



**ISABEL MOTTA CARVALHO
JÔNATAN MANOEL DE CASTRO**

**ESTIMATIVAS NUMÉRICA E ANALÍTICA DE RECALQUES DISTORCIONAIS
EM EDIFICAÇÃO DEVIDOS A ESCAVAÇÃO DE TÚNEL EM DIFERENTES
POSIÇÕES HORIZONTAIS**

**LAVRAS – MG
2022**

**ISABEL MOTTA CARVALHO
JÔNATAN MANOEL DE CASTRO**

**ESTIMATIVAS NUMÉRICA E ANALÍTICA DE RECALQUES DISTORCIONAIS
EM EDIFICAÇÃO DEVIDOS A ESCAVAÇÃO DE TÚNEL EM DIFERENTES
POSIÇÕES HORIZONTAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

**Prof^ª: Raquel Mariano Linhares, D. Sc.
Orientadora**

**LAVRAS - MG
2022**

**ISABEL MOTTA CARVALHO
JÔNATAN MANOEL DE CASTRO**

**ESTIMATIVAS NUMÉRICA E ANALÍTICA DE RECALQUES DISTORCIONAIS
EM EDIFICAÇÃO DEVIDOS A ESCAVAÇÃO DE TÚNEL EM DIFERENTES
POSIÇÕES HORIZONTAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 03 de maio de 2022.
Raquel Mariano Linhares UFLA
Eduardo Souza Candido UFLA
Diego Arthur Hartmann UNIPAMPA



Prof^ª: Raquel Mariano Linhares, D. Sc.
Orientadora

**LAVRAS - MG
2022**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, por nos proporcionar um ensino de excelência ao longo desta graduação.

À professora Raquel Mariano Linhares, pela orientação, paciência, e sobretudo a amizade que construímos.

Aos professores que participaram da nossa formação, obrigado pelo ensino e conhecimento compartilhado.

Aos nossos amigos, que nos acompanharam em todos os momentos ao longo destes anos, em especial o João Paulo, que sempre esteve presente. Foi um enorme prazer estudar e dividir experiências com vocês.

Por fim um agradecimento especial aos nossos pais, por todo o tempo, carinho e confiança depositados em nós.

Muito obrigado!

RESUMO

O presente trabalho apresenta a comparação entre os métodos de escavação TBM e NATM, com enfoque nos recalques distorcionais produzidos pela escavação de um túnel em regiões com fundações pré-existentes. Para a construção do objeto de estudo, os modelos numéricos utilizados foram construídos através de um *software* de Elementos Finitos em duas dimensões, específico para uso em geotecnia. Também foi feita a comparação entre o método numérico e método analítico. Os resultados apontam para um comportamento similar entre os métodos de escavação, com mesmas distâncias entre eixos (d) para pontos críticos e para as situações mais seguras da escavação. Interessantemente neste trabalho o método NATM apresentou recalques menores que o TBM para as simulações numéricas. Já na comparação entre estimativa numérica e analítica, o método analítico mostrou-se mais conservado em relação ao método numérico, porém mais limitado por usar parâmetros semi-empíricos.

Palavras-Chaves: Túneis. Análise numérica. Método analítico. Recalque.

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Recalque total (ou absoluto)
δ	Recalque diferencial (ou relativo)
β	Recalque diferencial específico também chamado de distorção angular ou recalque distorcional
γ	Peso específico
γ_{sat}	Peso específico saturado
c	Coesão
Φ	Ângulo de atrito
Ψ	Ângulo de dilatação
E	Módulo de elasticidade Young
K_0	Coefficiente de empuxo do solo
ν	Coefficiente de Poisson
EA	Rigidez normal
EI	Rigidez a flexão
\underline{d}	Espessura equivalente
w	Peso
\underline{L}	Espaçamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1	MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS	2
2.3	RECALQUES EM SUPERFÍCIE DEVIDOS A ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS	8
2.4	RECALQUES EM FUNDAÇÕES.....	12
2.5	<i>SOFTWARES</i> DE ENGENHARIA.....	15
3	METODOLOGIA.....	17
3.1	MÉTODO NUMÉRICO	17
3.2	COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS NUMÉRICAS E ANALÍTICAS DE RECALQUES	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1	ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	25
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS NUMÉRICAS E ANALÍTICAS DE RECALQUES	28
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

Dentre os possíveis eventos na etapa pós-construtiva de uma edificação, podemos citar a movimentação do maciço onde está apoiada a construção como uma das condições mais recorrentes. Essa movimentação pode ser causada por fatores internos, como o peso próprio da edificação, além de condições externas, como construções nos terrenos vizinhos, escavações, rebaixamento ou ascensão do lençol freático, explosões, demolições, vibrações, entre outras causas que podem gerar perturbação nas fundações já existentes (MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID, 2015).

Com o crescimento populacional, muitas pessoas têm migrado para morar e trabalhar em grandes centros urbanos mundiais, que vêm concentrando números populacionais excessivos e de maneira cada vez mais congestionada. As escavações subterrâneas trazem soluções eficientes para atender às demandas geradas pelo desenvolvimento sócio-econômico, como encurtar distâncias, desafogar o trânsito, transportar cargas, infraestruturas e utilidades (água, esgoto, rede elétrica, gás, redes de dados e telecomunicação), estética e preservação ambiental (ASSIS, 2002).

Contudo, as escavações de túneis podem gerar grandes impactos e problemas em seu entorno. Segundo Toffoli (2018), um destes principais impactos se dá na integridade das estruturas em superfície. Quando um projeto não leva em consideração os estudos de campo necessários e as condições apropriadas de escavação, a construção do túnel em áreas urbanizadas pode produzir recalques em superfície capazes de gerar problemas estéticos, funcionais e até mesmo estruturais nas edificações. Logo se faz importante entender e prever esses mecanismos de recalques.

Neste trabalho, foram estudados os recalques absolutos, diferenciais e distorcionais em uma edificação na superfície advindos da escavação de um túnel subterrâneo, por meio de análises numéricas e analíticas. Variaram-se as distâncias entre os eixos da escavação e da edificação, a estratigrafia e o método de escavação do túnel. Ao fim, embasados na literatura, ponderou-se quais fatores ligados à estratigrafia e à escavação propriamente dita podem influenciar nos danos observados nas edificações superficiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

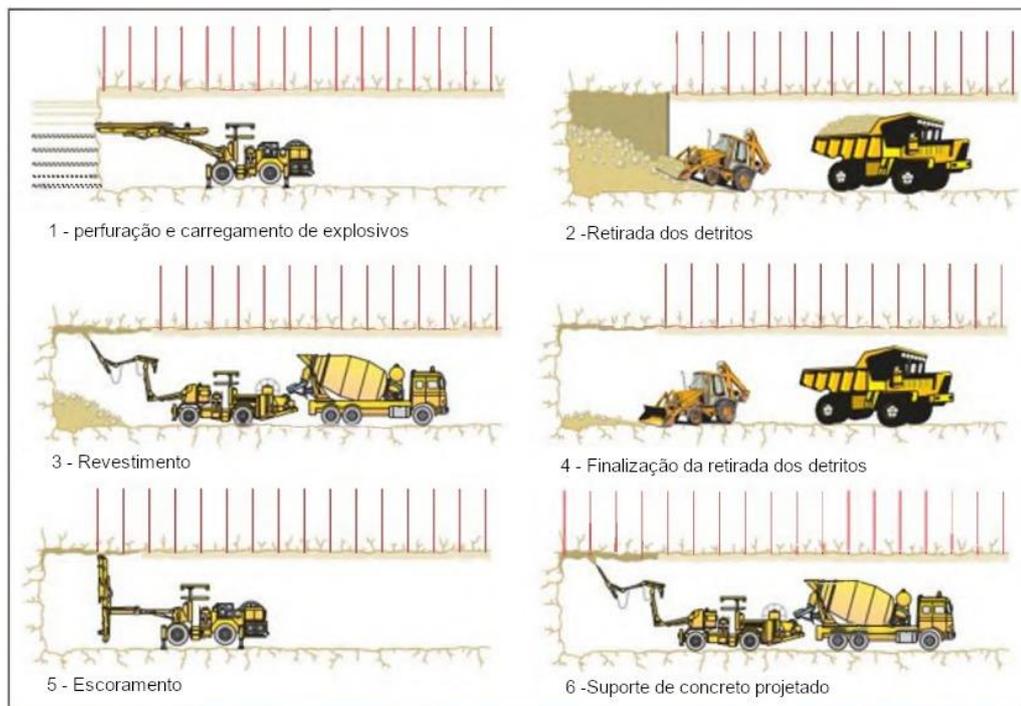
2.1 Métodos de escavação de túneis

As obras subterrâneas civis podem ser divididas em obras de túneis, poços, cavernas, acessos e galerias. São construções que necessitam de métodos construtivos diferentes de escavações a céu aberto. Os métodos de escavações subterrâneas para túneis podem ser divididos em dois grupos: escavações a fogo e mecanizada, a depender da categoria do material. As escavações mecânicas, por sua vez, podem se dar por maquinário comum (como escavadeiras e retroescavadeiras) ou por autoperfuratrizes desenvolvidas especificamente para escavação de túneis (as tuneladoras – TBM).

2.1.1. Escavação a fogo

O método de escavação a fogo consiste no uso de explosivos para criar a abertura do túnel. Resumidamente, os explosivos são instalados em pontos estratégicos com a ajuda de marteletes para a perfuração das rochas, e conectados entre si para que seja feito o acionamento da detonação de maneira simultânea. Após as explosões, é necessário ventilar o túnel para expulsar os gases provindos dos explosivos, sendo a remoção dos detritos feita logo após. Em alguns casos se faz necessário o escoramento das paredes laterais e teto, para evitar possíveis desabamentos (SILVA, 2018) (Figura 1).

Figura 1 – Processo de escavação a fogo.



Fonte: Adaptado GONZÁLEZ DE VALLEJO et al., (2002).

Os explosivos usados para criar as aberturas de túneis são produtos químicos compostos de um combustível e um oxidante onde sua reação possui um grande poder destrutivo. Sua explosão pode ocorrer de dois modos: através de detonação para grandes serviços desmontantes ou deflagração para pequenos serviços (OLIVEIRA e BRITO, 1998). Na detonação a reação química ocorre de maneira rápida e com velocidade constante e o explosivo consegue liberar o máximo de energia possível. Para a detonação, é possível encontrar no mercado: dinamites, nitrato de amônia, lamas explosivas e emulsões (OLIVEIRA e BRITO, 1998). Na deflagração, a reação química também ocorre de maneira muito rápida, contudo com velocidade crescente. Para esse tipo de explosão encontramos no mercado a pólvora (MARTINHO, 2012).

A escavação a fogo tem como principal vantagem a fragmentação do maciço. Em contrapartida, tem como desvantagens os ruídos, gases, poeira e vibrações induzidas com o uso de explosivos, que podem gerar danos às estruturas lindeiras à obra e incômodos à população. Também apresenta limitação de seu uso em locais como gasodutos, ferrovias, estradas, pontes, minas, locais de armazenamento de produtos de risco, entre outros (GUIMARÃES, 2018).

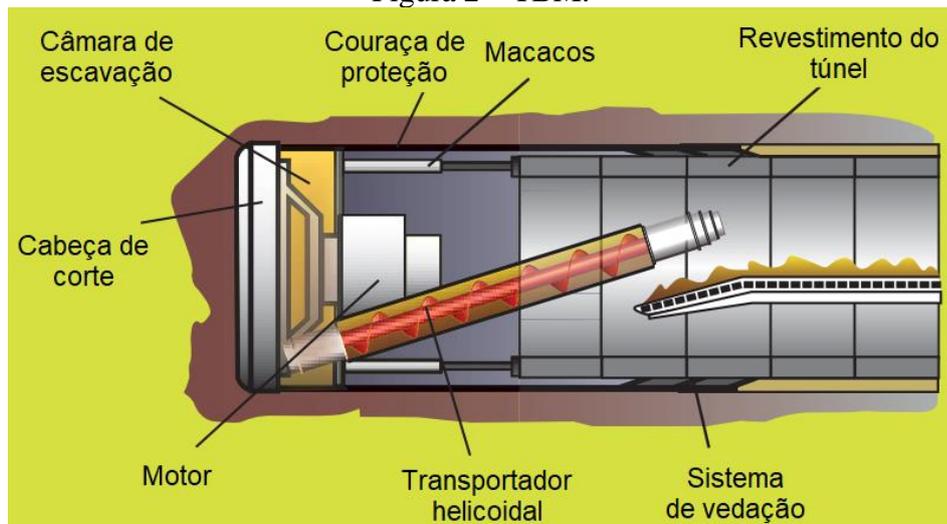
Embora o método de escavação a fogo seja um dos mais utilizados, escavações mecânicas estão ficando mais comuns e podem ser mais econômicas por serem mais rápidas e menos desconfortáveis se comparadas às primeiras. Segundo Oliveira e Brito (1998), maciços cuja resistência da rocha intacta não ultrapassa 30 MPa podem ser escavados por escarificação mecânica.

