

Estabilidade Estrutural de Túnel NATM

Carlos Rogério, Fabiane Moraes, Marcelo Oliveira, Natália Oliveira, Piter Acoty, Elias Teles
Orientador: Matheus Ciccacio Nogueira

Resumo: A principal função do Túnel é facilitar o percurso a ser traçado, encurtando distâncias e tornando a comunicação mais prática e possível. Foram desenvolvidos para atravessar obstáculos da natureza e solucionar problemas de distâncias. O método NATM (New Austrian Tunneling Method) surgiu por volta de 1960, e desde então vem sendo utilizado por sua eficiência. Seu principal ponto é acompanhar a deformação do maciço e no desenvolvimento realizar as possíveis correções. O propósito neste estudo, com o auxílio de um programa de elementos finitos, é realizar o desenvolvimento de um modelo construtivo elasto-plástico com a utilização de concreto projetado (sem utilização de aço na estrutura), assegurando que os revestimentos primário e secundário irão suportar a estrutura.

Palavras-chave: NATM, Método Finito, Tuneladora, Revestimento.

Structural Stability of NATM Tunnel

Abstract: The main function of the Tunnel is to facilitate the route to be traced, shortening distances and making communication more practical and possible. They were developed to cross obstacles of nature and solve distance problems. The NATM method (New Austrian Tunneling Method) appeared around 1960, and since then it has been used for its efficiency. Its main point is to follow the deformation of the massif and in the development to carry out the possible corrections. The purpose of this study, with the aid of a finite element program, is to carry out the development of an elasto-plastic constructive model with the use of shotcrete (without the use of steel in the structure). Ensuring that the primary and secondary coatings will support the structure

Keywords: NATM, Finite Method, Tunneling Machine, Coating.

1. Introdução

Segundo Moreira (2006), o homem já detinha certo conhecimento sobre as rochas desde a Pré-história, utilizando-se das mesmas para a fabricação de utensílios, bem como supõe-se que alguns dos instrumentos primitivos existentes serviam para, por exemplo, escavar o solo. Há, também, muitos registros da utilização do espaço subterrâneo na Antiguidade, principalmente para o transporte de água e esgoto, como por exemplo na Cloaca Máxima, monumental esgoto urbano construído na Roma Antiga, no fim do século VI a.C. Mais recentemente, houve, ainda, a proliferação da utilização subterrânea para construção de túneis ferroviários, no século XIX.

Na medida em que cresce o uso desse tipo de estrutura, aumenta também a necessidade do melhoramento de procedimentos de projeto e construção, que deve levar em conta a minimização de impactos ambientais, além de questões econômicas, sociais e de segurança. Bernaud et al. (1994) destaca que, de modo geral, a análise do comportamento de um túnel com algum tipo de suporte (revestimento) tem duas particularidades: o comportamento essencialmente tridimensional evidente próximo a face do túnel onde os deslocamentos assumem uma forma complexa e o fato de ser um problema relevante à interação entre duas diferentes estruturas de comportamento e geometrias diversas: o revestimento e o maciço.

De acordo com Barton et al. (1974 p.1) “A classificação da Engenharia de Maciços Rochosos para o dimensionamento do suporte de túneis tem uma análise com cerca de

200 registros de casos de túneis onde revelou uma correlação útil entre a quantidade e o tipo de suporte permanente e a qualidade do maciço rochosos Q , com relação a estabilidade do túnel “. A metodologia de túneis convencionais e aspectos contratuais para este tipo de método de construção é baseado em escavação sequencial no solo ou rochas que permitem acomodação natural da massa devido á aliviar e controlar as tensões atuantes. O método é totalmente condicionado pelas condições de massa, por isso são possíveis adaptações nas fases de construção. Assim todo o trabalho foi elaborado apoiando os aspectos que permitem que esta mudança de flexibilidade possa ser necessária, utilizando um túnel já escavado e executado pelos princípios do NATM (New Autrian Tunnelingl Method), pertencente na localização da Paulista de São Paulo. Com o auxílio de um programa de elementos finitos comercial alcançamos o estudo de um modelo constitutivo elasto-plástico utilizando o método Mohr-Coulomb.

1.1 Justificativa

A pesquisa em questão tem como justificativa, estudar Túneis NATM que tem como método construtivo utilizar a plasticidade a favor da resistência da estrutura, diminuindo a necessidade de aço e comparando esse método com os métodos convencionais, como concreto armado .

1.2 Objetivos

Tendo como objetivo específico comparar dois tuneis com constituições distintas, um com concreto elástico e outro com concreto plástico afim de verificar a resistência e comportamento aos esforços solicitantes apresentados nos modelos de elementos finitos, bem como apresentar o limite máximo de ruptura de túneis com estas propriedades específicas.

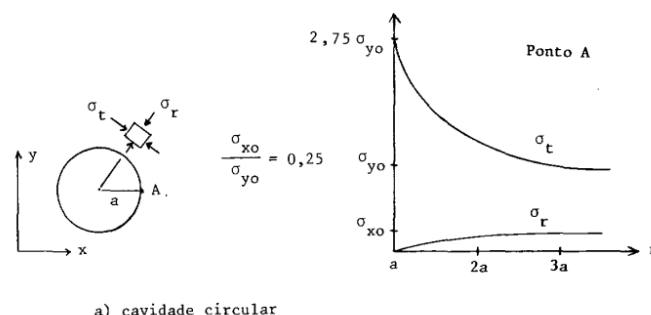
O presente artigo científico tem como foco isentar o uso de aço no processo de construção do túnel utilizando como solução a aplicação de um concreto plástico garantindo assim a total resistência aos esforços solicitantes.

2. Revisão Bibliográfica

Segundo escreveu Almeida (1977) a definição de Túnel pode ser considerada como uma cavidade subterrânea destinada a transportes, condução de água ou exploração de recursos minerais. Túneis tem um comportamento mecânico do maciço importante. A dimensão e cavidade de um túnel tem importância significativa com relação ao estado de tensões em suas vizinhanças.

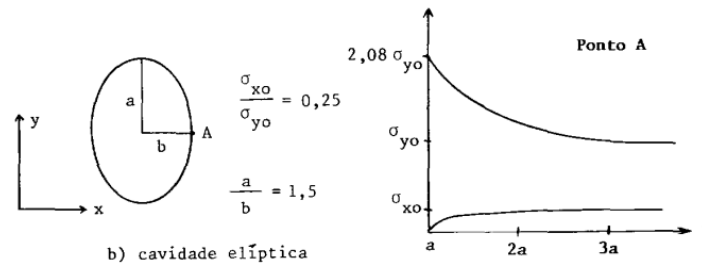
Os túneis, porém, têm duas cavidades: As cavidades de contornos suaves (circular ou elíptica conforme Figura 01 e 02) e as cavidades de contornos quebrados (retangulares ou em forma de ferradura conforme Figura 03).

Fig. 1- Cavidade Circular (Distribuição de tensões ao redor de cavidade)



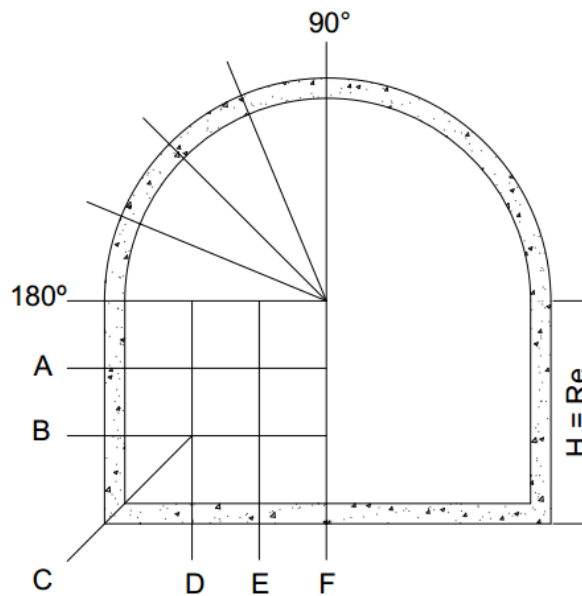
Fonte: Almeida (1977)

Fig. 2- Cavity Elíptica (Distribuição de tensões ao redor de cavidade)



Fonte: Almeida (1977)

Fig. 3- Cavity Ferradura

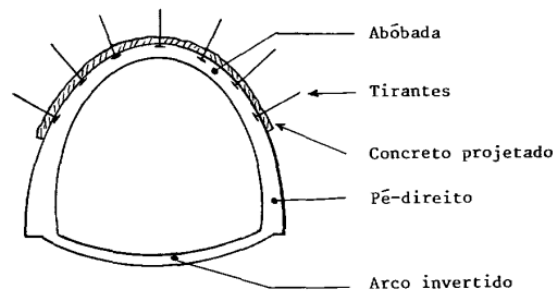


Fonte: Jensen (2019)

O solo possui características heterogêneas variantes com a profundidade (anisotropia), a velocidade e o passo de escavação são considerados constantes ao longo do avanço do túnel;

O suporte do túnel ou revestimento pode ser estudado em duas vertentes: a primária e a secundária. O revestimento primário é aplicado depois da escavação sendo imediatamente ou durante o processo, sempre é necessário assegurar as condições de segurança no processo subsequente de retirada dos materiais e iniciar o processo de mobilização das tensões no maciço controlando os deslocamentos. O revestimento secundário é aplicado quando o primário não é suficiente para satisfazer a estabilidade da cavidade a médio e longo prazo, o revestimento secundário pode ser composto adicionando uma camada de concreto projetado ou concreto pré-moldado para assim ajudar e estabilizar o túnel a médio e longo prazo. Devemos levar em conta no revestimento secundário a rigidez do maciço circundante, conforme retratado na Figura 04.

Fig.4 – Seção transversal de um túnel revestido



Fonte: Almeida (1977)

2.1 Túneis Mineiros (NATM)

O método NATM é utilizado com sucesso na construção de grandes estações subterrâneas e túneis. Uma de suas vantagens é a flexibilidade na fase de perfuração, que pode ser alterada a qualquer momento, de acordo com as necessidades da geometria e da parte da perfuração, o que às vezes é necessário em maciços que não apresentam bom desempenho ou estão sob forte pressão. Nestes casos, outras medidas associadas à utilização deste método reduzem o lençol freático, o pré-revestimento e as injeções, produtos químicos ou cimentos.

O NATM consiste na escavação sucessiva de um maciço com base em concreto projetado, associado a outros elementos como virabrequins de aço, chumbadores e fibras em concreto, dependendo da capacidade de auto-suporte do maciço.

