Linha 187:)

Linha 188:

Da linha 189 a 202 impõe-se os dados de entrada sintetizados para o início do exercício do programa numérico.

Linha 189: cmds = [[abaqus_path,

Linha 190: 'cae', '-noGUI',scrp_path[0], '--',w_dir[0],

Linha 191: inp_model[0],str(par_CA_1),

Linha 192: str(par_CP_1),str(par_H1_1),

Linha 193: str(par_H2_1),str(par_H3_1),

Linha 194: str(par_H4_1),str(par_k0_1),str(ncpus_simu),namjob1],

Linha 195: [abaqus_path,

Linha 196: 'cae', '-noGUI',scrp_path[1], '--',w_dir[1],

Linha 197: inp_model[1],str(par_CA_2),

Linha 198: str(par_CP_2),str(par_H1_2),

Linha 199: str(par_H2_2),str(par_H3_2),

Linha 200: str(par_H4_2),str(par_k0_2),str(ncpus_simu),namjob2]

Linha 201:]

Linha 202:

Da linha 203 a 206 é proposta a regra de início do processamento dos *Jobs*.

Linha 203: procs=[subprocess.Popen(cmds[i], cwd=work_dir[i]) for i in range(len(cmds))]

Linha 204: for p in procs:

Linha 205: p.wait()

Linha 206:

Da linha 207 a 221 são definidos os dados de resposta que o usuário quer trabalhar e que sejam sintetizados em uma planilha eletrônica.

Linha 207: outps=pd.read_csv(w_dir[0]+'Reports\\'+namjob1+'_report.csv', sep=',',encoding = "ISO-8859-1")

Linha 208: `ndf=outps[outps.columns[[3,4,5,6,7,11,12,13,14,15,16,17,18,19]]]`

Linha 209:

Linha 210: `with pd.ExcelWriter(w_dir[0]+'SReports\\Simu_'+str(2*1)+'.xlsx') as writer:`

Linha 211: `ndf.to_excel(writer, sheet_name='Results')`

Linha 212: `par1.to_excel(writer, sheet_name='Parameters')`

Linha 213:

Linha 214: `outps=pd.read_csv(w_dir[1]+'Reports\\'+namjob2+'_report.csv', sep=',',encoding = "ISO-8859-1")`

Linha 215: `ndf=outps[outps.columns[[3,4,5,6,7,11,12,13,14,15,16,17,18,19]]]`

Linha 216:

Linha 217: `with pd.ExcelWriter(w_dir[1]+'SReports\\Simu_'+str(2*1+1)+'.xlsx') as writer:`

Linha 218: `ndf.to_excel(writer, sheet_name='Results')`

Linha 219: `par2.to_excel(writer, sheet_name='Parameters')`

Linha 220:

Linha 221:

Da linha 222 a 228 propõe-se uma rotina que otimiza o espaçamento requerido para armazenamento dos dados. Isso porque, ao considerar o elevado consumo de memória dos modelos numéricos, o código propõe uma remoção automática dos arquivos após consumir os dados que importam para a presente tese.

Linha 222: `for wdr in work_dir:`

Linha 223: `for x in os.listdir(wdr):`

Linha 224: `os.remove(wdr+x)`

Linha 225:

Linha 226: `for wdrn in w_dir:`

Linha 227: `for x in os.listdir(wdrn+'Reports\\'):`

Linha 228: `os.remove(wdrn+'Reports\\'+x)`

A.4.2 CÓDIGO PARA SER EXECUTADO NO PROGRAMA ABAQUS

A primeira etapa do código, da linha 1 a 7, são definidos os provedores de informações de onde dados serão importados.

Linha 1: # -*- coding: utf-8 -*-

Linha 2:

Linha 3: import sys

Linha 4:

Linha 5: from abaqus import *

Linha 6: from abaqusConstants import *

Linha 7:

Da linha 8 a 25 são propostas as informações que se desejam consumir dos provedores de informações definidos no passo anterior.

Linha 8: import section

Linha 9: import regionToolset

Linha 10: import displayGroupMdbToolset as dgm

Linha 11: import part

Linha 12: import material

Linha 13: import assembly

Linha 14: import step

Linha 15: import interaction

Linha 16: import load

Linha 17: import mesh

Linha 18: import optimization

Linha 19: import job

Linha 20: import sketch

Linha 21: import visualization

Linha 22: import xyPlot

Linha 23: import displayGroupOdbToolset as dgo

Linha 24: import connectorBehavior

Linha 25:

Da linha 26 a 97 são impostas as propriedades dos materiais, fundamentado no previamente estabelecido pelo código exposto na Seção A.4.1.