2.1.2. TBM

As autoperfuratrizes de grande diâmetro (também conhecidas por TBMs – *Tunnel Boring Machines*) possuem capacidade para escavar túneis com até 10 m de diâmetro e podem ser tão econômicas quanto as escavações a fogo tradicionais. Para isso, devem-se considerar as propriedades e características geomecânicas do maciço, problemas estruturais que podem ocorrer e os tipos de subsolo. O método TBM possui vantagens como poder trabalhar em quaisquer condições geológicas, acima ou abaixo de lençóis freáticos assim como a escavação em locais urbanos, em que não há interferência no tráfego da superfície (SILVA, 2018).

O funcionamento de um TBM é dado por uma frente de escavação composta por um sistema de corte rotativo. Esse sistema rompe o material na face do túnel, que é, então, transferido por uma correia transportadora localizada no centro da máquina, para a traseira da tuneladora. A frente de escavação da tuneladora pode ser pressionada por diversos métodos, como, por exemplo, cilindros hidráulicos. Um revestimento em aduelas de concreto segmentadas é instalado, onde a máquina se apoia para prosseguir com a escavação.

Figura 2 – TBM.



Fonte: Adaptado de GUGLIELMETTI et al. (2007).

2.1.3. NATM

As escavações a fogo ou mecânicas utilizando maquinário comum hoje são realizadas seguindo os preceitos do NATM (*New Austrian Tunneling Method* – Novo Método Austríaco de Tunelamento), que parte de uma série de princípios que norteiam a escavação de túneis em maciços de rochas brandas, cuja resistência não ultrapasse cerca de 20 MPa. O método se tornou popular por apresentar uma metodologia inovadora e vantagens econômicas.

Murakami (2001), lista no quadro abaixo os quinze mais importantes conceitos do método NATM (Quadro 1).

Chama-se atenção para os Conceitos 1, 3, 4, 6, 7 e 11. A parcialização da seção, que possibilita a construção de túneis com geometria não circular (RABCEWICZ, 1964), aplicada quando a seção plena de escavação pode ficar comprometida. Assim, a escavação pode ser feita em duas seções com arco invertido provisório (Figura 3) ou com mais de duas seções (OLIVEIRA e BRITO, 1998). Geralmente o avanço é escalonado começando pela **calota** – parte superior do túnel (teto), seguido da escavação do **núcleo** - seção central da escavação, **side-drifts** – laterais do túnel, e por fim a escavação do **arco invertido** – parte inferior (piso) da seção escavada (CHAPMAN et al., 2017) (Figura 4).

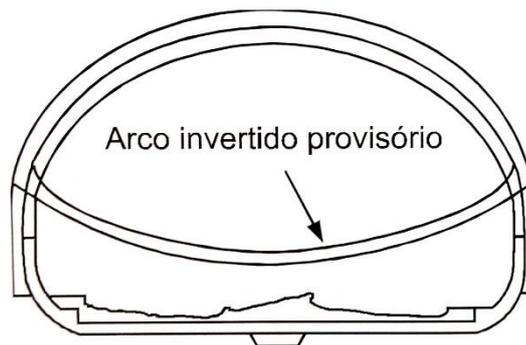
Quadro 1 – Conceitos do NATM segundo Murakami (2001).

Conceitos do NATM	
Conceito 1	Através do alívio de tensões, o maciço circundante ao túnel que inicialmente atua como elemento de carregamento passa a participar do suporte.
Conceito 2	Preservar a qualidade do maciço circundante tanto quanto possível com cuidados durante a escavação e aplicação do suporte, evitando o início de um processo de deterioração do maciço.
Conceito 3	Impedir a deformação excessiva do maciço de forma que ela perca a capacidade de auto suporte passando a constituir um carregamento sobre o suporte.
Conceito 4	Trabalhando-se com deformações compatíveis com o maciço a capacidade autoportante é conservada passando este a trabalhar como um elemento portante.
Conceito 5	Caracterizar geológica e geotecnicamente o maciço de forma a se obter o máximo subsídio na definição do melhor método construtivo e para o dimensionamento do sistema de suporte e do revestimento.
Conceito 6	Adequar a parcialização da frente de escavação em função do comportamento do maciço, do tempo de auto sustentação, da deformabilidade do material e dos equipamentos disponíveis.
Conceito 7	Utilizar o suporte adequado em termos de resistência e deformabilidade no momento certo, tirando partido da capacidade de auto suporte do maciço.
Conceito 8	Não devem ser deixados espaços vazios entre o suporte e o maciço que permitam o desagregamento do material e conseqüente perda da capacidade de auto-suporte
Conceito 9	Utilizar-se de elementos de suporte (concreto projetado, telas, ancoragens e cambotas) necessários e suficientes para impor tensões confinantes que equilibrem a abertura mantendo as deformações em níveis aceitáveis.
Conceito 10	Manter o fechamento do arco invertido definitivo em distâncias compatíveis com a capacidade de carga da calota aberta e o mais próximo possível da frente de escavação.
Conceito 11	Definir uma seção de escavação com a menor área possível.
Conceito 12	Conceber formas que privilegiem o equilíbrio dos carregamentos predominantemente por esforços de compressão, ou seja, procurar formas arredondadas.
Conceito 13	Realizar o acompanhamento das deformações através de instrumentação, cujas leituras servirão para subsidiar as revisões e otimizações do processo construtivo e do projeto, além de permitir o monitoramento da segurança da obra.
Conceito 14	O acompanhamento das instrumentações deve indicar a total estabilização dos deslocamentos após a conclusão do suporte e do revestimento.
Conceito 15	Drenar o maciço sempre que a presença da água possa provocar algum dano ou mecanismo que ponha em risco a obra e o local de trabalho.

Fonte: MASCARENHAS (2014).

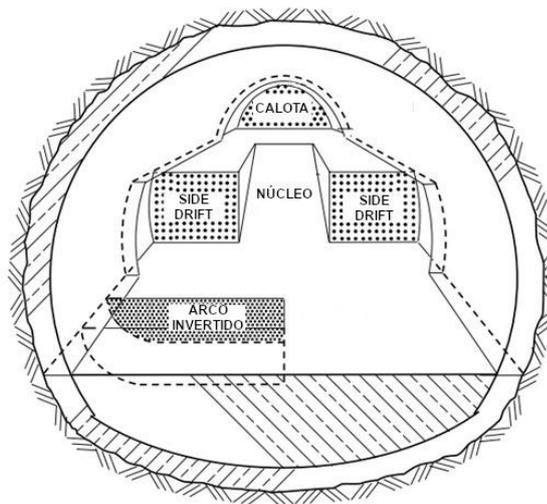
Outro conceito importante do NATM é o de redistribuição e alívio de tensões máximas do contorno escavado. Este alívio se dá pela atuação do maciço como principal suporte da estrutura e não somente como carregamento (RABCEWICZ, 1964). Para que isso ocorra, a instalação do revestimento deve ser aplicada no momento certo para que a transferência de esforços entre maciço e revestimento não gere afrouxamento do primeiro, mantendo assim sua resistência (CHAPMAN et al., 2017).

Figura 3 – Parcialização da seção do túnel: arco invertido provisório.



Fonte: OLIVEIRA e BRITO (1998).

Figura 4 – Parcialização da seção do túnel: múltiplas seções.



Fonte: Adaptado CHAPMAN et al. (2017).

2.1.4. Comparação entre recalques gerados pelos métodos TBM e NATM

As escavações mecanizadas por tuneladoras apresentam um controle da pressão aplicada em sua frente de escavação, além de terem um tempo de instalação do suporte reduzido em relação aos outros métodos. Logo, se os parâmetros de escavação forem bem definidos, os recalques superficiais gerados pelo método TBM são mínimos. Para a escavação por TBM é possível destacar alguns fatores particulares que podem contribuir em recalques elevados, como: alteração da estrutura de solos granulares devido a vibração da tuneladora, o que pode

ocasionar em compactação do solo em casos de areias fofas; suporte insuficiente para evitar deformações na frente de escavação; movimento radial do solo antes da instalação dos anéis de revestimento; volume ou pressões de groute insuficiente para preencher o espaço anelar (AGUIAR, 2017).

Já no método NATM, são esperados níveis maiores de recalques superficiais, em função do tempo necessário para a instalação de suportes primários e de fechamento da seção escavada pelo suporte permanente, além do alívio de tensões no maciço advindo da escavação não ser pressurizada, resultando em maiores deformações naturais no solo. Para o NATM, ainda há o adensamento provocado pela necessidade do rebaixamento do nível d'água para túneis escavados abaixo do lençol freático, fator que não é indispensável em escavações por TBM (AGUIAR, 2017).

2.2 Custos de execução de túneis

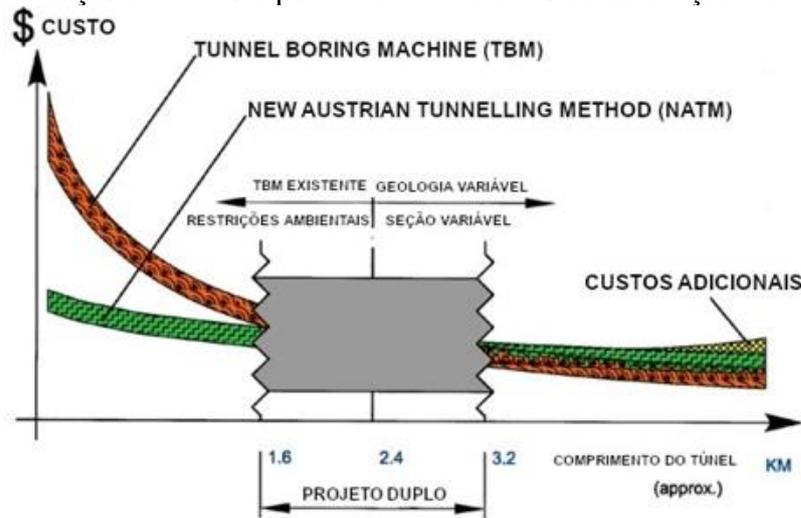
Juntamente com o tipo de subsolo, o custo da obra é um dos principais aspectos que influenciam a escolha do método de escavação na construção de túneis. A depender do material a ser escavado, cada método oferece vantagens e desvantagens e uma determinada confiabilidade.

No NATM existe uma vasta quantidade de recursos técnicos para a execução do projeto, o que permite a escavação do túnel em praticamente qualquer condição do solo com segurança. (KOCHEN, 2014 *apud* GUIMARÃES, 2018). Como vantagens, escavações parciais de seção conferem maior estabilidade à frente de escavação em relação às escavações em seção cheia, além de sua adaptabilidade a seções não circulares e o baixo custo de investimentos por não exigir mecânicas complexas (GOMES, 2008).

A execução de túneis por TBM apresenta vantagens pela automatização do processo de escavação com alta taxa de avanço, segurança aos operadores, menos necessidades de tratamentos do terreno, e minimização dos problemas com água. Em contrapartida, o uso do TBM apresenta um investimento financeiro elevado devido ao alto custo dos equipamentos, que são construídos de forma específica para cada túnel escavado (diâmetro e subsolo), além da dificuldade de transporte do equipamento, a ocupação de grandes áreas de armazenamento, a obrigatoriedade da seção do túnel ser circular e não variável (GOMES, 2008).

SAUER (2003) comparou os custos dos métodos construtivos TBM e NATM (Figura 5) e verificou que o TBM apresenta grande desvantagem econômica em túneis com extensões menores que 1,6 km. A partir de 3,2 km, ambos os métodos apresentam custos semelhantes (ESTANQUEIRO e SALVI, 2020).

Figura 5 – Relação entre custo por km entre métodos de escavação TBM e NATM.



Fonte: Adaptado SAUER (2003).

2.3 Recalques em superfície devidos a escavações de túneis

Segundo Guglielmetti et al. (2007), a escavação de um túnel sem suporte causa uma diminuição de tensões e, conseqüentemente, um deslocamento do maciço em direção ao vazio criado. Sendo assim, torna-se necessário retirar mais solo do que o volume final do túnel. Esse volume excedente é chamado “perda de volume” ou V_L (*volume loss*) que é calculado em relação à área da seção transversal e à taxa de avanço da escavação. Essa perda de volume de solo em profundidade é propagada até a superfície, manifestando-se como recalque (V_S). Geralmente, $V_L \approx V_S$.

Estes recalques podem ser devidos à escavação do túnel propriamente dita, dependendo de fatores como velocidade do avanço, estabilidade da face do túnel, tempo entre a escavação do túnel e a instalação do suporte, ou devidos à deformação do revestimento/reforço do túnel, que geralmente ocorrem em escavações de túneis com grande diâmetro e profundidades menores.