Ao utilizar o método NATM, é intencional a modificação da massa adjacente, para adaptá-la ao contorno escavado, redistribuir e reduzir as tensões criadas, evitando assim a separação do maciço.

Os túneis no Brasil, na maior parte das vezes, têm pequenas extensões (raramente maiores que 1 ou 2 km), o que não justifica a mobilização de equipamentos para execução mecanizada. Por este motivo os túneis têm sido construídos pelo método NATM.

Devido à grande flexibilidade de formas e de sequências construtivas aplicáveis na execução do túnel em concreto projetado e às incertezas quanto às características dos maciços. Tomando-se como referência algumas sondagens isoladas e ensaios de campo e laboratório, permitem modelagens que forneçam resultados compatíveis com a realidade. Por este motivo, são frequentemente necessárias revisões e aprimoramentos de projeto, as quais devem ser feitas através da reavaliação dos modelos de cálculo com os dados reais.

Segundo escreveu Müller et al., (1988) (Trecho retirado da Tese de Mestrado Willian Carreira, 2014 PG.13) apresentaram alguns conceitos que devem ser seguidos na execução de túneis para que o NATM seja aplicado com sucesso:

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 autossuporte 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 autossustentação, 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 consequente perda da capacidade de autossuporte.

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 invert 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. (Trecho retirado da Tese de Mestrado Willian Carreira, 2014 PG.13)

O NATM é baseado no conceito de que o solo ao redor do túnel não atua apenas como uma carga, mas também como um elemento de suporte de carga. Normalmente, as atividades de escavação e apoio são continuamente ajustadas às condições do terreno, sempre considerando os requisitos técnicos/de projeto. A reação do solo, na forma de deslocamentos de revestimento, é medida para verificar a estabilidade da abertura e otimizar o processo de escavação e apoio.

Dependendo das condições do projeto (por exemplo, túnel de solo macio raso, túnel de rocha profunda) e os resultados das medições geotécnicas, os requisitos para um suporte específico são determinados. Os acordos contratuais devem ser flexíveis para garantir a utilização do tipo e montante de apoio mais económicos.

Os elementos de suporte típicos em NATM são concreto projetado e rock dowels. As nervuras de aço ou vigas treliçadas fornecem suporte inicial limitado antes que o concreto projetado endureça e garantem a geometria correta do perfil. Se as condições do solo exigirem suporte na face de escavação ou à sua frente, buchas de face, concreto projetado, estacas ou coberturas de tubos são instaladas como requeridos demandados.

A seção transversal da escavação é subdividida em cabeçalho superior, bancada e invertida, dependendo das condições do terreno e dos requisitos logísticos, ou seja, para facilitar o uso de instalações e máquinas padrão. As galerias de deriva lateral são fornecidas para limitar o tamanho de grandes faces de aço e assentamentos superficiais.

2.2 Escavações Subterrâneas e o desenvolvimento dos carregamentos em Suportes e Revestimentos

Ao realizar a abertura de um túnel temos a frente da escavação como um papel fundamental na estabilidade, de início a abertura está em equilíbrio, submetido a um estado de tensões iniciais. A remoção acarreta um rearranjo do estado de tensões, buscando uma nova situação de equilíbrio estático. A estabilidade da frente do túnel depende entre outros

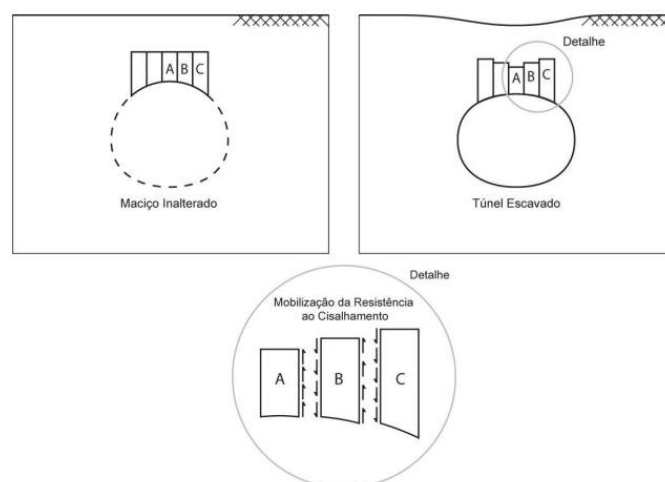
fatores das suas dimensões e das características do maciço, tendo como auxílio para essa estabilidade a adoção de uma estrutura de concreto projetado no contorno da escavação para conter as deformações do maciço.

Segundo escreveu Souza (1998) “A interação entre o maciço e essa estrutura empregada para restrição das deformações do maciço constitui um sistema altamente hiperestático, cujo estado de tensão-deformação não é de fácil determinação. Uma vez que as deformações permitidas ao maciço antes e após a colocação da estrutura de suporte acarretam redistribuições de tensões para zonas vizinhas não escavadas do maciço, o carregamento atuante no suporte, os esforços nele mobilizados e os deslocamentos que nele ocorrem, são interdependentes e correlacionados; não sendo apenas função das tensões iniciais e das características geométricas da abertura, mas também das propriedades mecânicas do maciço”. De acordo com França (2009), a diferença de deslocamento das faixas de solo acima do túnel, gerado após a escavação, causa a mobilização da resistência ao cisalhamento do solo (efeito de arco transversal). Este arqueamento também ocorre em outras direções, no plano lateral coincidente ao eixo longitudinal e no plano superior, que pode ser denominado como efeito de arco longitudinal. As tensões mobilizadas são transferidas para o trecho com revestimento já executado, na parte de trás da escavação, enquanto outra parte se direciona para a região ainda não escavada, podendo ocasionar uma ruptura na parte da frente da escavação.

A determinação dos carregamentos que se desenvolvem nos suportes e revestimentos dos túneis é bastante complexa, uma vez que é muito difícil representar as condições reais da estrutura em modelos. Para isso seria necessário levar em conta, entre outros fatores como o efeito tridimensional, as deformações já ocorridas, a variação do módulo de Young do concreto projetado, a representação tridimensional e bi das várias fases de construção, os modelos conceituais com a representação simplificada dos elementos, o que torna possível a execução do cálculo numérico, a caracterização das propriedades de cada material do maciço, do suporte e do revestimento em cada instante conforme apresentado na Figura 5.

Nos casos usuais de túneis em solo as tensões principais são de compressões verticais e horizontais, funções lineares da profundidade. As representações geológicas do maciço, do concreto e do aço podem ser feitas considerando-se diversos modelos, dependendo da complexidade desejada, pode-se utilizar desde modelos simples como os elástico-lineares até modelos complexos como os visco-elasto-plásticos. A geometria, mesmo no modelo conceitual.

Fig.5 – Efeito arco: Mobilização da resistência a cisalhamento do maciço nos arredores da escavação.



Fonte: França (2014)

Os modelos derivados formam dois grandes grupos: o grupo dos modelos de ações impostas (MAI) e o grupo dos modelos de ações espontâneas (MAE). A principal função dos MAE é estimar os carregamentos e os deslocamentos, os mais possíveis, através da consideração do maior número possível de variáveis. Nestes modelos verifica-se o comportamento da estrutura como um todo e o seu desempenho em relação às deformações. Já nos MAI, a ação ativa do maciço sobre o suporte é independente da sua deformação e é dada por um carregamento pré-definido. Neste método a compatibilização de deslocamentos ocorre somente para a determinação das reações passivas do maciço.

A elaboração de modelos tridimensionais, que poderiam representar com maior realismo as condições mais críticas do NATM na região da frente de escavação, ainda são bastante difíceis, mesmo com os recursos computacionais disponíveis no mercado tanto relativo ao software como ao hardware. Há possibilidade de elaborá-los, porém seria muito oneroso para serem aplicados dentro de um projeto e sem garantia de obtenção de resultados necessariamente melhores ou mais precisos.

Os modelos tridimensionais, quando há a possibilidade de utilizá-los, podem ser úteis na análise qualitativa de modos de ruptura. Podem ser elaborados modelos, estes resultados permitem que as intervenções sejam realizadas com maior eficácia na prevenção de colapsos, paramétricos. Ao decorrer dessa análise iremos apresentar algumas simulações de modelos tridimensionais.

Nos modelos bidimensionais, já é bastante comum a consideração de vários fatores: Consideração da não linearidade geométrica e de grandes deformações;

Representação de geologias mais realísticas e distintas para cada material componente do modelo;

Consideração de critérios de plastificação distintos para cada material;

Consideração da viscosidade;

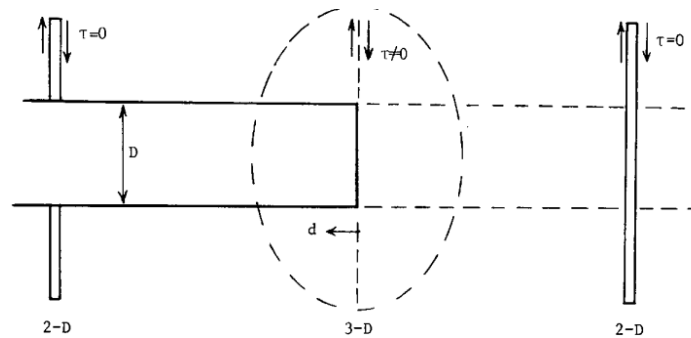
Utilização de elementos de contato entre as interfaces dos materiais com a consideração da rigidez e do atrito, que até há poucos anos eram inviáveis.

Os métodos de cálculo ainda são sujeitos a muita subjetividade, uma vez que as variações das solicitações são muito grandes conforme a variação dos parâmetros de entrada. Na maioria das vezes é mais importante prever comportamentos atípicos ou especiais para definir corretamente, as funções do suporte com maior precisão. Não prever certos comportamentos pode levar ao insucesso por falta de equilíbrio da estrutura.

Além dos métodos numéricos para a estimativa de carregamentos existem também as formulações empíricas baseadas em experimentos. Entre elas estão as formulações dadas por Terzaghi, o diagrama de Kastner que representa o comportamento das tensões nas vizinhanças de uma cavidade e do diagrama de Fenner e Pacher que representa as curvas de convergência-confinamento do revestimento e do maciço.

Segundo Celestino (1993) lembra que um aspecto importante a ser levado em consideração nos dimensionamentos dos revestimentos é o desenvolvimento tecnológico do concreto projetado e dos equipamentos de obra. Os concretos utilizados tendem a atingir resistências cada vez maiores, tanto finais quanto a baixas idades, e o desenvolvimento dos equipamentos tem proporcionado velocidades de avanço cada vez maiores. Estas características tendem a agravar as solicitações do suporte na região da frente, portanto, deverão ser levadas em consideração nos projetos conforme apresentado na Figura 6.