Linha **26:** **def**
Gen_CAE_Run(w_dir,inp_template,par_CA,par_CP,par_H1,par_H2,par_H3,par_H4,par_k0,
ncpu,namjob):

Linha 27: openMdb(pathName=inp_template)

Linha 28:

Linha 29: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials['{nome do material}'].density.setValues(table=((

Linha 30: par_CA[0],),))

Linha 31: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 32: par_CA[1], par_CA[2]),))

Linha 33: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((

Linha 34: par_CP[0],),))

Linha 35: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 36: par_CP[1], par_CP[2]),))

Linha 37:

Linha 38: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials['Horizonte 1'].density.setValues(table=((par_H1[0],

Linha 39:),))

Linha 40: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 41: par_H1[1], par_H1[2]),))

Linha 42: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H1[0],

Linha 43:),))

Linha 44: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 45: par_H1[1], par_H1[2]),))

Linha 46: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.setValues(

Linha 47: table=((par_H1[3], par_H1[4]),))

Linha 48: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}'].mohrCoulombPlasticity.mohrCoulombHardening.setValues(

Linha 49: table=((par_H1[5], 0.0),))

Linha 50: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.TensionCutOff(

Linha 51: temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((0.0, 0.0),))

Linha 52:

Linha 53: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H2[0],

Linha 54:),))

Linha 55: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 56: par_H2[1], par_H2[2]),))

Linha 57: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H2[0],

Linha 58:),))

Linha 59: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 60: par_H2[1], par_H2[2]),))

Linha 61: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.setValues(

Linha 62: table=((par_H2[3],par_H2[4]),))

Linha 63: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.mohrCoulombHardening.setValues(

Linha 64: table=((par_H2[5], 0.0),))

Linha 65: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.TensionCutOff(

Linha 66: temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((0.0, 0.0),))

Linha 67:

Linha 68: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H3[0],

Linha 69:),))

Linha 70: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 71: par_H3[1], par_H3[2]),))

Linha 72: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H3[0],

Linha 73:),))

Linha 74: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 75: par_H3[1], par_H3[2]),))

Linha 76: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.setValues(

Linha 77: table=((par_H3[3], par_H3[4]),))

Linha 78: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.mohrCoulombHardening.setValues(

Linha 79: table=((par_H3[5], 0.0),))

Linha 80: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.TensionCutOff(

Linha 81: temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((0.0, 0.0),))

Linha 82:

Linha 83: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H4[0],

Linha 84:),)

Linha 85: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].elastic.setValues(table=((

Linha 86: par_H4[1], par_H4[2]),)

Linha 87: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].density.setValues(table=((par_H4[0],

Linha 88:),)

Linha 89: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials['Horizonte 4-MC'].elastic.setValues(table=((

Linha 90: par_H4[1], par_H4[2]),)

Linha 91: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.setValues(

Linha 92: table=((par_H4[3], par_H4[4]),)

Linha 93: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.mohrCoulombHardening.setValues(

Linha 94: table=((par_H4[5], 0.0),)

Linha 95: mdb.models['{nome do arquivo}'].materials[{nome do material}].mohrCoulombPlasticity.TensionCutOff(

Linha 96: temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((0.0, 0.0),)

Linha 97:

Da linha 98 a 106 é proposta a regra de cálculo da condição geostática do modelo, considerando as variações nas propriedades.

Linha 98: mdb.models['{nome do arquivo}'].predefinedFields['IC-1'].setValues(stressMag1=0.0,

Linha 99: vCoord1=0.0, stressMag2=-9.81*par_H1[0]*15, vCoord2=-15.0, lateralCoeff1=par_k0[0])

Linha 100: mdb.models['{nome do arquivo}'].predefinedFields['IC-2'].setValues(stressMag1=-9.81*par_H1[0]*15,

Linha 101: vCoord1=-15.0, stressMag2=-9.81*(par_H1[0]+par_H2[0])*15, vCoord2=-30.0, lateralCoeff1=par_k0[1])