Segundo HOEK (2007) a execução de um túnel causa uma redistribuição de tensões no solo onde é comum admitir que atinjam um raio de 3 a 5 vezes o raio de escavação. Essa distância é chamada de diâmetro de perturbação (D_{pert}). Fora deste campo as tensões se tornam insignificantes.

Teoria de previsão de recalques

O recalque de superfície é um problema essencialmente tridimensional. Para uma análise bidimensional, deve-se dividir em recalque longitudinal, que ocorre no eixo da face do túnel, e recalque transversal, que ocorre na seção transversal do túnel.

Peck (1969) partiu do pressuposto de que o perfil transversal de recalques segue uma curva gaussiana semi-empírica; O recalque transversal máximo ($S_{m\acute{a}x}$) ocorre acima do eixo do túnel e pode ser calculado conforme Equação 1.

$$S = S_{m\acute{a}x} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) = \frac{V_L}{i\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad \text{Equação 1}$$

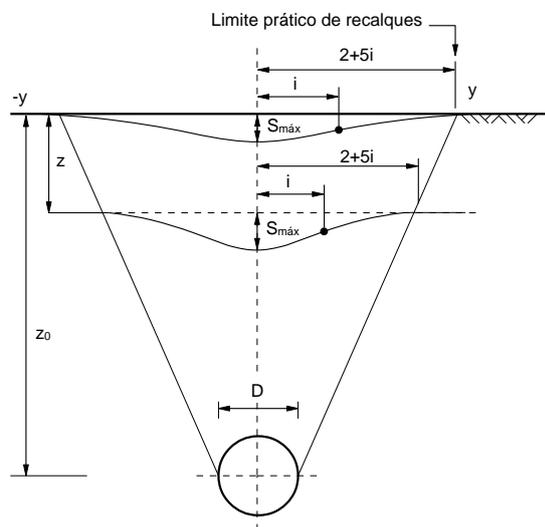
onde:

i é o ponto de inflexão da curva gaussiana;

V_L é a perda de volume;

y é o limite prático transversal da influência da escavação, na profundidade analisada.

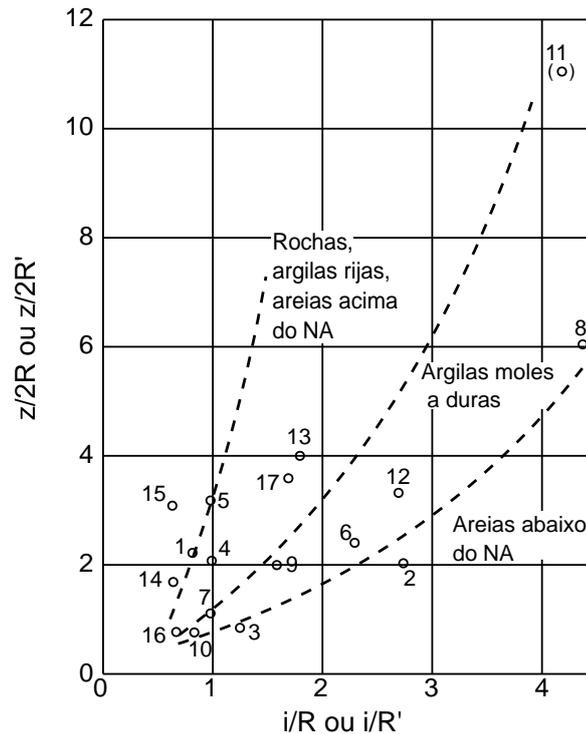
Figura 6 - Recalques transversais.



Fonte: GUGLIELMETTI et al. (2007).

O ponto de inflexão “ i ” é calculado como $i = k \cdot z_0$, sendo z_0 a profundidade do eixo do túnel em relação à superfície estudada e k um fator de correlação empírico.

Peck (1969) apresentou um ábaco empírico (Figura 7) para a determinação do parâmetro i , que é função da profundidade do eixo da escavação (z), do raio da escavação (R) e do tipo do subsolo. O autor também afirmou que, em superfície ($y = 0$), os recalques às distâncias de i e $2i$ são, respectivamente, $0,61 \cdot S_{m\acute{a}x}$ e $0,13 \cdot S_{m\acute{a}x}$, e que o recalque total (V_S) pode ser calculado como $V_S = 2,5 \cdot i \cdot S_{m\acute{a}x}$.

Figura 7 - Ábaco para determinação de i .

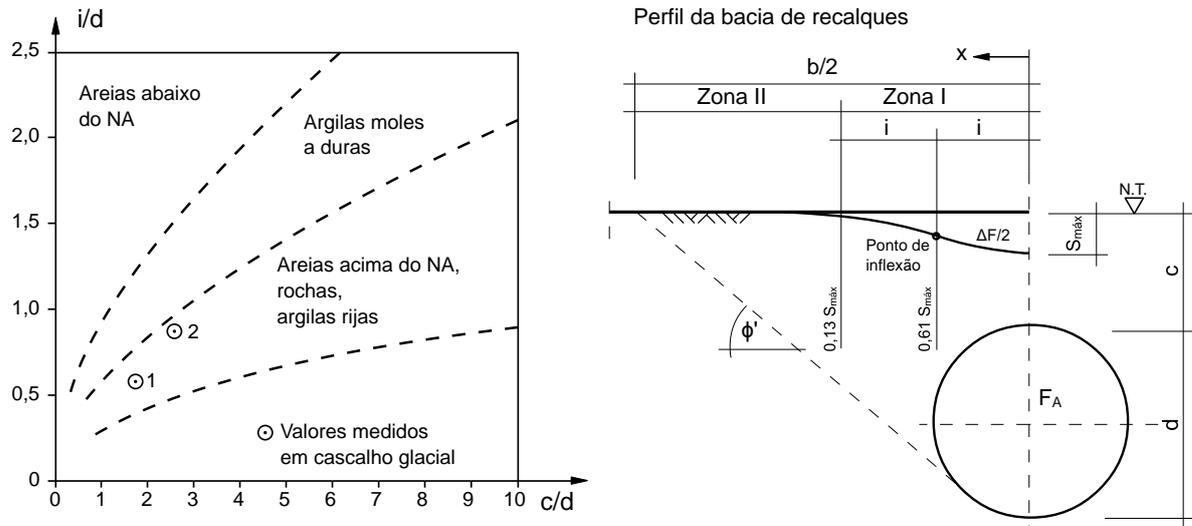
Fonte: PECK (1969).

Segundo Attewell (1995), para solos coesivos, podemos admitir valores típicos de V_s que variam de 0,5% a 2,5%, a depender da coesão do solo e da velocidade em que o suporte inicial é colocado. O valor 1,5% pode ser adotado, não sendo excessivamente conservador. Já para solos granulares escavados abaixo do lençol freático, pode-se aplicar uma faixa de V_s entre 2% a 10%. Um valor de 5% deve ser adotado para cálculos preliminares, mas os valores devem ser determinados com base em um ensaio com o *Standard Penetration Test* (SPT).

Após algumas alterações, o ábaco de Peck passou a ser função da calota da escavação (c) e não da profundidade do eixo (z) (Figura 8). Foi proposto também o cálculo da distância horizontal em que não há mais recalques decorrentes da escavação ($b/2$), esta sendo função do ângulo de atrito do solo (ϕ), do diâmetro da escavação (d) e da profundidade da calota (c).

$$\frac{b}{2} = c \cdot \cot\phi + \frac{1}{2}d \cdot \cot\frac{\phi'}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Figura 8 – Ábaco de Peck modificado.



Fonte: Adaptado de Peck (1969).

Uma vez que o subsolo frequentemente é um meio estratificado, sendo composto por várias camadas distintas, as equações observadas previamente não mais são apropriadas e as limitações do método ficam mais evidentes. Tendo isso em vista, Selby (1988) recomendou o uso de um “k” equivalente,

$$k_{eq} = \frac{\sum_1^n k_n \cdot z_n}{z_0} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

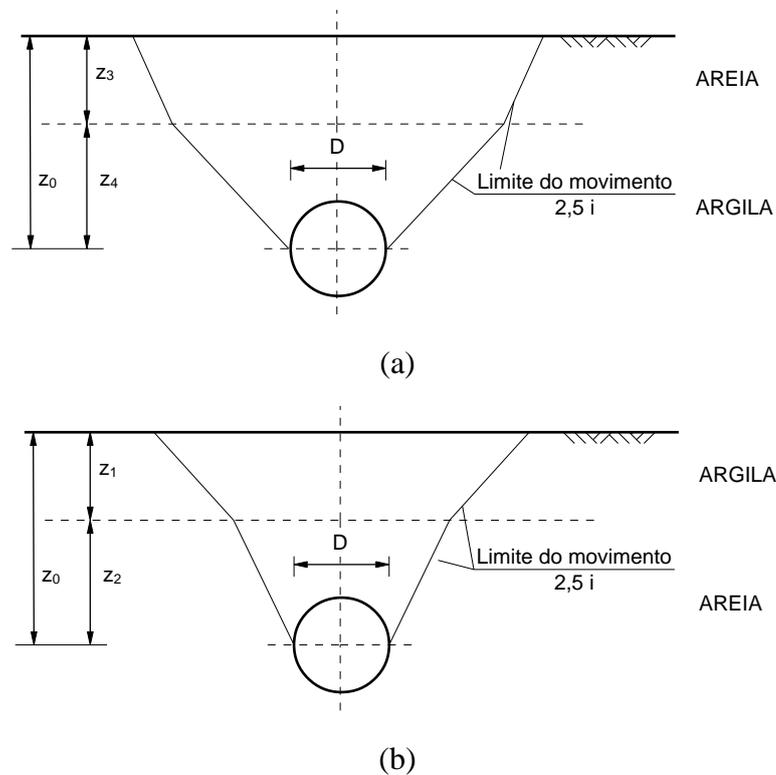
k_n é a correlação entre o ponto de inflexão da curva gaussiana, i , e a profundidade do eixo do túnel em relação a superfície, z_0 ;

z_n é a profundidade da camada de solo;

z_0 é a profundidade do eixo do túnel em relação à superfície estudada.

Muitas vezes a construção de túneis pode apresentar uma geologia mais complexa, como camadas de solos coesivos e solos não coesivos juntas. Segundo Selby (1988), a teoria semi-empírica torna-se menos confiável para esses casos, no entanto, os limites do método semi-empírico podem ser superados até certo ponto. Para esses casos, o perfil do movimento do solo segue a sequência apresentada na Figura 9 (GUGLIELMETTI et al., 2007).

Figura 9 - Espreadimento da área de recalque devido à estratigrafia: (a) solo não-coesivo no topo, (b) solo coesivo no topo



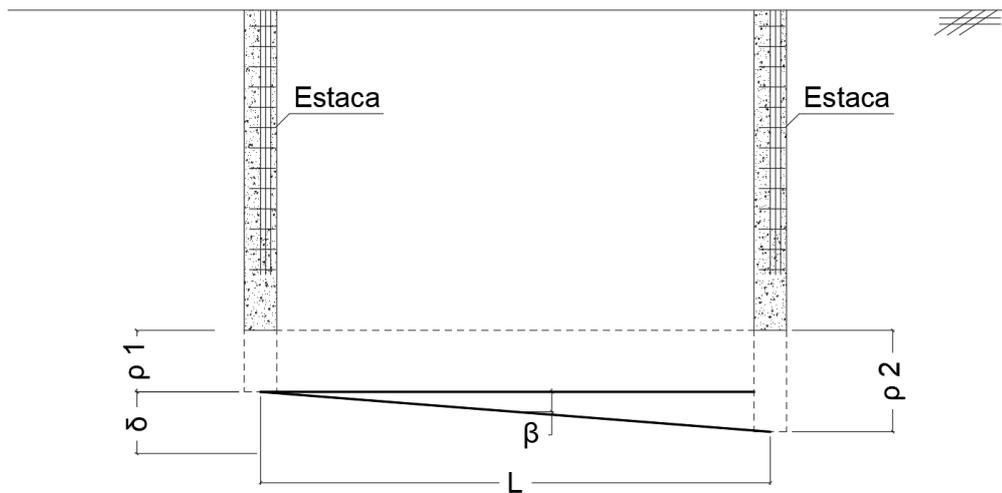
Fonte: Adaptado de GUGLIELMETTI et al., 2007.

2.4 Recalques em fundações

De acordo com Velloso e Lopes (2010), toda fundação sofre deslocamentos verticais, horizontais ou rotacionais (Figura 10) que são provindos das interações solo-estrutura. Dito isso, são definidos (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011):

- Recalque total (ou absoluto) de cada elemento de fundação (ρ), calculado como a soma entre as parcelas do recalque imediato e o recalque de adensamento que ocorrem em apenas um elemento de fundação (Equação 4);
- Recalque diferencial (ou relativo), entre dois elementos (δ), como a relação da diferença entre os recalque totais de dois apoios (Equação 5);
- Recalque diferencial específico também chamado de distorção angular ou recalque distorcional (β), como o quociente entre o recalque diferencial e a distância entre o centro dos elementos de fundação (Equação 6).