Fig.6 – Influência da frente de escavação no estado de tensões.



Fonte: Souza (1977)

2.3 Características do concreto e suas aplicações

Um dos pontos mais importantes do trabalho em questão, é o concreto, entender como ele trabalha e funciona tanto para resistir os esforços solicitantes quanto suas características físicas e mecânicas.

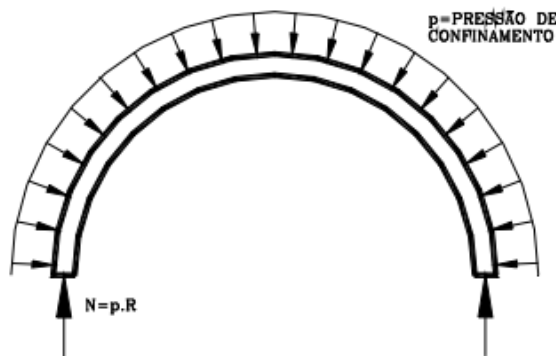
Quando pensamos em realizar uma estrutura de concreto sem empregar o aço, as vezes acaba causando uma “estranheza” aos ouvidos de quem ouve, mas não é uma prática muito incomum, lembrando que executamos blocos de fundação sem aço, quando a estrutura de concreto consegue resistir os esforços de tração e compressão sem o “reforço” do aço, a própria norma NBR 6122 - Fundações permite esta prática. Então mesmo não sendo muito comum esta ideia de realizar estruturas de concreto sem o aço empregado, ela não é nenhuma novidade e quando lembramos que o aço, é um dos materiais mais “nobres” e responsáveis por encarecimento das obras, se torna até relevante questionar se todas as peças de concreto da sua obra, precisa realmente do aço, pois caso consiga realizar uma estrutura com apenas concreto que mantenha a mesma segurança e conforto, estamos aliviando o orçamento da obra e até mesmo facilitando a execução.

Como o intuito do trabalho é estudar os túneis NATM, iremos nos aprofundar mais no concreto projetado, porém as propriedades do concreto projetado não são diferentes das propriedades da argamassa e do concreto de proporções similares, aplicados por processos convencionais.

2.3.1 Casca e Cambota com a utilização do concreto projetado

O concreto projetado é um elemento essencial para o suporte do túnel, um dos nomes usuais no meio do estudo dos túneis é a casca de concreto. A casca de concreto projetado confina o maciço restringindo os deslocamentos na superfície que foi escavada e por conta disso as tensões tendem a se manter em equilíbrio na sua abertura conforme Figura 7. O concreto projetado ajuda a proteger a superfície do maciço contra a degradação progressiva por consequência da umidade como também tem como sua função o confinamento.

Fig.7 – Esquema de equilíbrio da casca de concreto Projetado



Fonte: Murakami (2002)

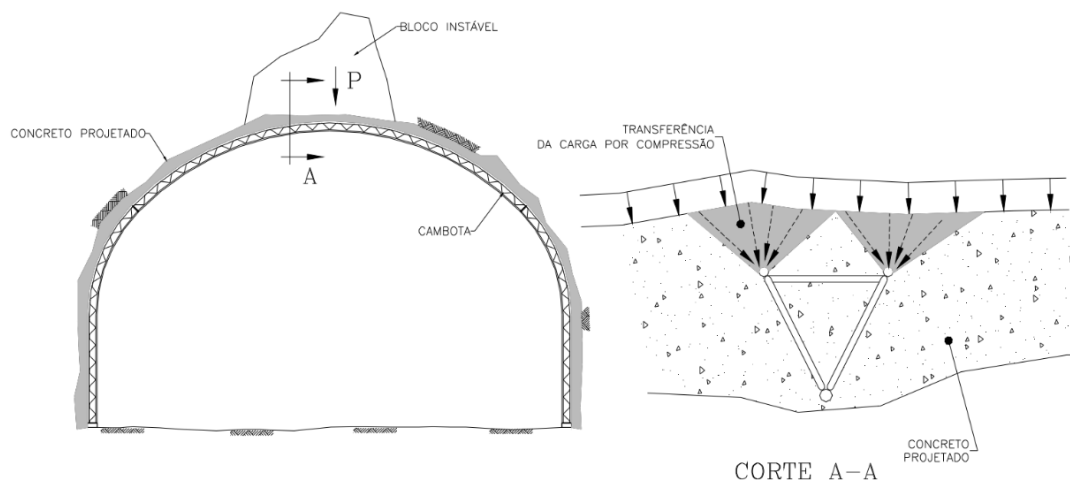
Por consequência da flexibilidade da casca de concreto projetado as pequenas deformações possibilitam a estrutura buscar o equilíbrio através de esforços predominantemente normais. Assim como a casca de concreto projetado a cambota pode ter funções variadas dependendo da concepção utilizada em projeto, podendo ser estrutural ou não. Segundo Murakami (2007) as combotas podem se destacar em:

1 – Função estrutural (A): junto à frente de escavação, a cambota ajuda a confinar o maciço recém escavado, juntamente com o concreto projetado ainda com baixa resistência, estabilizando eventuais mecanismos localizados. O concreto projetado com adição de aceleradores adquire resistência pelo menos igual ao do solo nas primeiras horas, permitindo o caminhamento das cargas para a cambota que suporta as solicitações por esforços normais;

2 – Função estrutural (B): enquanto o concreto projetado não adquirir resistência, a cambota pode trabalhar resistindo aos esforços de flexão e cisalhamento devidos às cargas concentradas do maciço; às assimetrias geométricas, geológicas ou de carregamento; às influências da região do emboque;

3- Função estrutural (C): a cambota pode fazer parte da estrutura do revestimento ou suporte associado ao concreto, trabalhando como armação. Neste caso, devem ser executados detalhes apropriados de emendas e posicionamento, para que ele possa exercer o seu trabalho como armação de flexão (Figura 8 demonstra essa função estrutural).

Fig.8 – Função da cambota de confinamento do maciço contra degradação do solo.



Fonte: Murakami (2002)

2.3.2 Elasticidade e Plasticidade

Uma das propriedades mecânicas mais importantes do concreto é seu módulo de elasticidade, pensando em uma estrutura convencional, queremos que o concreto resista aos esforços de tração, compressão e flexão, mantendo-se no regime elástico. Um exemplo para entender o regime elástico, é imaginar que quando pegamos um elástico na mão e esticamos, estamos gerando um esforço solicitante, porém se eu retirar esse esforço, o elástico volta a sua origem sem qualquer deformação aparente, com o concreto segue a mesma analogia, queremos que ele resista as forças solicitantes, sem deformar o suficiente para superar o regime elástico, ou seja, que não deforme sua forma de origem.

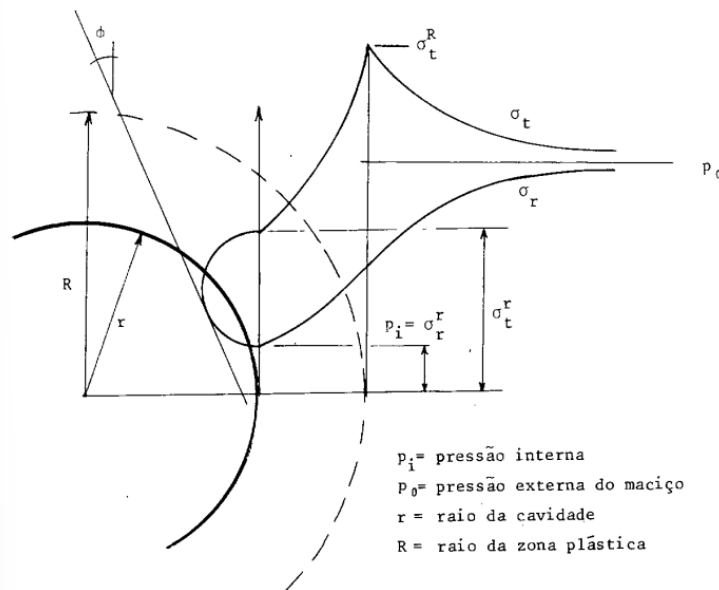
Mas como qualquer propriedade mecânica, existe um limite que não pode ser ultrapassado para que a peça de concreto continue no regime elástico, caso ultrapasse esse limite, chegamos no próximo regime, regime plástico, utilizando a mesma analogia do elástico, caso esticássemos o elástico excessivamente, ele começaria a perder seção e se tornaria “mais fino”, portanto, quase retirássemos o esforço, ele não voltaria a sua forma de origem.

Para cálculos de pilares e vigas, é improvável que seja calculado estas estruturas para estarem nos regimes de plasticidades, usualmente queremos que as estruturas estejam nos regimes elásticos. Portanto para dar continuidade no trabalho, precisa ser abordado mais a fundo o conceito de plasticidade e como ela afeta as estruturas de concreto. A teoria da plasticidade tem sua utilidade para soluções em problemas de estabilidade em geral, e o objetivo maior desta teoria é nos ajudar a determinar as condições de ruptura, podendo ser empregadas nas estabilidades de taludes e empuxos de terra e determinar as capacidades de cargas de fundações.

Dentro da mecânica dos sólidos, a teoria da plasticidade solicita a consideração de equações de equilíbrio, equações de compatibilidade e relações entre tensões e deformações conforme detalhado na Figura 9. Segundo escreveu Almeida, Márcio de Souza (1977, p.28) “As equações de equilíbrio e de compatibilidade são independentes das propriedades dos materiais e, portanto, são válidas para comportamentos elásticos e plásticos. A diferença entre as duas teorias está na relação entre tensões e deformações ou lei constitutiva dos materiais.”

Na teoria da plasticidade, as relações entre as tensões e deformações são mais complexas comparadas a teoria de elasticidade linear que é baseada na lei de Hooke, que como o próprio nome diz, estabelece uma relação linear entre as tensões e deformações. A análise conjunta dos comportamentos elástico e plástico torna-se possível com a utilização do método dos elementos finitos.

Fig.9 – Método das zonas plásticas



Fonte: Souza (1977)

2.3.3 ESFORÇOS SOLICITANTES

As soluções teóricas disponíveis com base na teoria da elasticidade (Terzaghi; Richart, 1925), consideram as tensões iniciais constantes ao redor da cavidade.

Kulhawy (1975) verificou, através do método dos elementos finitos, que a consideração de tensões iniciais geostáticas é importante para profundidades menores que 150 metros, no caso de rocha.