Linha 102: mdb.models['{nome do arquivo}'].predefinedFields['IC-3'].setValues(stressMag1=-9.81*(par_H1[0]+par_H2[0])*15,

Linha 103: vCoord1=-30.0, stressMag2=-9.81*(par_H1[0]+par_H2[0]+par_H3[0])*15, vCoord2=-45.0, lateralCoeff1=par_k0[2])

Linha 104: mdb.models['{nome do arquivo}'].predefinedFields['IC-4'].setValues(stressMag1=-9.81*(par_H1[0]+par_H2[0]+par_H3[0])*15,

Linha 105: vCoord1=-45.0, stressMag2=-9.81*(par_H1[0]+par_H2[0]+par_H3[0]+par_H4[0])*15, vCoord2=-60.0, lateralCoeff1=par_k0[3])

Linha 106:

Da linha 98 a 116 são descritas as opções propostas pelo *Job*.

Linha 107: mdb.Job(name=namjob, model='{nome do arquivo}', description="", type=ANALYSIS,

Linha 108: atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,

Linha 109: memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,

Linha 110: explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,

Linha 111: modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine="",

Linha 112: scratch="", resultsFormat=ODB, multiprocessingMode=DEFAULT, numCpus=ncpu,

Linha 113: numDomains=ncpu, numGPUs=0)

Linha 114:

Linha 115: mdb.jobs[namjob].submit(consistencyChecking=OFF)

Linha 116:

Da linha 117 a 153 são referenciados os *Steps* do modelo numérico a que os resultados são requeridos. Ademais, impõe-se as informações que são desejadas pelo autor para as análises propostas nesta tese.

Linha 117: odbloc=w_dir+'RunSimu\\'+str(namjob)+'.odb'

Linha 118: reportoutp=w_dir+'Reports\\'+str(namjob)+'_report.csv'

Linha 119: session.mdbData.summary()

Linha 120: o1 = session.openOdb(name=odbloc)

Linha 121: session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=o1)

Linha 122:

Linha 123: frames = o1.steps['EscavS243CP'].frames

Linha 124: numFrames = len(frames)

Linha 125: stepsv = o1.steps

Linha 126: numsteps = len(stepsv)

Linha 127:

Linha 128: odb = session.odbs[odbloc]

Linha 129:

Linha 130: session.fieldReportOptions.setValues(reportFormat=COMMA_SEPARATED_VALUES)

Linha 131: session.writeFieldReport(fileName=reportoutp, append=OFF,

Linha 132: sortItem='Node Label', odb=odb, step=numsteps-1, frame=numFrames-1,

Linha 133: outputPosition=NODAL, variable=((U, NODAL, (COMPONENT, 'U1'), (

Linha 134: COMPONENT, 'U2'), (COMPONENT, 'U3'),)), ('S', INTEGRATION_POINT, ((

Linha 135: COMPONENT, 'S11'), (COMPONENT, 'S22'), (COMPONENT, 'S33'), (COMPONENT,

Linha 136: 'S12'), (COMPONENT, 'S13'), (COMPONENT, 'S23'),),),

Linha 137: stepFrame=SPECIFY)

Linha 138:

Linha 139: if __name__ == "__main__":

Linha 140:

Linha 141: w_dir = sys.argv[-11]

Linha 142: inp_template = sys.argv[-10]

Linha 143: par_CA = [float(x) for x in (sys.argv[-9]).strip('[]').split(',')]

Linha 144: par_CP = [float(x) for x in (sys.argv[-8]).strip('[]').split(',')]

Linha 145: par_H1 = [float(x) for x in (sys.argv[-7]).strip('[]').split(',')]

Linha 146: par_H2 = [float(x) for x in (sys.argv[-6]).strip('[]').split(',')]

Linha 147: par_H3 = [float(x) for x in (sys.argv[-5]).strip('[]').split(',')]

Linha 148: par_H4 = [float(x) for x in (sys.argv[-4]).strip('[]').split(',')]

Linha 149: par_k0 = [float(x) for x in (sys.argv[-3]).strip('[]').split(',')]

Linha 150: ncpu = int(sys.argv[-2])

Linha 151: namjob = sys.argv[-1]

Linha 152:

Linha **153:**
Gen_CAE_Run(w_dir,inp_template,par_CA,par_CP,par_H1,par_H2,par_H3,par_H4,par_k0,
ncpu,namjob)