Figura 10 – Recalques absolutos, recalque diferencial e distorção angular.



Fonte: Dos Autores.

$$\rho = \rho_i + \rho_c \quad \text{Equação 4}$$

$$\delta = |\rho_{estaca\ 1} - \rho_{estaca\ 2}| \quad \text{Equação 5}$$

$$\beta = \frac{\delta}{L} \quad \text{Equação 6}$$

onde:

ρ_i = recalque imediato;

ρ_c = recalque de adensamento;

$\rho_{estaca\ 1}$ = recalque diferencial da estaca 1;

$\rho_{estaca\ 2}$ = recalque diferencial da estaca 2;

L = distância entre centros dos elementos de fundação.

Embora todas as fundações sofram recalques, esses deslocamentos só afetam a estrutura quando sua intensidade é maior que o limite previsto no projeto. Devem-se conhecer os recalques considerados admissíveis. Considerando que danos causados a elementos estruturais são diferentes de danos causados a alvenarias, qualquer movimento que afete as fundações é importante de ser acompanhado, pois pode danificar não só a estética mas também a função, utilização e integridade da estrutura (VELLOSO; LOPES, 2010).

Segundo a Instituição de Engenheiros Estruturais (*Institution Of Structural Engineers* – tradução livre), há basicamente três considerações a serem feitas em relação às deformações limites, quando o movimento afeta a estética, a funcionalidade e a estabilidade estrutural.

a) Estética:

Desaprumos e inclinações visíveis causam nas pessoas uma sensação de insegurança, mesmo que não exerçam nenhuma influência na estabilidade estrutural. Geralmente, desvios

verticais maiores que 1/250 são notados e, em peças horizontais, inclinações maiores que 1/100 são visíveis, assim como desvios verticais maiores que 1/250.

b) Funcionalidade

A relação entre a utilização e o grau de dano visível também pode variar com a funcionalidade de uma edificação. Em um hospital, por exemplo, um grau de deformação considerado “muito leve” pode ser inaceitável, enquanto em edifícios industriais uma intensidade de dano “moderada” não afetará na utilização ou função da estrutura. A maior parte do grau de comprometimento da função em serviço relacionadas ao deslocamento do solo se diz respeito ao aparecimento de fissuras visíveis, que podem gerar apenas um desconforto visual, como podem indicar o comprometimento da estrutura a depender das dimensões e angulações dessas fissuras.

c) Estabilidade estrutural

As limitações de deformações para atender à estética e à funcionalidade da estrutura, em geral, garantem a estabilidade da obra e a ausência de danos estruturais que possam comprometer a sua segurança. Entretanto, existem exceções. Por exemplo, uma estrutura muito rígida pode tombar como um todo sem apresentar, previamente, fissuração apreciável (VELLOSO; LOPES, 2010).

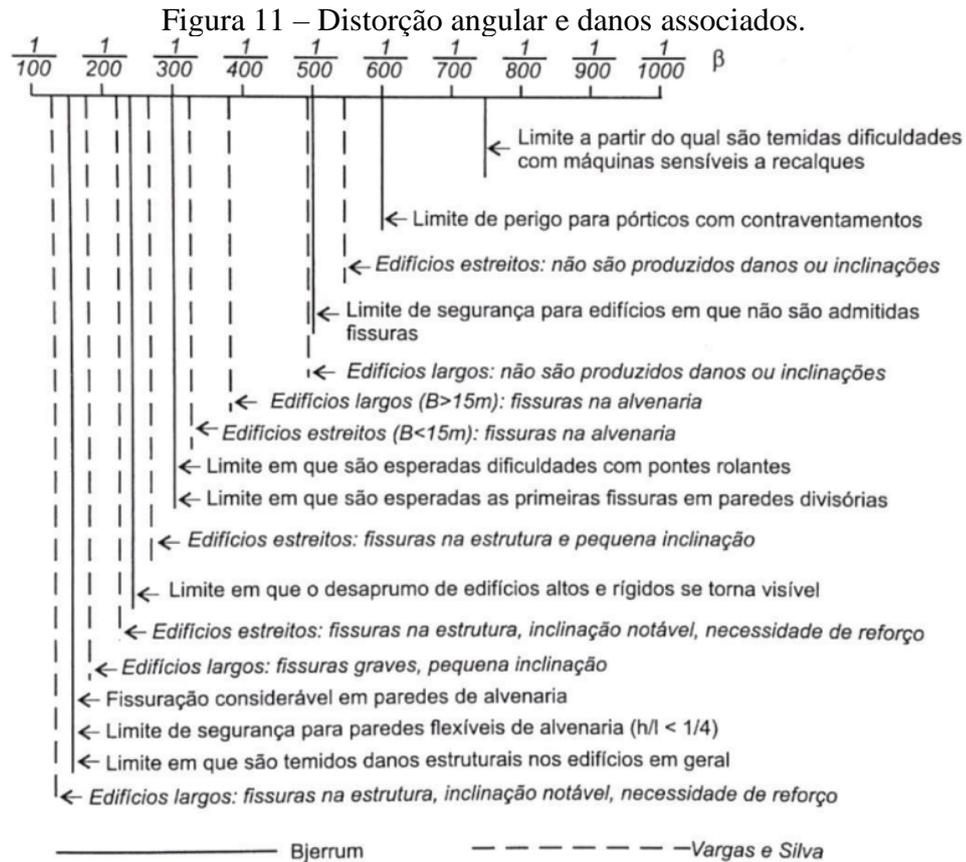
As deformações admissíveis são avaliadas por distorções angulares (β) e de acordo com o tipo de estrutura. Vêm-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** indicações de valores limites segundo alguns autores:

Tabela 1 - Valores limites da rotação relativa ou distorção angular β para edifícios estruturados e paredes portantes armadas .

	Skempton e MacDonald (1956)	Meyerhof (1956)	Polshin e Tokar (1957)	Bjerrum (1963)
Danos estruturais	1/500	1/250	1/200	1/500
Fissuras em paredes e divisórias	1/300 (porém, recomendado 1/500)	1/500	1/500 (0,7/1000 a 1/1000 em painéis extremos)	1/500

Fonte: I.S.E. (1989) *apud* Velloso e Lopes (2010).

Na Figura 11 são apresentados os valores de distorção angular β e danos associados sugeridos por Bjerrum (1963) e complementados por Vargas e Silva (1973), que foram mais conservadores ao completar os estudos de Bjerrum. Vargas e Silva (1973) também introduziram limites relacionados à largura das edificações.



Fonte: Velloso e Lopes (2010).

Os principais problemas patológicos devidos ao recalque das estruturas tendem a ser as fissuras, trincas, rachaduras, assentamentos e rotações (ALONSO, 2020 *apud* CLAUDINO, 2021). As fissuras se caracterizam por serem normalmente superficiais, com até 0,5 mm de espessura, e não influenciam obrigatoriamente na estrutura. Trincas se caracterizam pela ruptura de algum elemento, reduzindo potencialmente a segurança das peças de estrutura, apresentando aberturas entre 0,5 mm a 1,5 mm. Rachaduras são aberturas entre 1,5 mm a 5,0 mm que necessitam de avaliação e tratamento adequado. Alguns reparos podem ser feitos apenas superficialmente, já outros devem ser feitos para a prevenção de colapso (SOARES, 2014 *apud* CLAUDINO, 2021).

2.5 Softwares de engenharia

Com o aumento da tecnologia disponível na engenharia, foi criada a CAE – *Computer Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador), uma técnica amparada pelo uso dos computadores auxiliando no desenvolvimento de projetos. Essa ferramenta permite não só a definição das dimensões do protótipo mas também seus materiais e elementos externos como aplicação de forças e variação de temperatura (LEE, 1999).

Em engenharia de estruturas é bastante utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolução de problemas numéricos. Esse método é um procedimento numérico que

determina soluções para problemas que envolvem equações diferenciais. O MEF subdivide o domínio em partes menores, denominadas elementos. Para a área da Geotecnia, alguns softwares empregam o MEF em problemas envolvendo rochas e solos. Para isso, deve-se fornecer os parâmetros necessários, como a geometria, os parâmetros dos solos e rochas e as condições de contorno do problema (AZEVEDO, 2003).

Existe uma gama de programas disponíveis no mercado que podem ser utilizados para análises e retroanálises de tensões e deformações em escavações subterrâneas, sendo alguns deles: Cesar LCPC, DIANA, Plaxis 2D e RS2.

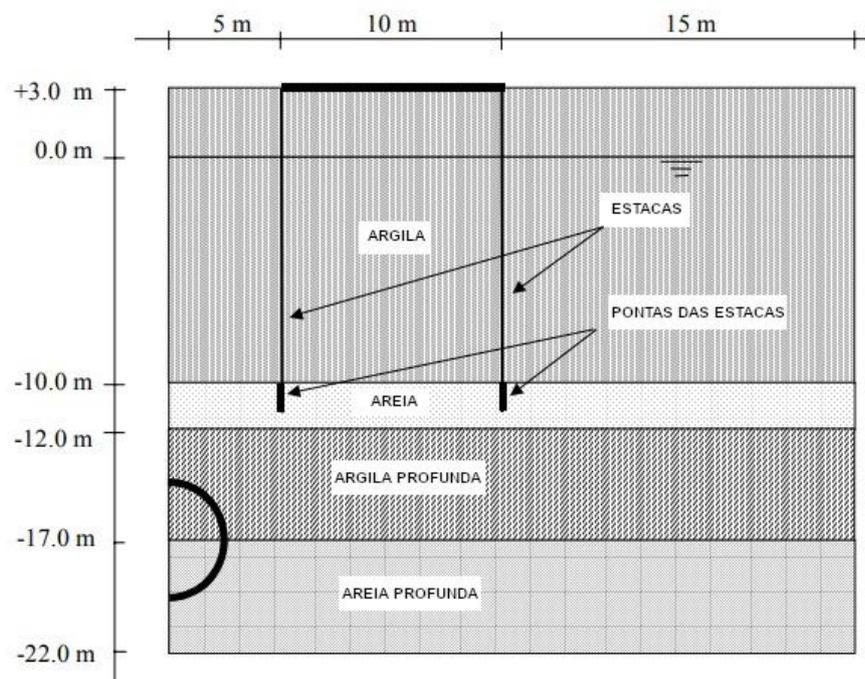
- Cesar LCPC: produzido pela ITEC, tem capacidade para modelar geometrias simples com análises axissimétricas, em que as tensões e deformações são radiais e em todas as direções. Também consegue analisar interseções 3D, entretanto sua interface é bastante complexa.
- DIANA: tem como propósito geral simulações em duas e três dimensões assim como a análise estrutural.
- Plaxis 2D: utiliza o método dos elementos finitos em duas dimensões. Consegue simular geometrias complexas e também análises mais simples, como axissimétricas.
- RS2: Em 2D, permite levar em consideração um grande número de fatores que influenciam no estado do maciço. No cálculo consideram-se parâmetros físicos e mecânicos da rocha assim como as tensões que agem sobre o maciço e suas características estruturais.

3 METODOLOGIA

3.1 Método numérico Reprodução do modelo numérico

Neste trabalho, utilizou-se um *software* de Elementos Finitos em duas dimensões. Adotou-se como referência um modelo de túnel perfurado e edificação superficial com fundações em estacas contido no manual de tutoriais deste software (Figura 12). Logo, fez-se necessária a reprodução fiel deste modelo como demonstra o tutorial, a fim de haver confiança nos resultados das análises paramétricas realizadas.

Figura 12 - Geometria do modelo de referência.



Fonte: adaptado de BRINKGREVE e VERMEER (2002).

A análise foi realizada no estado plano deformações, onde as tensões principais em um ponto podem ser determinadas por qualquer seção passando por esse ponto, ou seja uma seção transversal ao comprimento da escavação pode representar o todo.