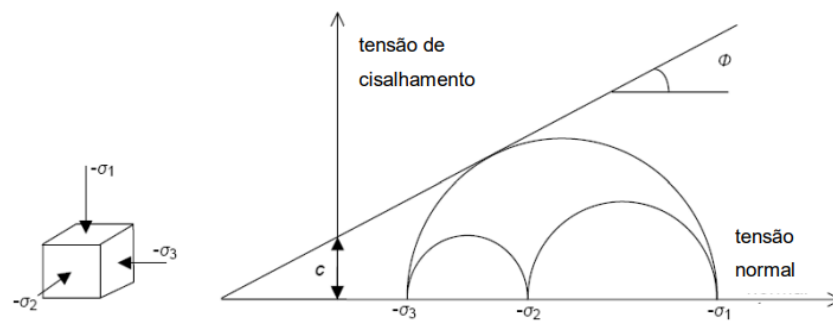
2.3.4 Método das zonas plásticas

O método das zonas plásticas utiliza a teoria introduzida por Fenner e desenvolvida por Kastner para aplicação a problemas de estática de túneis. O sistema estático considerado é um cilindro circular submetido a pressões interna e externa constantes. A pressão externa é proveniente do maciço e a pressão interna se relaciona à resistência oferecida pelo revestimento. Essa hipótese de carregamento é justamente uma limitação do método, que só se aproxima razoavelmente do real quando a profundidade do túnel é muito maior que sua altura (Zagotis, 1975).

O material do maciço é considerado elasto-plástico perfeito. No domínio elástico o estado de tensões é determinado de acordo com as equações da teoria da elasticidade para cavidades circulares. No domínio plástico o material obedece ao critério de escoamento de Coulomb.

Como base do trabalho, é necessário entender a teoria de Mohr-Coulomb, também conhecido como escoamento de Coulomb, em suma, é um modelo matemático que prevê como os materiais frágeis se comportam quando solicitados à tensão de cisalhamento e tensão normal (Figura 10). Grosso modo, o modelo matemático é aplicado em materiais que apresentam resistências à compressão muito superiores aos de tração, como por exemplo, o concreto que apresenta ótima resistência à compressão e bem limitado à tração.

Fig.10 – Definição dos parâmetros de resistência



Fonte: Correia (2014)

A partir das considerações acima, é calculada a fronteira das regiões elástica e plástica no maciço. Para um estado de tensões iniciais hidrostático, a zona plástica terá forma circular, cujo raio poder ser determinado analiticamente, assim como as tensões no contorno da cavidade (Szechy,1966).

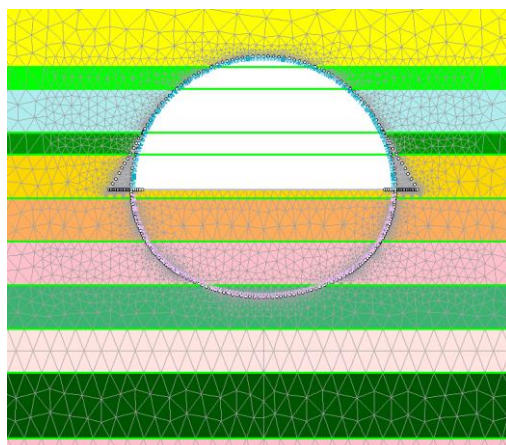
Como a extensão da zona plástica depende consideravelmente da relação entre as tensões iniciais horizontais e verticais, Kastner também desenvolveu uma teoria de forma a levar em consideração valores de K_0 diferentes de 1.

2.3.5 O método dos elementos finitos

Para análise dos maciços, tanto a cambota, quanto o revestimento de concreto, iremos utilizar um software que utiliza como base, o método dos elementos finitos, esse método é necessário para se fazer análise correta do túnel, considerando a complexidade do cálculo, e para entendermos melhor o conceito do método de elemento finitos (demonstrado na Figura 11), é necessário comentar o conceito do método, conforme dito por Almeida, Márcio de Souza (1977, p.28)

O método dos elementos finitos é um processo de cálculo numérico para a obtenção de soluções aproximadas de certos problemas físicos. Trata-se de uma técnica de interpolação que permite aproximar qualquer função contínua por um modelo de cálculo discreto, que consiste na definição de um conjunto de valores da função num número finito de pontos do seu domínio (pontos nodais), e de um conjunto de subdomínios (elementos finitos), onde se aproxima a função a estudar. Em cada elemento finito a definição da função é feita unicamente em relação aos valores da função do número discreto de pontos nodais existentes nesse elemento. São estudadas condições para que a função adotada nos subdomínios atenda a condições de convergência, o que garantirá que refinando-se a malha a solução convirja para a solução exata. O método possibilita a idealização satisfatória da sequência de escavação e construção o que possibilita a comparação entre os valores cálculos e observados para cada etapa. Esta análise mais elaborada tem, todavia, a inconveniência de maior número de dados de entrada, com o consequente acréscimo de custo e tempo para interpretação dos resultados. Este procedimento, no entanto, é bastante racional e de grande valia principalmente quando estão em jogo importantes decisões de projeto. Uma vantagem do método é possibilitar, com facilidade, o estudo paramétrico para o problema. É necessário para tal que os dados de entrada combinados sejam os mais significativos, de forma que o número de casos estudados esteja dentro dos limites práticos. Outra vantagem do método é permitir a consideração de materiais anisótropos e heterogêneos e comportamentos não lineares. O insuficiente conhecimento das leis constitutivas dos materiais (e não a impossibilidade de as incluir no método), bem como a imprecisão decorrente dos parâmetros de entrada dos materiais do maciço, são as maiores limitações do uso do método dos elementos finitos no projeto de túneis. É importante frisar que os métodos anteriores, de hipóteses mais simples, utilizando os mesmos parâmetros, terão imprecisões consequentemente maiores. Existem também limitações devidas ao equipamento computacional disponível e eventualmente ao custo de certas análises. Isto acontece principalmente ao simular as etapas de escavação, como descrito acima, e quando se utilizam leis constitutivas mais complexas que o comportamento elástico linear. Em qualquer caso é necessário que as análises de computador, instrumentação e conhecimento prático de túneis se complementem, e que a importância da obra e os resultados justifiquem o custo despendido. Almeida, Márcio de Souza (1977, p.28)

Fig.13 – Túnel detalhado no programa Phase2



Fonte: Autor (2022)

3.1.1 Geologia

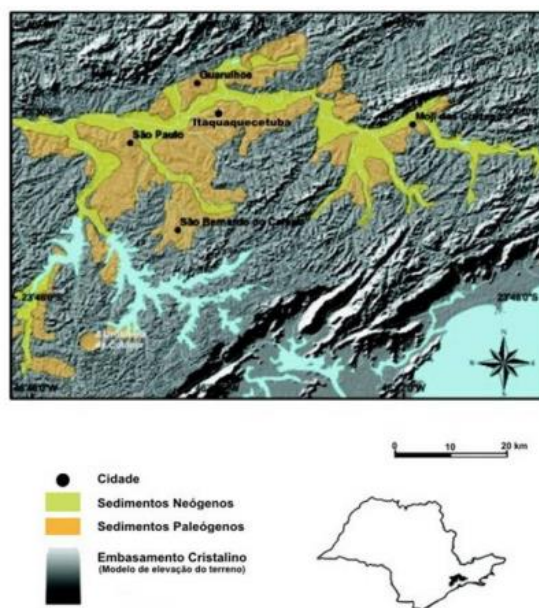
3.1.1.1 Bacia Sedimentar de São Paulo

Segundo escreveu Riccomini e Coimbra (1992) a bacia de São Paulo (conforme demonstração da Figura 14) que se encontra localizada no Planalto Atlântico, na porção leste do Estado de São Paulo. Tendo uma área insuficientemente a 1.000km², apresentando rochas sedimentares distribuídas irregularmente em uma faixa com um eixo maior de 75km, entre leste, a oeste, e menor de 25km, entre norte e ao Sul. A topografia da bacia é suave, com suas colinas arredondadas, com a cota mínima a 718m, na confluência do Rio Pinheiros com o Rio Tietê, e a cota máxima a 831m no bairro Sumaré.

Com sua camada de sedimentação bastante variável, apresenta uma espessura média de 60 a 80m e está assentada sobre embasamento rochoso, constituído por gnaisses alterados, micaxistos e migmatitos.

A constituição do pacote sedimentar é bastante diversificada, variando segundo a localização e a posição que ocupa ao longo do perfil. Nas partes mais elevadas da cidade, acima da cota 750m, encontram-se as argilas porosas vermelhas, solo não saturado, altamente poroso, e re-conhecidamente laterítico. Imediatamente abaixo, coincidindo geralmente com o nível d'água, situa-se a argila vermelha rija, também vermelha e contendo alto teor de óxido de ferro, que ocasionalmente se mostra muito concentrado, formando concreções de limonita. Outro tipo de solo que aflora à superfície, o solo variegado, é encontrado entre as cotas 790 e 715m, e tem este nome por apresentar notável variação na sua coloração e tonalidade. É extremamente heterogêneo quanto à compactidade e composição granulométrica. Abaixo do nível atual de drenagem é comum encontrarem-se as argilas duras cinza-esverdeadas, também conhecidas como Taguá, geralmente associadas a lentes de areia fina, compactas, exibindo elevada pressão de pré-adensamento e números de golpes SPT > 20. Preenchendo o fundo da bacia, abaixo da cota 715m, assentadas diretamente sobre o embasamento rochoso localizam-se as areias basais, material de granulometria média, pouco argiloso e de grãos arredondados. Finalmente, de deposição mais recente, são encontradas nas várzeas junto aos rios e córregos, os depósitos quaternários, material aluvionar constituído de argilas orgânicas moles e de areias finas fofas (Parreira, 1991).

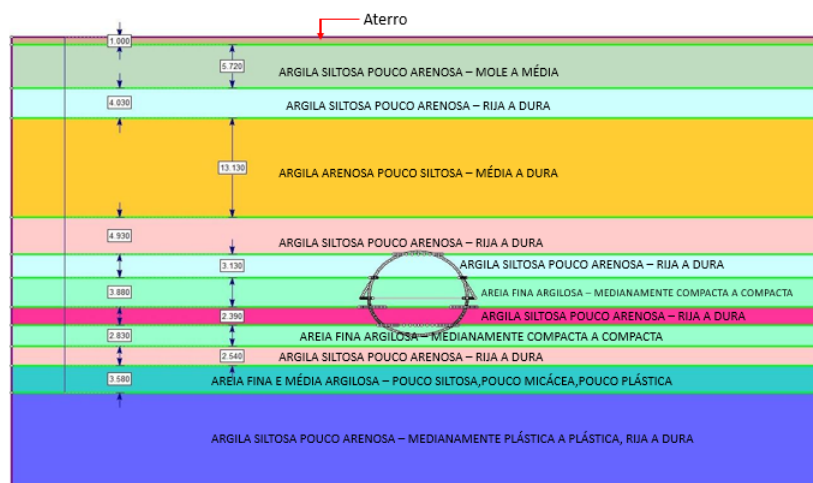
Fig.14 – Localização da Bacia de São Paulo na RMSO.



Fonte: Campos & Albuquerque Filho (2005).

O perfil geológico obtido com várias sondagens realizadas na região do túnel está representado na Figura 15.

Fig.15 – Perfil geológico do solo (localização do túnel).



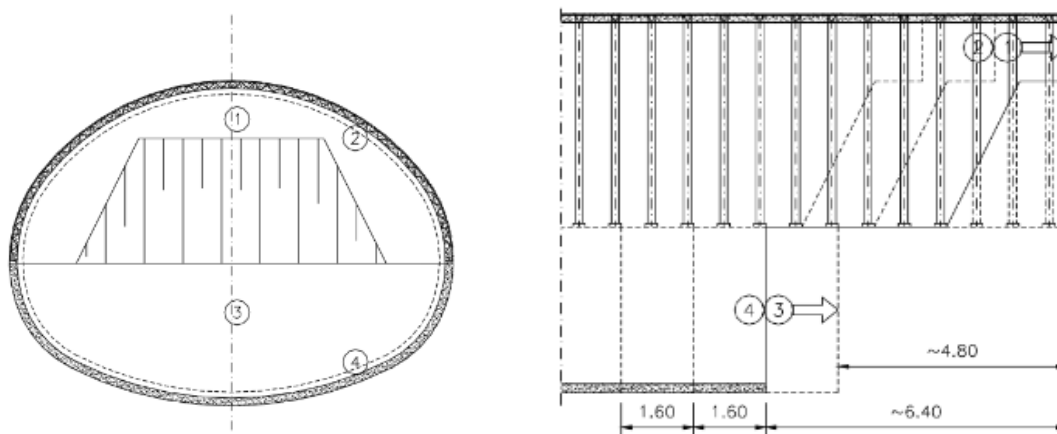
Fonte: Autor (2022)

Conforme demonstrado na Figura15 a camada da superfície tem um aterro com 1m, constituído por silte argiloso com areia fina, sobreposta a uma camada de argila siltosa arenosa mole a média, com 5,72m, sobreposta a uma camada de argila siltosa pouco arenosa rija a dura, com 4,03m, sobreposta a uma camada de argila arenosa pouco siltosa média a dura, com 13,13m, sobreposta a uma camada de argila siltosa pouco arenosa rija a dura, com 4,93m, sobreposta argila siltosa pouco arenosa rija a dura, com 3,13m, sobreposta a uma camada de areia fina argilosa compacta a compacta, com 3,88m, sobreposta a uma camada de argila siltosa pouco arenosa rija a dura, com 2,39m, sobreposta a uma camada de areia fina argilosa compacta a compacta, com 2,83m, sobreposta a uma camada de argila siltosa pouco arenosa rija a dura, com 2,54m, sobreposta a uma camada de areia fina média argilosa, pouco siltosa, pouco micácea, pouco plástica, compacta a compacta, com 3,58m, sobreposta a uma camada de argila siltosa pouco arenosa plástica a plástica, rija a dura. O nível do lençol freático foi detectado a cerca de 10,60m de profundidade.

3.1.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O método construtivo utilizado na elaboração desse estudo é baseado nos princípios NATM (New Austrian Tunneling Method). O método construtivo consiste na escavação de dois lances avançando da calota superior, mantendo-se o núcleo frontal, instalando-se imediatamente após a escavação, dois lances de cambotas (Na figura 16 demonstramos um exemplo desse método construtivo)

Fig.16 – Exemplo de Sequência construtiva de um túnel.



Fonte: França (2006)

3.1.4 Análises

A análise numérica da escavação do túnel foi realizada através do programa Phase 2, versão 7.0, desenvolvimento pela empresa Rocscience. O Rocscience é um programa que utiliza o método dos elementos finitos para a simulação bidimensional do comportamento de maciços de solo e rocha sujeitos a alterações em seus estados de tensões.

É um programa que permite a escavação do túnel analisando de forma evolutiva o andamento, em fases incrementais de tensões, simulando todos os estágios de avanço da escavação e da execução do revestimento primário e secundário.

Para o estudo em questão foi realizada uma análise numérico bidimensional. A análise numérica foi realizada pelo meio de escavação e aplicação em fases do revestimento primário do túnel e ao final a aplicação do revestimento secundário.

O objetivo principal dessa análise numérica foi avaliar o comportamento do maciço utilizando dois princípios da verificação estrutural do suporte, um dois princípio será a utilizando do suporte com o aço e o segundo princípio será a utilização do revestimento sem o aço.

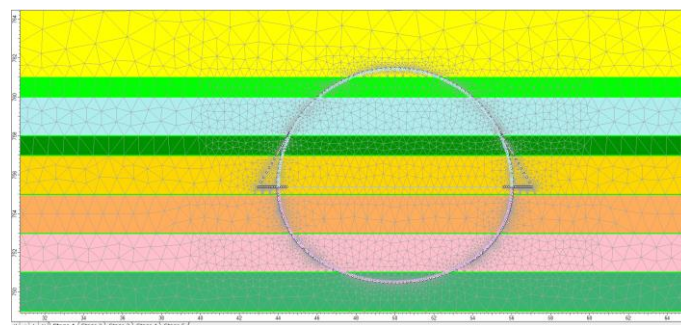
Conforme apresentado abaixo e ilustrados pelas Figuras 17/18/19, as fases dos processamentos numéricos que foram adotados são:

Fase 1: Definição da malha de elementos finitos e aplicação das tensões

Fase 2 a 4: Realização progressiva do Módulo de Elasticidade do solo no interior da calota, para simular os passos de avanço da escavação da calota.

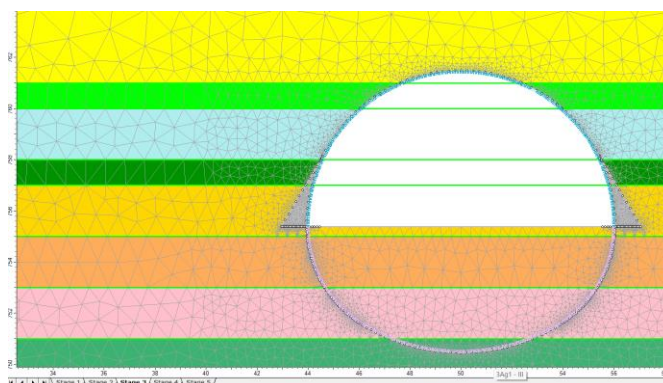
Fase 5: Escavação da Calota

Fig.17 – Modelo Geológico-geotécnico em malha de elementos finitos e condições de contorno adotado Stage 01



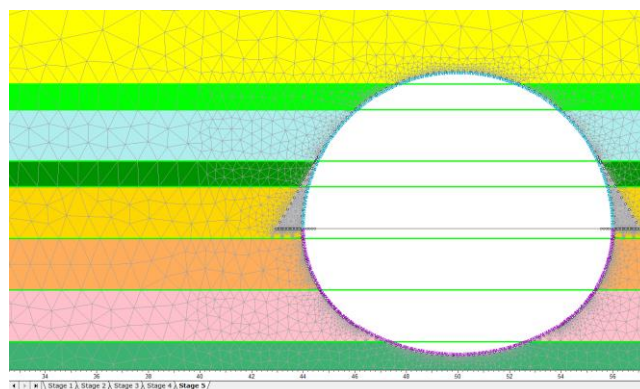
Fonte: Autor (2022)

Fig.18 – Modelo Geológico-geotécnico em malha de elementos finitos e condições de contorno adotado Stage 03



Fonte: Autor (2022)

Fig.19 – Modelo Geológico-geotécnico em malha de elementos finitos e condições de contorno adotado Stage 05



Fonte: Autor (2022)

4. Metodologia

Segundo escreveu Lucas de Araújo, SALVI, Levi, 2020 “A escolha do método para escavação de túneis é determinada pelo projeto de traçado e pelo tipo de solo ou rochas encontradas em cada região. No entanto, o método de escavação está ligado diretamente a velocidade desejada para execução do serviço e ao tipo de solo. Esses dois fatores regem o estudo de viabilidade, porque o método mais rápido dificilmente será o mais econômico e sustentável. A escolha equivocada do método poderá acarretar uma manutenção mais onerosa para o projeto na sua totalidade, que engloba a execução, acabamento e manutenção.”

A metodologia empregada neste trabalho envolveu uma ampla pesquisa bibliográfica relativa à racionalização do emprego de aço no processo de construção, plastificação e elasticidade dos tuneis NATM (conforme demonstrado na Figura 20).

A introdução apresenta um histórico da evolução do processo construtivo, descrevendo as diferentes tipologias arquitetônicas utilizadas ao longo do tempo.

Os tipos mais usuais de sistemas estruturais são descritos no decorrer do trabalho, bem como a evolução dos métodos de cálculo até os dias atuais, apresentando conceitos básicos relacionados ao comportamento estrutural, natureza das ações, carregamentos, estabilidade, equilíbrio, estados limites, flambagem, flexão, torção, rigidez entre outros sem esquecer os critérios de segurança, com o objetivo de proporcionar aos pesquisadores uma melhor compreensão dos fenômenos estruturais e fornecer subsídios que os possam auxiliar na tarefa de interpretação dos resultados fornecidos pelo software Rocscience Phase2 7.0 programa este utilizado para simulação dos cálculos.

A seguir foi realizada uma explanação sobre as cavidades de um túnel, suporte ou revestimento tanto primário quanto secundário, a fim de assegurar a segurança no processo subsequente de retirada dos materiais e iniciar o processo de mobilização das tensões no maciço controlando os deslocamentos.

Dando seguimento ao trabalho, citamos os (Tuneis Mineiros - NATM), que obteve um grande sucesso na construção de grandes estações subterrâneas e tuneis, juntamente com os principais conceitos a serem seguidos na execução de túneis para que o NATM seja aplicado com sucesso.

Adiante trataremos a escavações subterrâneas e o desenvolvimento dos carregamentos em suportes e revestimentos onde ela diz que a abertura de um túnel tem a frente da escavação como um papel fundamental na estabilidade, de início a abertura está em equilíbrio, submetido a um estado de tensões iniciais.

O concreto projetado e suas utilizações no sistema de tuneis é um dos pontos mais importantes do trabalho em questão, entender como ele trabalha e como funciona, tanto para resistir os esforços solicitantes, tanto quanto suas características físicas e mecânicas.