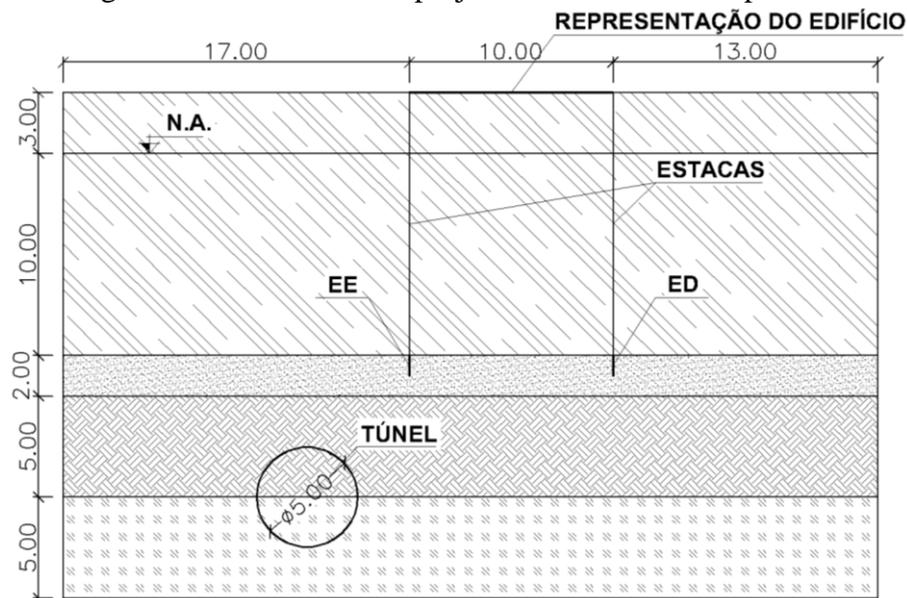
A estratigrafia do modelo é constituída por quatro camadas de solo. A primeira camada é composta por argila, com espessura de 13,00 m. A segunda camada é composta por areia e tem espessura de 2,00 m. É nesta camada que estão dispostas as pontas das estacas de fundação com 1,50 m. Abaixo da camada de areia existe uma camada de argila profunda com 5,00 m de espessura; A parte superior da escavação do túnel é feita nessa camada. A parte inferior do túnel é escavada em areia profunda, última camada da estratigrafia do solo, com 5,00 m de espessura. O nível d'água está localizado na cota zero da estratigrafia, e a distribuição das poropressões é hidrostática. As características do solo estão apresentadas na Tabela 2.

Uma edificação de 10,0 m de largura é alocada na superfície (cota +3,00 m do desenho). Esta edificação tem como fundações duas estacas de 13,0 m de comprimento, cujas pontas possuem 1 m e são compostas de um material diferente das estacas (Tabela 3 e Tabela 4).

Como o desenho do modelo de referência começa pelo eixo do túnel é apresentado apenas seu lado direito, com geometria simétrica e circular com 5 m de diâmetro. Seu material de revestimento apresenta comportamento elástico e seus parâmetros de resistência e deformabilidade estão listados na Tabela 3. A escavação é executada pelo método TBM, sendo necessária a aplicação de contração volumétrica em suas etapas de cálculo, usada para simular a perda de volume (V_L) advinda desse método.

Neste trabalho, estendeu-se o limite lateral esquerdo do modelo de forma a englobar toda a área de escavação do túnel (Figura 13) para melhor atender a análises paramétricas.

Figura 13 – Geometria do projeto com simetria completada.



Fonte: Dos Autores.

Tabela 2 – Parâmetros geotécnicos do maciço.

	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Φ (°)	ψ (°)	E (MPa)	K_0	ν
Argila	15,00	18,00	5,50	24,00	0,00	1,00	0,593	0,33
Areia	16,50	20,00	1,00	31,00	1,00	80,00	0,485	0,30
Argila profunda	16,00	18,50	4,00	25,00	0,00	10,00	0,577	0,33
Areia profunda	17,00	21,00	1,00	33,00	3,00	120,00	0,455	0,30

Fonte: BRINKGREVE e VERMEER (2002).

Tabela 3 - Propriedades do Túnel e Ponta da estaca.

	EA (kN/m)	EI (kPa/m)	\underline{d} (m)	w (kN/m/m)	ν
Túnel	$1,40 E^7$	$1,43 E^5$	0,350	8,40	0,15
Ponta da estaca	$2,10 E^6$	$8,10 E^3$	3,464	25,00	0,00

Fonte: BRINKGREVE e VERMEER (2002).

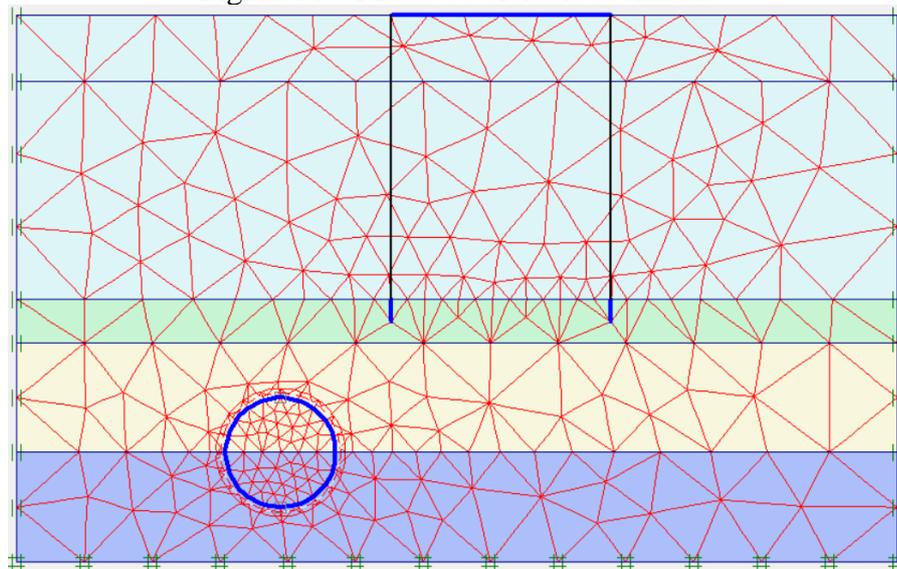
Tabela 4 – Propriedades da estaca.

	EA (kN)	\underline{L} (m)
Estaca	$2,10 E^6$	1,00

Fonte: BRINKGREVE e VERMEER (2002).

Foi adotada uma malha de elementos finitos de 15 nós, com refinamento global médio e refinamento manual ao redor do túnel e na ponta das estacas, onde são esperadas concentrações de tensão (Figura 14).

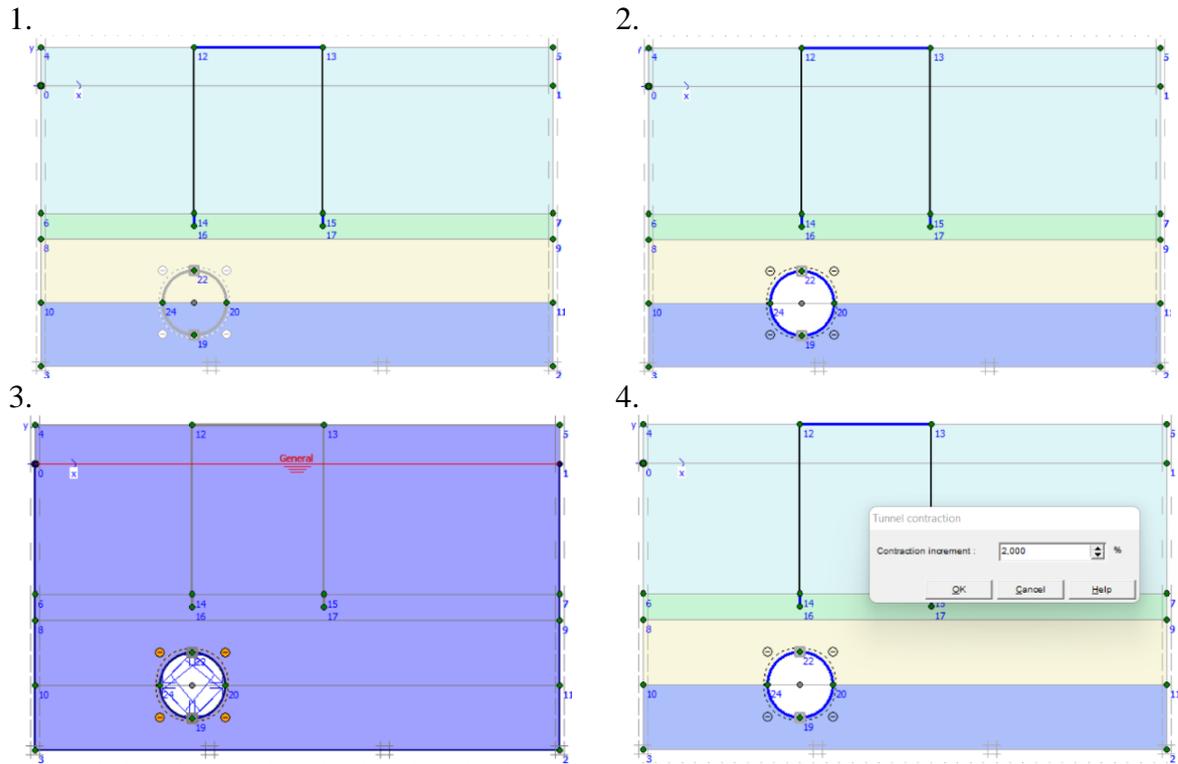
Figura 14 – Malha de elementos finitos.



Fonte: Dos Autores.

A escavação do túnel foi programada em três fases: (1) o maciço natural é ativado, assim como todos os parâmetros da edificação (construção, estaca, ponta da estaca), (2). os deslocamentos gerados pelo peso próprio do edifício, que não são objetos de estudo, são igualados a zero; o túnel é escavado simultaneamente à ativação do revestimento e (3) a água é removida do interior da escavação e o túnel é revestido, aplicando-se uma contração volumétrica de 2%.

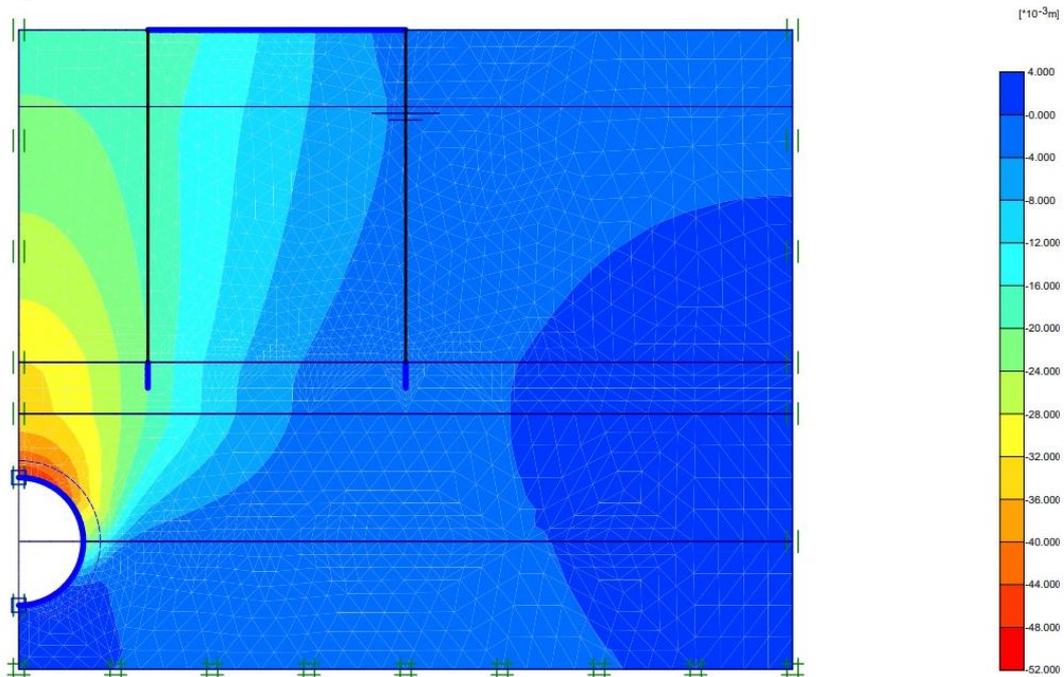
Figura 15 – Etapas de cálculo.



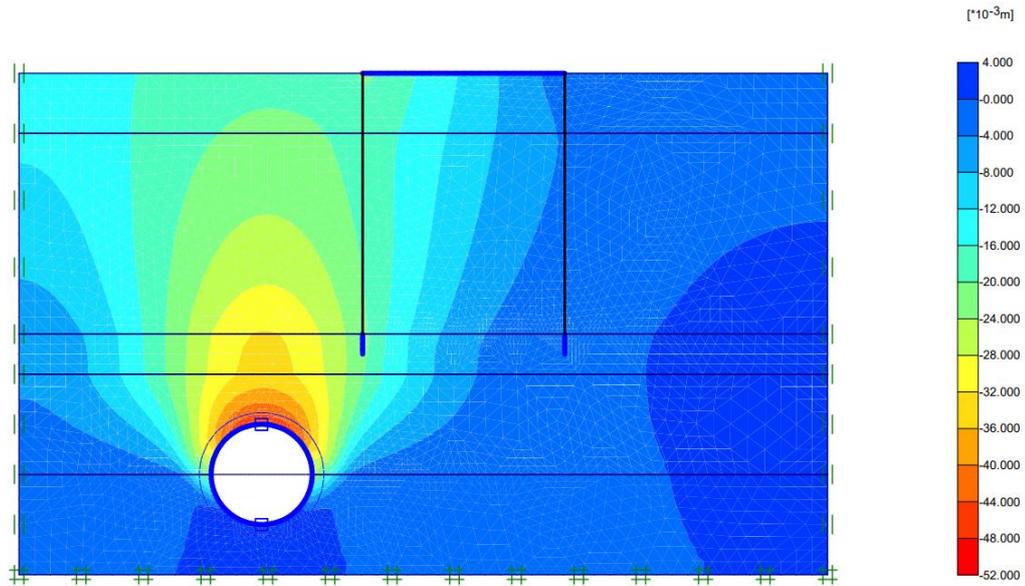
Fonte: Dos Autores.