Uma das propriedades mecânicas mais importantes do concreto é seu módulo de elasticidade, pensando em uma estrutura convencional, queremos que o concreto resista aos esforços de tração, compressão e flexão, mantendo-se no regime elástico.

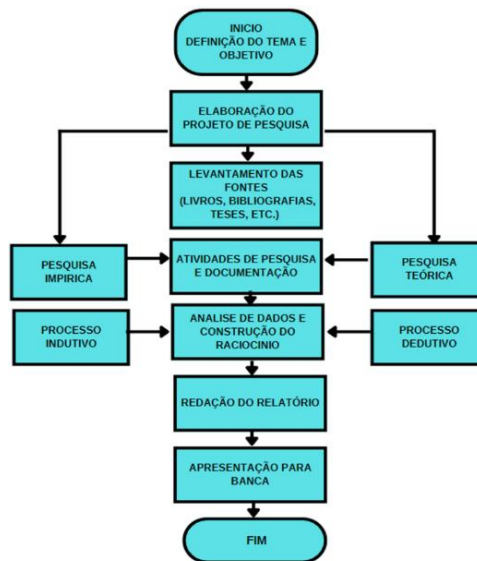
A utilização do método dos elementos finitos é um processo de cálculo numérico para a obtenção de soluções aproximadas de certos problemas físicos.

O método possibilita a idealização satisfatória da sequência de escavação e construção o que possibilita a comparação entre os valores cálculos e observados para cada etapa.

De acordo com os critérios de segurança para o dimensionamento dos elementos de suporte ou para se concluir que a cavidade aberta é estável sem a necessidade de suportes, é necessária a adoção de determinado critério de segurança. Com esse objetivo devem ser fixados valores de deslocamentos, tensões e deformações que não devem ser excedidos.

Para finalizar apresentamos os resultados e discussões após análises numéricas realizadas através do software, onde pudemos concluir nossos estudos que porventura possam vir a contribuir com demais pesquisadores.

Fig.20 – Modelo de Estrutura de desenvolvimento



Fonte: Autor (2022)

5.Resultados e Discussão

Conforme apresentado neste trabalho foram apresentados dois modelos numéricos com o intuito de demonstrar o comportamento do túnel em questão com a não utilização do aço. Foram utilizados dois modelos para esse caso, o primeiro modelo representando os materiais como elasto-plástico e o segundo modelo representando os materiais como elásticos.

Ao analisar os dois modelos numéricos foi verificado que a resistência do modelo plástico atende aos quesitos necessários para o estudo em questão, onde pode ser observado na Figura 25, onde o resultado hiperestático teve sua ruptura, porém teve seu apoio e resistência devido aos fatores externos principalmente a resistência do solo e o concreto utilizado.

Após os momentos e forças axiais coletados do software Phase2, foram calculados com o auxílio de planilhas, e foram considerados seguintes considerações:

Tabela 01 – Dados para a realização dos cálculos da Envoltória do Concreto Simples

SEÇÃO DE CÁLCULO		
Base (bw)	100	cm
Altura (h)	25	cm
Concreto	30	MPa
I	0,00130	m ⁴
W	0,01628	m ³
A	0,25000	m ²

FATORES DE MAJORAÇÃO	
gf	1,30
gc	1,68

Fonte: Autor

Tabela 02 – Dados para a realização dos cálculos da Envoltória do Concreto Armado

Geometria da Seção	
b (m)	1,00
e (m)	0,25
c (m)	0,05

Parâmetros do Concreto	
fck (MPa)	30,00
gc	1,40
fcd (Mpa)	21,43

Parâmetros do Aço	
fyk (MPa)	600,00
gk	1,15
fyd (MPa)	521,74

Face 1	
fi (mm)	5
espa (cm)	10
n. cam	1
As1	1,96

Face 2	
fi (mm)	5
espa (cm)	10
n. cam	1
As1	1,96

Total	
Astotal	3,93

w	0,04
---	------

Fonte: Autor

Sendo as seguintes fórmulas:

$$I = \frac{bw \cdot h^3}{12} \quad [m^4] \quad (1)$$

$$W = \frac{I}{h} \quad [m^3] \quad (2)$$

$$A = bw \cdot h \quad [m^2] \quad (3)$$

$$N_r = n \cdot h \cdot bw \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

$$M_{r-Montoya} = m \cdot bw \cdot h^2 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5)$$

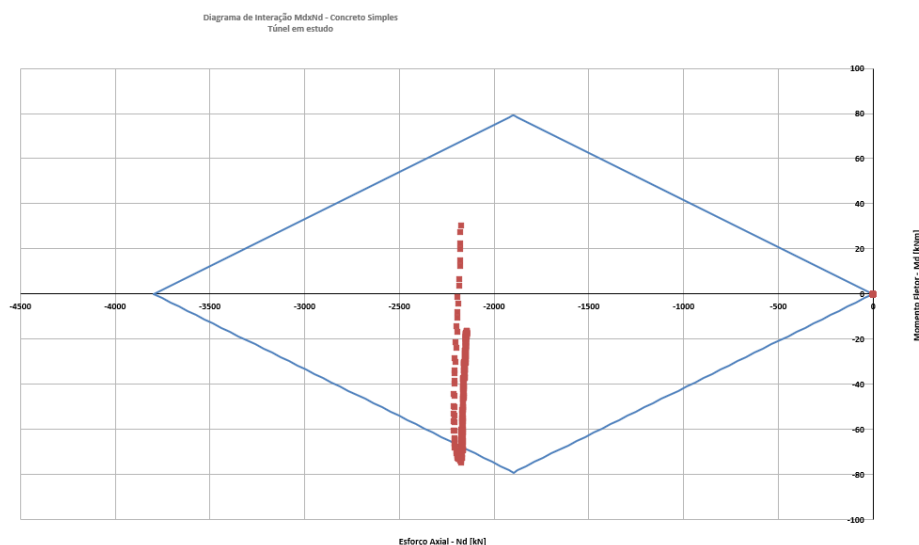
$$e = \frac{M_r}{N_r} \quad [m] \quad (6)$$

$$\sigma_{-Montoya} = \frac{N_r}{bw} \cdot h + \frac{M_{r-Montoya}}{bw} \cdot \frac{h^2}{6} \quad (7)$$

$$\sigma'_{-Montoya} = \frac{N_r}{bw} \cdot h - \frac{M_{r-Montoya}}{bw} \cdot \frac{h^2}{6} \quad (8)$$

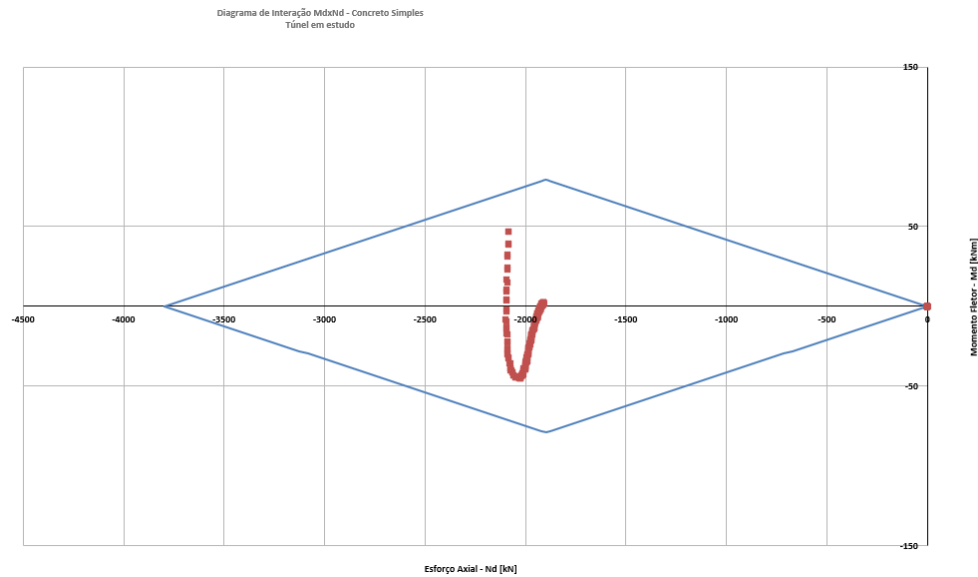
Com as seguintes fórmulas descritas acima, foram obtidos os seguintes resultados, de acordo com os diagramas a seguir:

Fig.21 – Diagrama de Interação MdxNd Revestimento – Concreto Simples (Elástico)



Fonte: Autor

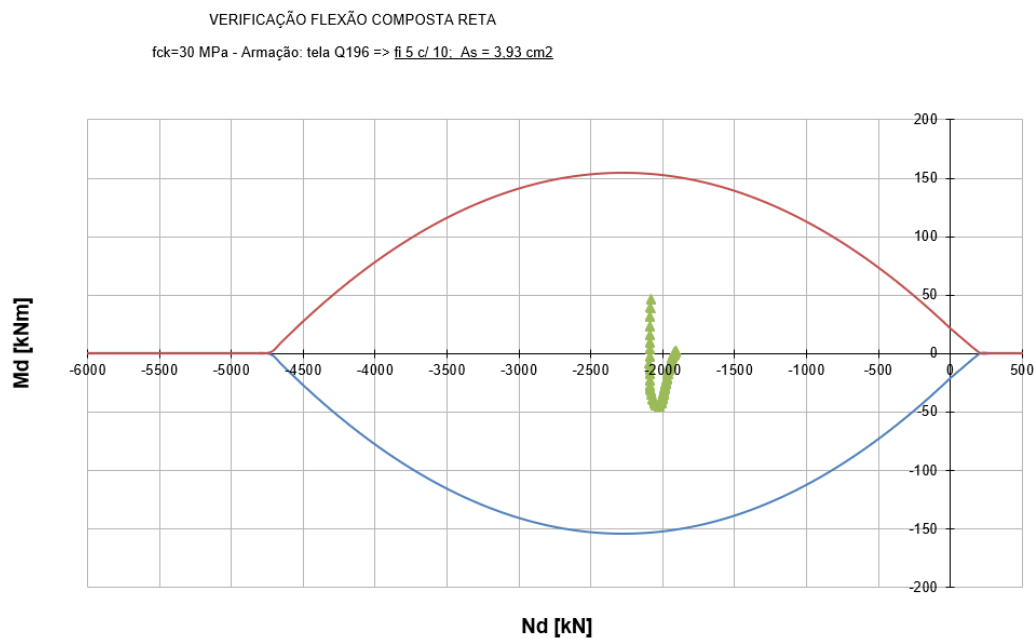
Fig.22 – Diagrama de Interação MdxNd Calota Fase Final – Concreto Simples (Elástico)