O modelo de referência apresenta recalque máximo de 4,849 cm ao final da construção. Na reprodução, obteve-se recalque máximo de 4,853 cm (Figura 16), representando uma variação entre resultados de 0,08%. Esta variação foi considerada perfeitamente aceitável.

Figura 16 - Deslocamentos verticais (a) modelo do manual (b) modelo modificado.



(a)



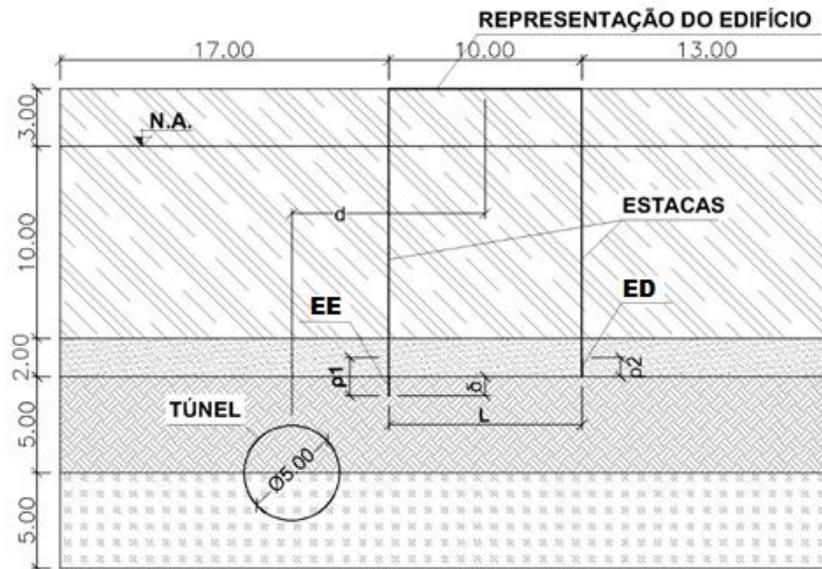
(b)

Fonte: Dos Autores.

3.1.2. Análise paramétrica

Por meio da análise paramétrica do modelo numérico, objetivou-se melhor compreender a influência da posição horizontal relativa entre a escavação e a edificação, nos recalques distorcionais observados na estrutura em superfície. Para isso, variou-se a distância entre os eixos do túnel e da edificação (d) e recolheram-se como resultados os recalques absolutos nas pontas das estacas (ρ). Calculou-se o recalque diferencial (δ) entre as estacas e, juntamente com a distância entre as estacas (L), o recalque distorcional (β). Estes parâmetros são destacados na Figura 17.

Figura 17 – Geometria estudada no trabalho.



Fonte: Dos Autores.

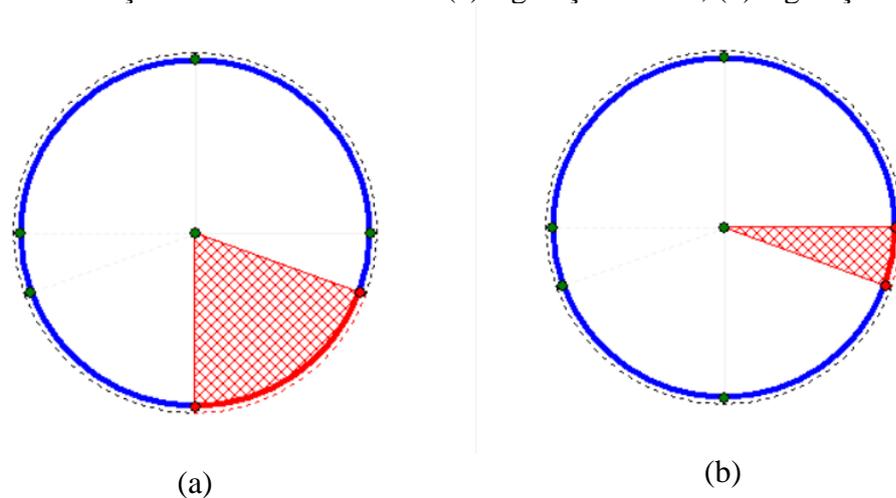
A distância entre eixos (d) variou de 0 a 15 m, dividida em intervalos de 2,5 m. Essa distância foi escolhida tendo em vista o diâmetro de perturbação previsto por Hoek (2007) que, para essa situação, seria de 7,5 a 12,5 metros.

Paralelamente, buscou-se compreender a influência do método de escavação do túnel nestes recalques. Logo, as mesmas análises anteriores foram reproduzidas usando o método de escavação NATM. O túnel teve sua seção parcializada para aproximarmos modelo numérico de escavações reais, assim as etapas de cálculo de escavação do túnel foram divididas em duas (Figura 18).

A divisão das fases é importante para que o programa relacione a ordem na qual o evento da construção tanto da edificação quanto do túnel aconteceria na realidade, para que o software possa fazer os cálculos de acordo com as cargas que estão sendo aplicadas próximas ao túnel (peso da construção e do solo) (SILVA, 2018, p. 66).

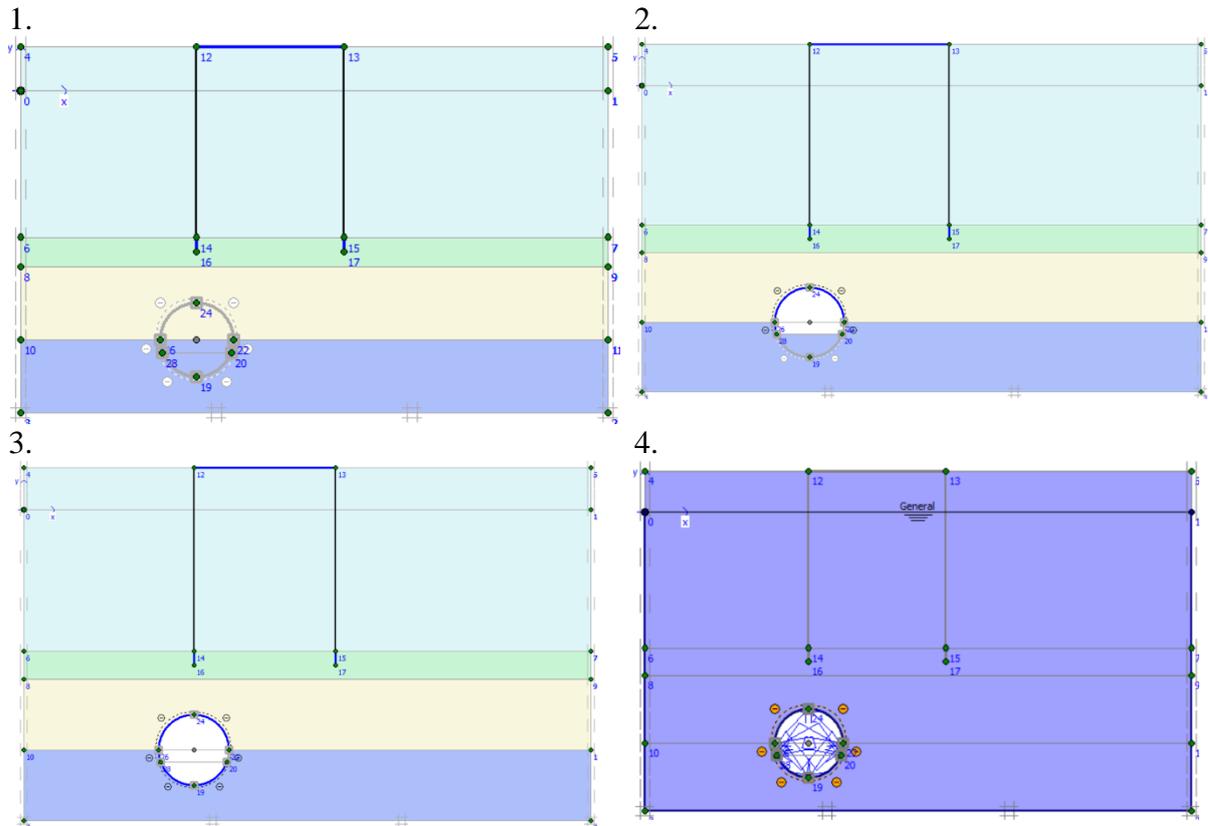
Assim as etapas de cálculos foram programadas em quatro fases: (1) o maciço natural é ativado, assim como todos os parâmetros da edificação (construção, estaca, ponta da estaca), (2). os deslocamentos gerados pelo peso próprio do edifício são iguados a zero; a parte superior do túnel é escavado simultaneamente à ativação do revestimento que contempla a primeira parte da seção escavada, (3) a segunda parte da seção do túnel (arco-invertido) é escavada simultaneamente à ativação do revestimento que a contempla, (4) a água é removida do interior da escavação. Nota-se que para este método de escavação não é aplicada a contração volumétrica.

Figura 18 – Seção seccionada do túnel: (a) angulação de 70°, (b) angulação de 20°.



Fonte: Dos Autores.

Figura 19 – Etapas de cálculo para o método de escavação NATM.

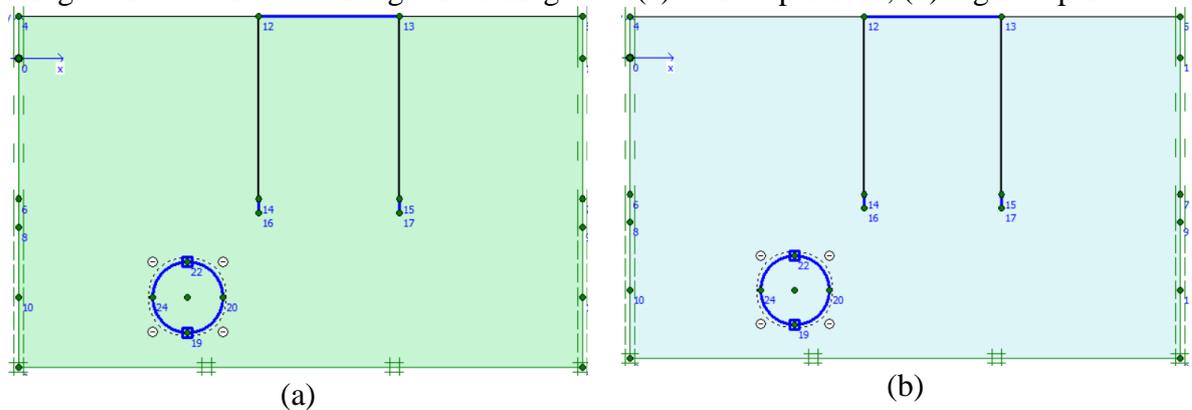


Fonte: Dos Autores.

3.2 Comparação entre estimativas numéricas e analíticas de recalques

Paralelamente à análise paramétrica, outras duas análises numéricas em TBM foram conduzidas utilizando uma estratigrafia de solo homogêneo, sendo uma composta somente por argila (superficial) e outra composta somente por areia (superficial) (Figura 20). Para esse modelo também foram utilizados os dados dos solos fornecidos pelo *software* de elementos finitos (Tabela 2).

Figura 20 – Perfis de estratigrafia homogênea: (a) areia superficial, (b) argila superficial.



Fonte: Dos Autores.

As etapas de cálculo destas simulações seguiram o mesmo padrão aplicado no item 3.1.1. O resultado destas análises com estratigrafias simples foi comparado com as estimativas

de recalques pelo método empírico sugerido por Peck (1969), cujas equações foram abordadas no tópico 2.2.1.

Para a determinação da distorção angular, β , pelo método de Peck (1969), os valores de V_s foram determinados através das definições de Attewell (1995). Na situação onde o solo é homogêneo, composto por argila, foi aplicado um V_s de 1,5%. Já para a situação onde o solo é composto apenas por areia, foi aplicado o valor típico de V_s de 5%, também foi testado o intervalo de 2% a 10%, para obter uma melhor aproximação posteriormente na comparação de resultados entre os métodos (numérico x analítico).