Fonte: Autor

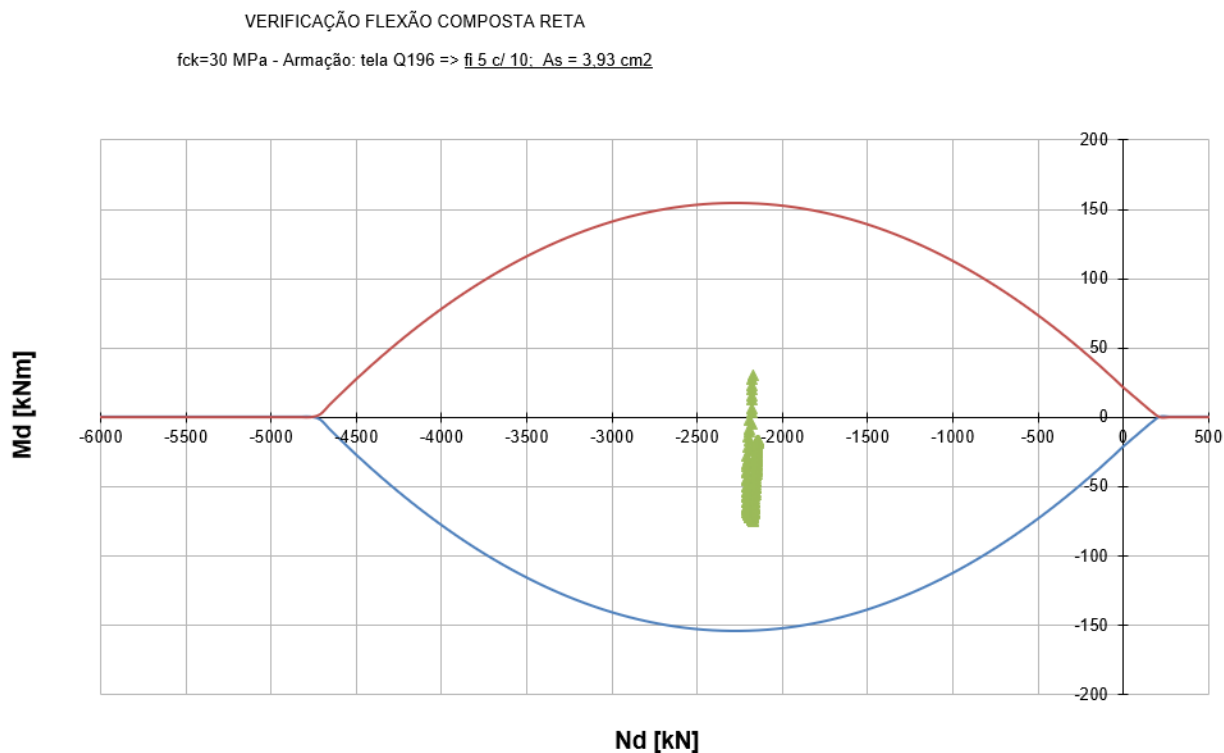
Conforme apresentado nos gráficos acima, o concreto simples, considerando o concreto no regime elástico, ele tem sua ruptura em $\sim -69,14 \text{ kN.m}$ e $\sim -2200 \text{ kN}$ de esforços solicitantes no revestimento. No caso da calota, todos os esforços foram resistidos.

Fig.23 – Diagrama de Interação MdxNd Calota Final – Concreto Armado



Fonte: Autor

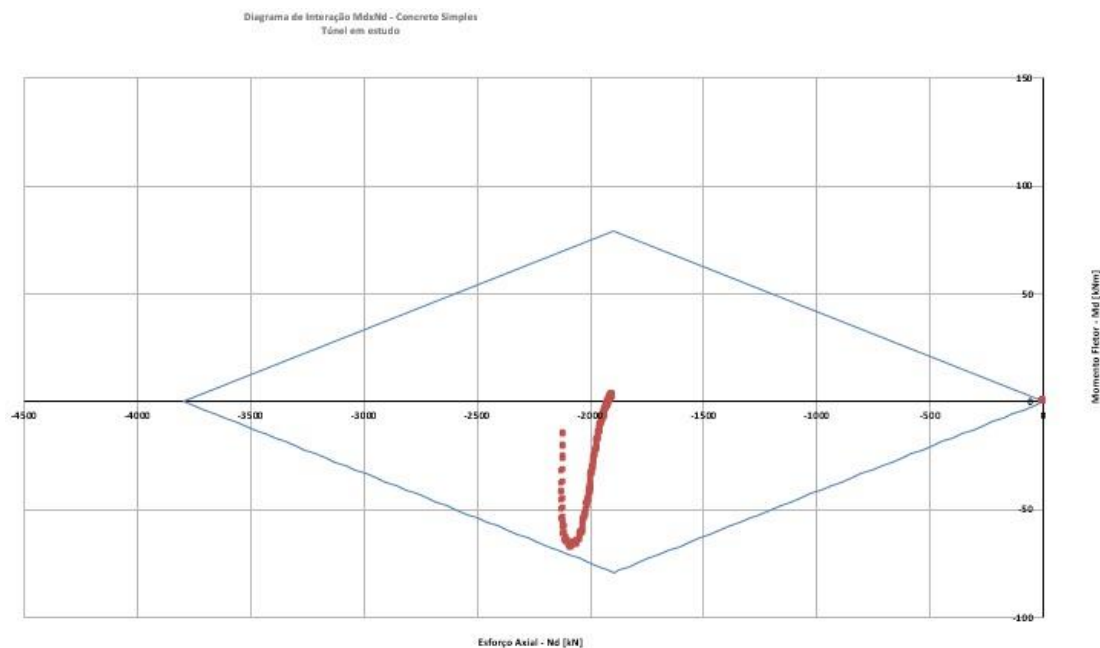
Fig.24 – Diagrama de Interação MdxNd Revestimento Final – Concreto Armado



Fonte: Autor

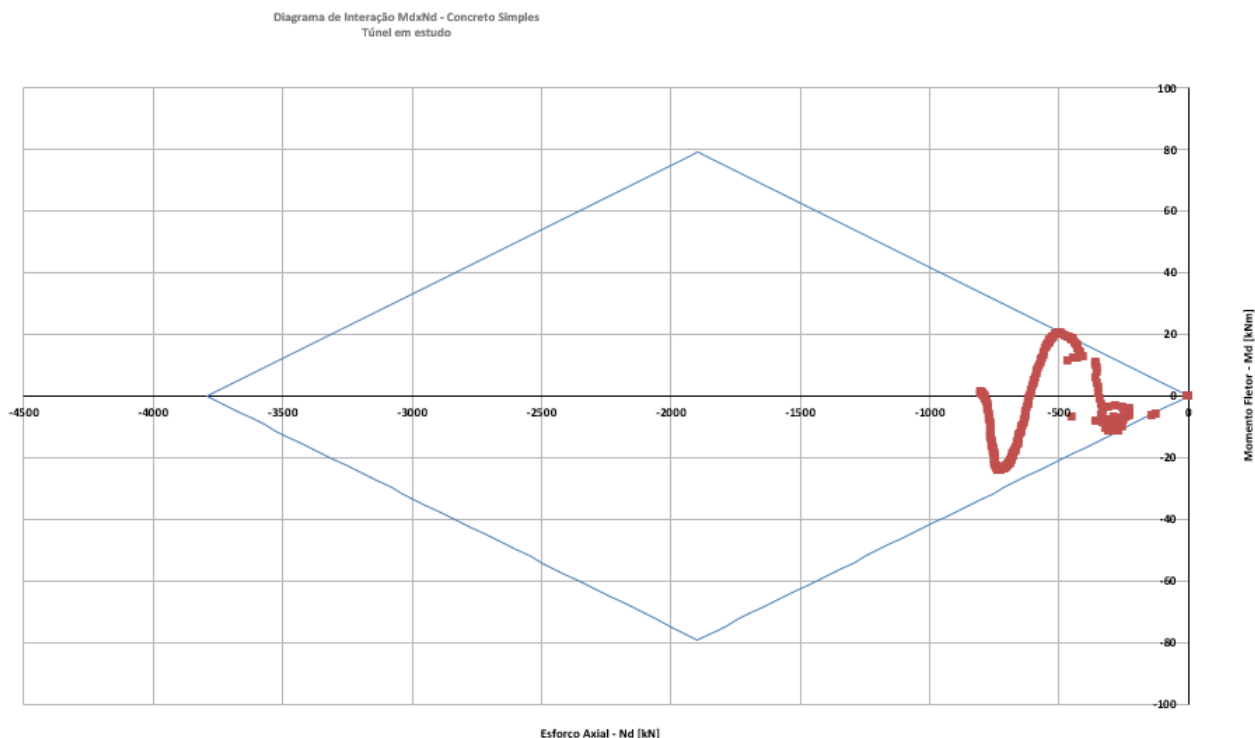
Como considerado o concreto no regime elástico sem aço, os esforços solicitantes não foram resistidos, foi verificado a resistência caso reforçasse o revestimento e a calota com aço, no caso considerado a tela de aço Q196, muito comum para esses tipos de obra, totalizando em área de aço, 3,93 cm² para calota e revestimento. Como apresentado no gráfico, o túnel se mostrou eficiente quando o aço foi instalado, resistindo os esforços solicitantes com grande folga.

Fig.25 – Diagrama de Interação MdxNd Calota– Concreto Simples (Plástico)



Fonte: Autor

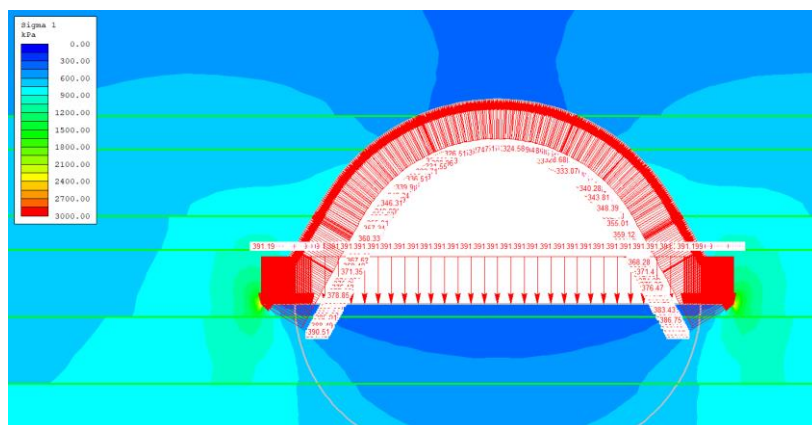
Fig.26 – Diagrama de Interação MdxNd Revestimento– Concreto Simples (Plástico)



Como demonstrado acima, os esforços solicitantes foram resistidos, tanto pela calota, quanto pelo revestimento. Apenas um apontamento, no revestimento os esforços ficaram no limite, tendo seus valores nas grandezas de 20 kN.m e 50 kN, respectivamente.