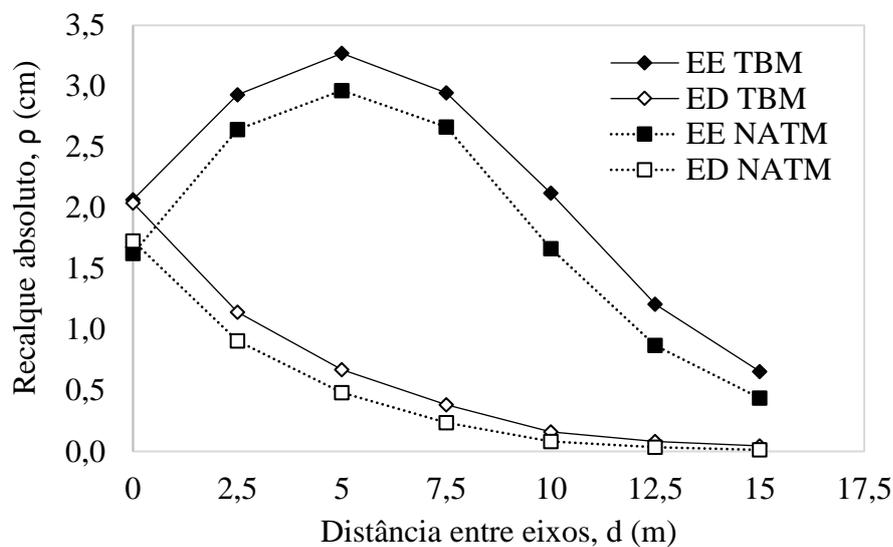
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise paramétrica

4.1.1. Recalques absolutos e diferenciais

A Figura 21 mostra os valores de recalques absolutos na Estaca Esquerda (EE) e Estaca Direita (ED) da edificação em superfície, resultados da escavação de um túnel de 5 m de diâmetro por dois métodos distintos (TBM e NATM), em diferentes posições relativas entre os eixos da edificação e do túnel.

Figura 21 - Recalques absolutos para estacas esquerda e direita pelos métodos de escavação TBM e NATM.

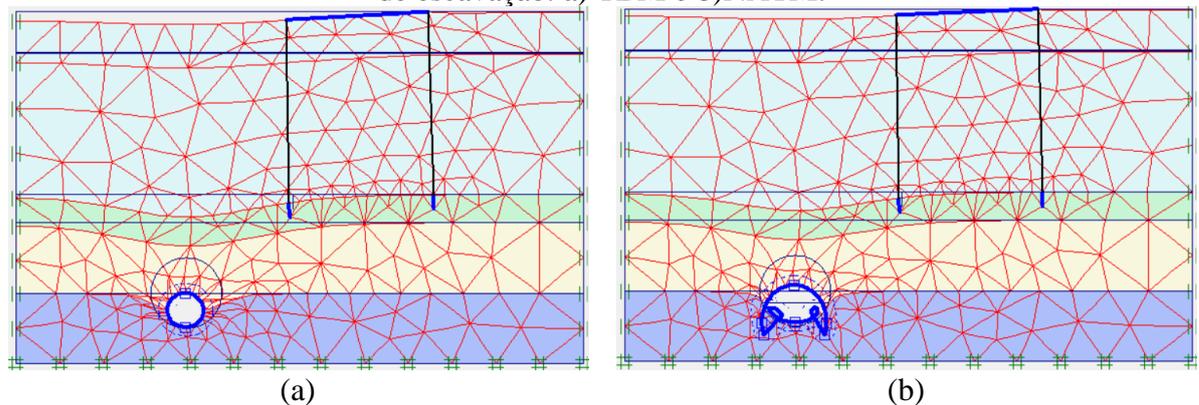


Fonte: Dos Autores.

Pode-se perceber que, quando os eixos do túnel e da edificação estão alinhados ($d = 0$), os recalques absolutos de ambas as estacas tendem aos mesmos valores, o que era esperado devido à simetria do problema.

A partir da distância entre eixos de 12,5 m, a ED, que está localizada a 17,5 metro do eixo do túnel e apresenta recalques inferiores a 0,11%, tanto para escavação por NATM, quanto TBM. Contudo, a EE, localizada a 7,5 metros do eixo do túnel, ainda sofre esta influência. Este resultado corrobora o preconizado por Hoek (2007) em relação ao diâmetro de perturbação, que para esse caso pode-se admitir como 5 vezes o raio de escavação ($D_{\text{pert}} = 12,5$ m) e pode ser melhor visualizado na Figura 22 com representação da deformação aumentada em 50 vezes.

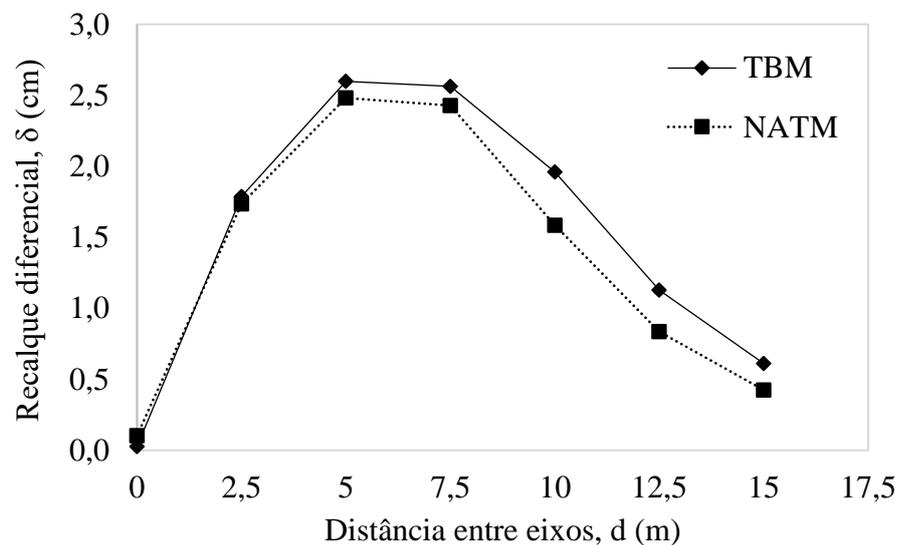
Figura 22 – Diâmetro de perturbação e influência nos recalques nas EE e ED, pelos métodos de escavação: a) TBM e b) NATM.



Fonte: Dos Autores.

Notou-se uma variação média do recalque absoluto igual a 0,29 cm entre os métodos TBM e NATM para a EE, havendo dois pontos extremos onde esse valor foi de 0,45 cm ($d = 0$ m e $d = 10$ m, não contabilizados na média). Do mesmo modo, ao analisar a ED, observou-se valores decrescentes de recalques absolutos com o aumento da distância entre eixos, com uma variação de 0,31 cm para $d = 0$ m até 0,05 cm para $d = 12,5$ m. Esse aspecto será melhor discutido por meio da Figura 23, que mostra os recalques diferenciais entre EE e ED da edificação em superfície, relativos à figura anterior.

Figura 23 - Recalques diferenciais para os métodos de escavação TBM e NATM.



Fonte: Dos Autores.

Os recalques diferenciais quando os eixos do túnel e da edificação estão alinhados ($d = 0$ m) apresentam valores que tendem a zero, visto que os recalques absolutos nas ED e EE são semelhantes. Nota-se que a diferença entre os recalques diferenciais de ambos os métodos cresce com o aumento de d , partindo de 3% com $d = 2,5$ m e chegando a 44% para $d = 15$ m, sendo os valores de TBM maiores que o NATM. Tal não era esperado, uma vez que o TBM é

reconhecido por gerar menores perturbações na superfície em relação ao NATM (OLIVEIRA e BRITO, 1998) e, para ambos os métodos de escavação, foram mantidos a estratigrafia de subsolo, o diâmetro de escavação e as propriedades de deformabilidade e resistência do revestimento utilizado. Contudo, este mesmo comportamento já foi observado anteriormente na literatura (SILVA, 2018).

Essa diferença pode advir da geometria de parcialização da seção adotada na escavação do túnel pelo método NATM, como citado no Quadro por Murakami (2001), ao adequar a parcialização da escavação em função do comportamento do solo em relação ao tempo de auto sustentação da deformabilidade do material e dos equipamentos disponíveis leva a preservação do maciço circundante, impedindo que ele sofra deformações excessivas, de maneira que sua capacidade autoportante seja preservada. Assim o maciço passa a atuar como principal suporte da estrutura do túnel (RABCEWICZ, 1964).

4.1.1. Recalques distorcionais e danos à estrutura

Os valores de distorção angular calculados com base nos resultados numéricos para ambos os métodos de escavação e todas as distâncias entre eixos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Distorções angulares, β , para os métodos TBM e NATM (método numérico).

Distância entre eixos, d (m)	β (TBM)	β limite (Bjerrum, 1963)	β (NATM)	β limite (Bjerrum, 1963)
0	1/37037	1/1000	1/9709	1/1000
2,5	1/560	1/500	1/576	1/500
5,0	1/385	1/300	1/403	1/400
7,5	1/390	1/300	1/412	1/400
10,0	1/510	1/500	1/631	1/600
12,5	1/887	1/800	1/1195	1/1000
15,0	1/1635	1/1000	1/2350	1/1000

Fonte: Dos Autores.

Quando os eixos estão em suas posições críticas ($d = 5$ m e $d = 7,5$ m), ocorrem as maiores distorções para ambos os métodos de escavação (de 1/385 a 1/412). Vargas e Silva (1973) complementam os valores sugeridos por Bjerrum (1963) constatando que para limites de 1/300 a 1/400 ocorrem fissuras na alvenaria em edifícios estreitos, com larguras menores que 15 m. Já quando a distância entre eixos é $d = 2,5$ m ou $d = 10$ m, pode-se admitir o intervalo limite de 1/500, onde não são apresentadas fissuras.

Por simetria da seção, quando os eixos estão alinhados ($d=0$) os recalques absolutos das EE e ED são iguais. Nessa condição, os valores de recalques absolutos das estacas foram

similares, resultando em recalques distorcionais tão pequenos que se aproximam de zero, extrapolando os valores de β .

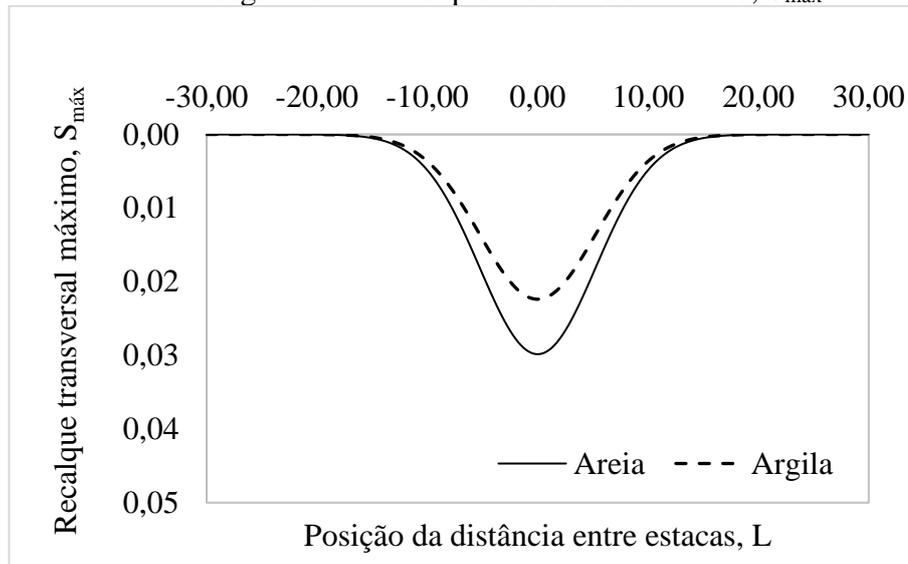
Em todas as demais posições relativas entre eixos, as distorções angulares foram menores que 1/500. Tanto para o TBM como o NATM nota-se que para $d \geq 12,5$ m, os valores de distorções angulares estão nos limites definidos por Bjerrum (1963) como seguros para a edificação estudada.

4.2 Comparação entre estimativas numéricas e analíticas de recalques

No método analítico os recalques absolutos quando $d=0$ são exatamente iguais, impossibilitando matematicamente o cálculo do recalque distorcional para comparação entre os métodos. Partindo desse princípio, serão consideradas apenas as distâncias entre eixos de 2,5 m até 15 m nas comparações entre as estimativas numéricas e analíticas.

Está apresentada na Figura 24 a distribuição gaussiana semi-empírica relativa ao recalque transversal máximo, $S_{m\acute{a}x}$, pelo método analítico de Peck (1969). Foi escolhida a situação $d = 5$ m, para o perfil superficial de argila e areia de forma demonstrativa.

Figura 24 – Recalque transversal máximo, $S_{m\acute{a}x}$.



Fonte: Dos Autores.

Os tópicos abaixo apresentam as análises comparativas entre os métodos numérico e analítico para os perfis estratigráficos de argila e areia.

4.2.1. Argila

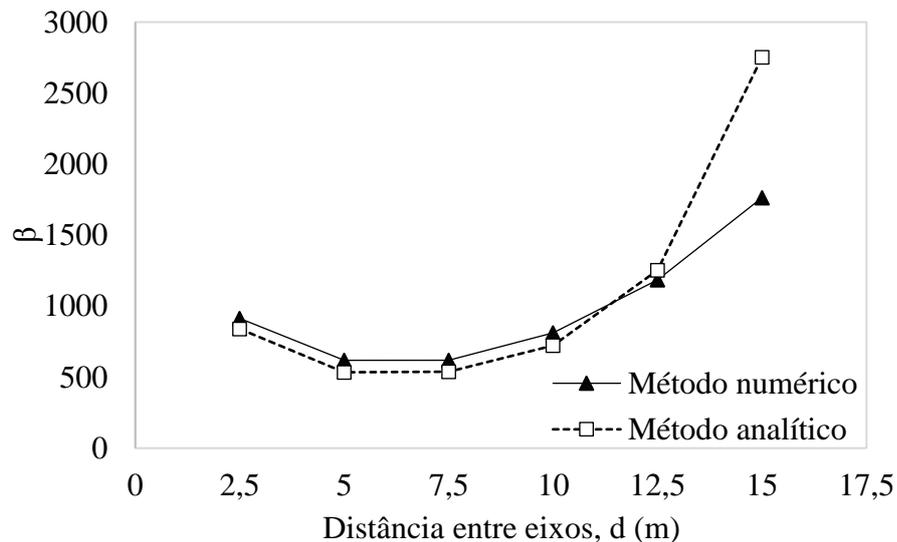
Está apresentado na Tabela 6 os valores de distorções angulares referentes aos métodos numérico e analítico para o caso de perfil estratigráfico homogêneo de argila superficial, admitindo $V_s=1,5\%$, conforme sugerido por Attewell (1995), bem como a variação em porcentagem entre esses dois métodos.

Tabela 6 - Resultados do *software* de elementos finitos e método analítico para argila.

Distância entre eixos, d (m)	Valores de β		Variação entre métodos (%)
	Método numérico	Método analítico (Vs = 1,5%)	
2,5	1/913	1/839	8
5,0	1/618	1/534	14
7,5	1/619	1/537	13
10,0	1/812	1/722	11
12,5	1/1185	1/1253	-6
15,0	1/1764	1/2753	-56

Fonte: Dos Autores

Pode-se perceber que o método analítico apresentou valores maiores de β em relação ao método numérico, ou seja, mostrou-se mais conservador, para $d = 0$ m até $d = 10$ m. As variações entre os métodos não foi significativa para as condições mais críticas ($d < 10$ m), com valores de 8% a 11%. Contudo, ao passo que d aumentou, a estimativa de recalques pelo método numérico se tornou mais conservadora do que aquela por método analítico. Tal pode ser melhor observado na Figura 25, que apresenta os valores dos denominadores dessas mesmas distorções angulares.

Figura 25 – Valores de β para os métodos numérico e analítico da argila.

Fonte: Dos Autores.

4.2.2. Areia

A Tabela 7 apresenta os valores de distorções angulares referentes aos métodos numérico e analítico para o caso de perfil estratigráfico homogêneo de areia superficial, bem como a variação em porcentagem entre esses dois métodos. Como sugerido por Attewell

(1995), foi adotado o valor de teste de $V_s = 5\%$ para as estimativas preliminares de recalques em superfície. Visto que esse valor se distanciava dos resultados determinados pelo método numérico, foi testada a faixa de valores de V_s de 2% a 10%. O valor que mais se aproximou das estimativas numéricas foi $V_s = 2\%$, admitido para as análises seguintes.

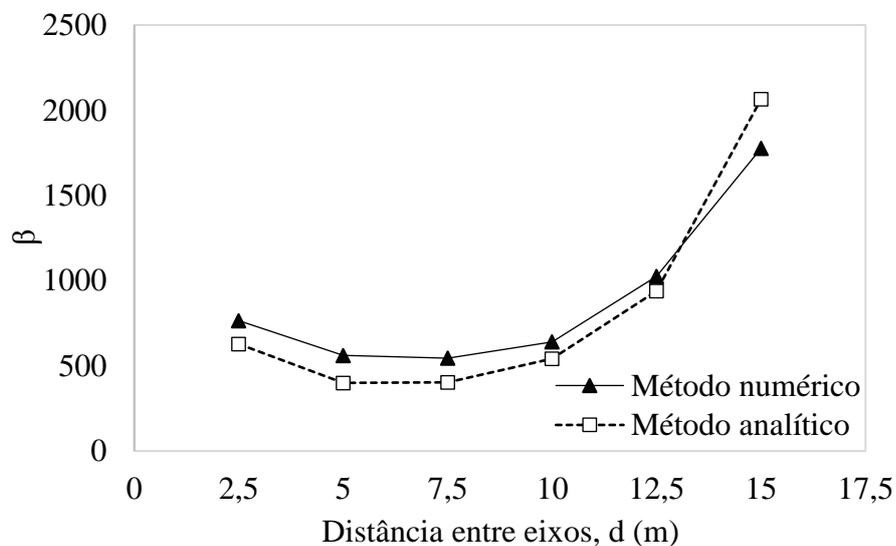
Tabela 7 - Resultados do *software* de elementos finitos e método analítico para areia.

Distância entre eixos, d (m)	Valores de β			Variação entre métodos $V_s=2\%$ (%)	Variação entre Métodos $V_s=5\%$ (%)
	Método numérico	Método analítico ($V_s = 2\%$)	Método analítico ($V_s = 5\%$)		
2,5	1/765	1/629	1/252	18	67
5,0	1/561	1/400	1/160	29	72
7,5	1/545	1/403	1/161	26	70
10,0	1/640	1/542	1/217	15	66
12,5	1/1026	1/940	1/376	8	63
15,0	1/1776	1/2065	1/826	-16	53

Fonte: Dos Autores

Assim como no caso da argila, para o perfil estratigráfico homogêneo em areia, o método analítico apresentou valores maiores de β em relação ao método numérico, ou seja, mostrou-se mais conservador, para $d = 0$ m até $d = 12,5$ m. Neste caso, porém as variações entre os métodos foi bem mais significativa, com valores de 9% a 40%, para $V_s=2\%$. Contudo, no último ponto estudado ($d = 15$ m), a estimativa de recalques pelo método numérico se tornou mais conservadora do que aquela por método analítico. Tal pode ser melhor observado na Figura 26, que apresenta os valores dos denominadores dessas mesmas distorções angulares.

Figura 26 - Valores de β para os métodos numérico e analítico da areia.



Fonte: Dos Autores.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Conclusões

Em relação aos recalques à análise paramétrica, comparando os métodos de escavação TBM e NATM, podemos destacar as seguintes considerações:

- Quando o elemento de fundação está posicionado acima do eixo de túnel nota-se o cenário mais crítico para a segurança da edificação em ambos os métodos de escavação;
- Tanto para o TBM quanto NATM o diâmetro de perturbação do túnel foi de cinco vezes o raio de escavação;
- O método de escavação NATM apresentou-se mais seguro em relação ao método TBM, para a condição específica apresentada neste trabalho. Os recalques absolutos e diferenciais apresentados foram menores para o método NATM, assim como as distorções angulares que foram consideradas mais seguras, o que não era esperado. Tal pode advir da parcialização da seção escolhida para o NATM.

Para as análises da comparação entre métodos numérico e analítico destacamos as seguintes considerações:

- Os valores de β calculados pelo método de Peck (1969) apresentam uma média de 12% de variação em comparação ao método numérico para o solo homogêneo composto por argila e 22% para o solo homogêneo composto por areia, no intervalo de $d = 2,5$ m a $d = 10$ m, o que mostra claramente um melhor ajuste do método analítico ao numérico para solos coesivos. Para a argila, as estimativas por Peck (1969) podem ser vistas como um bom resultado, ao se levarem em conta a simplicidade de cálculo e o ano em que o método foi desenvolvido;
- Para $d < 10,0$, o método analítico se fez mais conservador em relação ao método numérico, tanto para solos coesivos, quanto granulares.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Tem-se como sugestões para estudos futuros e continuidade da pesquisa:

- Comparação entre método numérico e analítico para estratigrafias mais complexas;
- Alterar a profundidade do túnel em relação à superfície;
- Modificar a parcialização da seção de escavação do NATM, bem como a ordem de escavação das partes;
- Variar o material de revestimento do túnel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, G. **Túneis escavados em solo por máquina tuneladora: conceituação, comportamento do maciço e modelagem numérica** Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle**. 3. ed. Ed. Edgard Blucher: São Paulo, 2020.
- ASSIS, A. P. **Mecânica das Rochas: Obras Subterrâneas**. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2002.
- ATTEWELL, P. B. **Tunnelling contracts and site investigation**. Published by E e FN Spon, an imprint of Chapman e Hall, 2–6 Boundary Row, London, UK .SE1 8HN, 1995.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003. Disponível em: <http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/Livro_MEF_AA.pdf> Acesso em: 03 abr. 2022.
- BJERRUM, L. Allowable settlement of structures. **Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Germany: Wiesbaden, 1963.
- BRINKGREVE, R. B. J., VERMEER, P. A. **PLAXIS: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses**, version 8. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2002.
- CHAPMAN, D., METJE, N., STARK, A. **Introduction to Tunnel Construction**, 2nd edition, 2nd ed. Applied Geotechnics. CRC Press, 2017.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. Oficina de textos, 2011.
- CLAUDINO, I. C. **Patologias em fundações: Indetificação e Prevenções**. Artigo Apresentado à Faculdade Unisul, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, 2021.
- ESTANQUEIRO, L. A., SALVI, L. **Análise do processo de escavação de túneis pela ótica do New Austrian Tunneling Method – NATM**. Revista Científica Multidisciplinar, Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 05, Vol. 12, pp. 75-117. Maio de 2020. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/escavacao-de-tuneis>>. Acesso em 26 mar. 2022.
- FILIPAK, P.; SOARES, J. K.; DOS SANTOS GUIMARAES, M. **Utilização da bactéria modificada advinda da bacillus subtilis para corrigir pequenas fissuras e trincas em estruturas e placas de concreto**. Enaproc, v. 1, n. 1, 2014. APUD CLAUDINO, I. C. **Patologias em fundações: Indetificação e Prevenções**. Artigo Apresentado à Faculdade Unisul, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, 2021.
- GOMES, C. F. G.. Túnel Ferroviário do Rossio – **Acompanhamento e Análise das Obras de Reabilitação**. Dissertação Para Obtenção do Grau de Mestre Engenharia Civil. Lisboa. 2008.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis I. et al. **Ingeniería geológica**. Pearson Educación, 2002.
- GUGLIEMMETTI, V., GRASSO, P., MAHTAB, A., XU, S. **Mechanized tunneling in urban areas - Design methodology and construction control**. Ed. Taylor and Francis Group, Londres, RU, 2007.
- GUIMARÃES, J. M. F. **Túneis de Seção Variável: Contribuições à Análise de Tensões e Deformações**. Florianópolis, Santa Catarina, 2018.

HOEK, E. **Practical Rock Engineering**. North Vancouver: [s.n.], 2007. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-RockEngineering-Full-Text.pdf>>. Acesso em 15 abr. 2022.

INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS (I.S.E.), **Soil-structure interaction: the real behavior of structures**. London, 1989. APUD VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. Vol. 2. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

KOCHEN, R. **NATM – Túneis no Brasil pelo Método Austríaco**. GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente. São Paulo. 2014.

LEE, K. **Principles of CAD/CAM/CAE Systems**. New York: Addison-Wesley, 1999.

LIMA, V. B. O. **Aplicação do Método NATM na Execução de Túnel em Rocha**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, X, 65p.: il.; 29,7cm, 2016.

MARTINHO, J. F. C. **O uso de explosivos na escavação de túneis: Implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folhas de cálculo**. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Geotecnia. Faculdade de Engenharia - FEUP, Universidade de Porto, Porto - Portugal, 2012.

MILITITSKY, J. CONSOLI, N. C. SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. 2. ed. ver e ampl. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2015.

MURAKAMI, C. A. **Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2001.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PECK, R. B. **Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground: State of the Art**. Anais do Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cidade do México, México, pp. 225-290, 1969.

SAUER, G. **NATM and Its Toolbox**. Conferencia Earth Retention Systems. Nova York. 2003.

SELBY, A. R. **Surface Movements Caused by Tunnelling in Two-layer Soil**. Eng. Geol. of Underground Movements, Nottingham, pp.71–77, 1988.

SILVA, O. F. A. **Análise da viabilidade técnica da execução de um sistema ferroviário subterrâneo em João Pessoa**. João Pessoa, Pernambuco, 92 p., 2018.

TOFFOLI, C. M. **Análise do impacto de túneis em estruturas lindeiras. Monografia de Projeto Final**, Publicação G.PF-001/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses**. 2. ed. rev., atual. e ampl. Lavras, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/11017>>. Acesso em: 20/02/2022.

VARGAS, M.; SILVA, F. R. **O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo e Santos**. Conferencia Regional Sul-Americana Sobre Edifícios Altos. Anais. Porto Alegre, 1973.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. Vol. 2. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VON RABCEWICZ, L. **The new austrian tunnelling method.** Water Power, v. 65, n. Nov, p. 453-457, 1964.