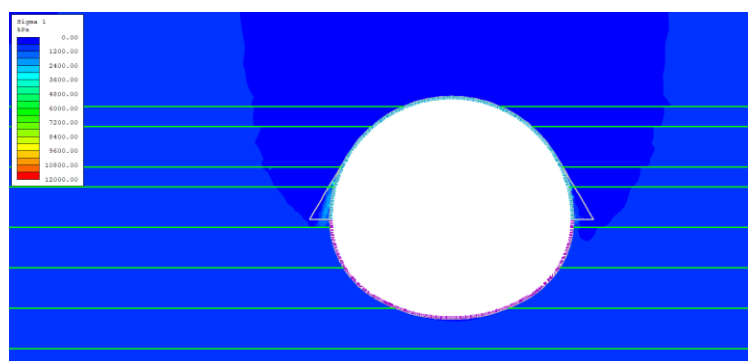
Por conta do revestimento do túnel ser um corpo tridimensional, sendo uma das suas dimensões muito maior do que as outras duas e a curvatura da sua superfície média inicial não ser nula podemos caracterizar que existira resistência na casca (as forças de membrana são independentes da flexão e são totalmente definidas pelas condições de equilíbrio estático; portanto, os esforços internos do revestimento são predominantemente de compressão), conforme demonstrado nas Figuras 27 ao 34.

Fig.27 – Campo de Tensões Stage 2– Concreto Simples (Plasticidade)



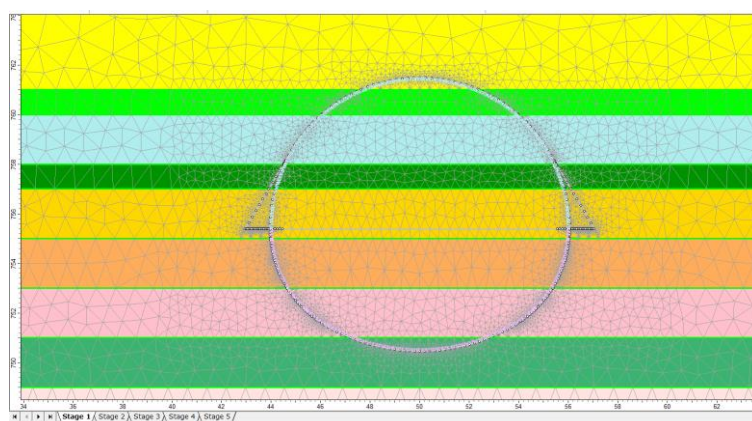
Fonte: Autor (2022)

Fig.28 – Campo de Tensões Stage 5– Concreto Simples (Plasticidade)



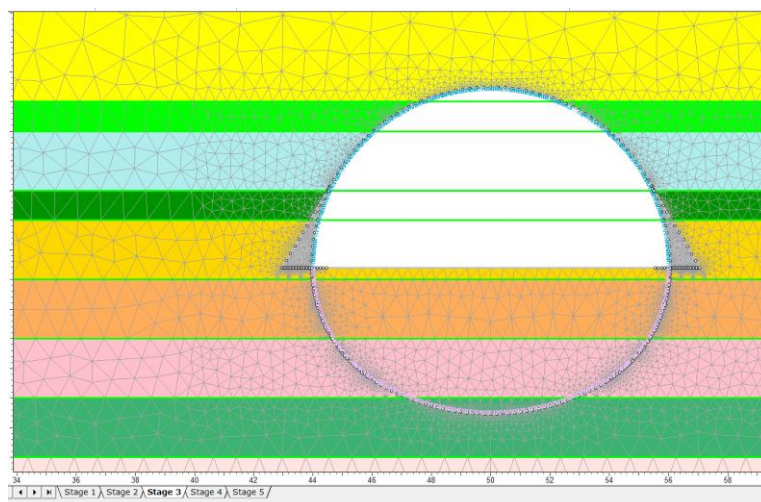
Fonte: Autor

Fig.29 – Modelo Geológico-geotécnico em malha de elementos finitos e condições de contorno adotado Stage 01– Concreto Armado (Elástico)



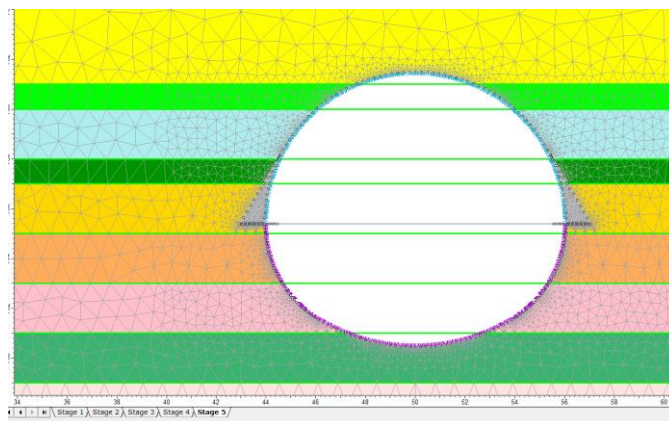
Fonte: Autor

Fig.30 – Modelo Geológico-geotécnico em malha de elementos finitos e condições de contorno adotado Stage 3– Concreto Armado (Elástico)



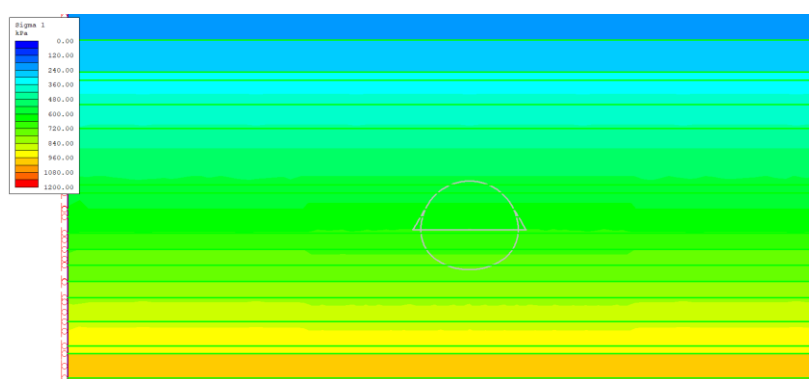
Fonte: Autor

Fig.31 – Modelo Geológico-geotécnico em malha de elementos finitos e condições de contorno adotado Stage 5– Concreto Armado (Elástico)



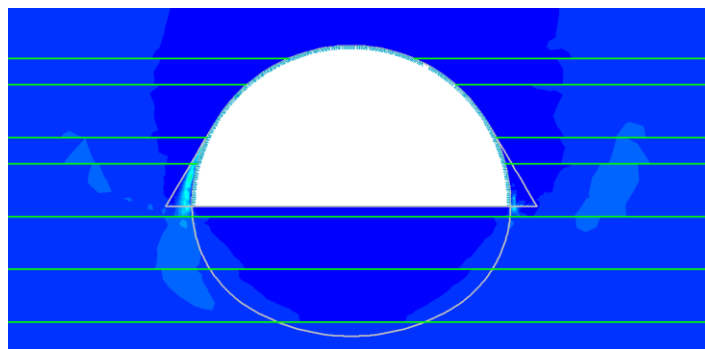
Fonte: Autor

Fig. –32 Campo de Tensões Stage 1– Concreto Armado (Elástico)



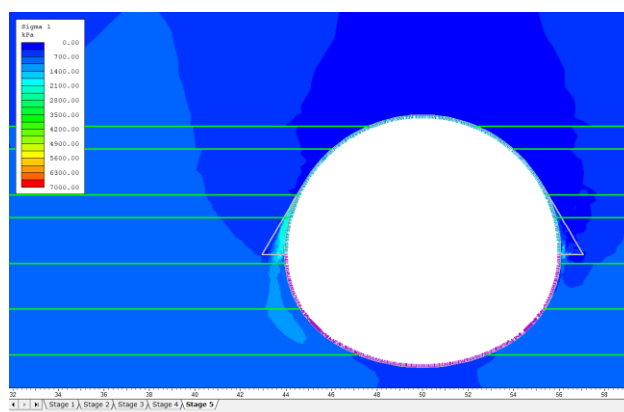
Fonte: Autor

Fig.33 – Campo de Tensões Stage 3– Concreto Armado (Elástico)



Fonte: Autor

Fig.34 – Campo de Tensões Stage 5– Concreto Armado (Elástico)



Fonte: Autor

Como verificado com os cálculos, com o auxílio do programa Phase2, o túnel foi aprovado quando utilizado o concreto no seu estágio plástico, não houve a ruptura em nenhuma das suas faces, como a base teórica comentada durante o trabalho, normalmente em estruturas convencionais de concreto, é considerado o concreto no regime elástico, pois quando ele se deforma, ele consegue voltar a sua origem, tendo o máximo de flecha controlado. Quando permitimos que o concreto plastifique até um certo ponto, muda seu comportamento quando solicitado pelos esforços axiais e momentos fletores, portanto para esse modelo de estrutura, até a geometria do túnel favorece a distribuição de esforços pela sua cambota e revestimento, então podemos afirmar que o túnel é exequível quando o concreto está em seu estágio plástico, pois aumenta sua rigidez e distribui melhor os esforços.

Quando analisado o concreto em seu estágio elástico, se conclui que para esse tipo de túnel, ele não teve seus resultados satisfatórios, como comentado acima, utilizar o concreto em seu estágio elástico ou plástico, muda o comportamento do material quando solicitado por esforços em sua estrutura, então quando não permitimos que o concreto não passe do estágio de elasticidade e levando em conta que os carregamentos são permanentes na estrutura, o concreto tem sua ruptura no pico de momento e força normal, pois a estrutura elástica não consegue distribuir os esforços ao ponto de resistir os esforços. Porém quando considerado aço em sua estrutura, o concreto no regime elástico, consegue resistir os esforços solicitantes com grande folga

Dito isso, se conclui que para o túnel estudado, considerando suas dimensões, tipos de solo, espessura do revestimento/cambota, profundidade do túnel propostos no trabalho, é possível a execução utilizando o concreto em seu estágio de plasticidade. No caso de optar pelo concreto em seu estágio elástico, é necessário empregar aço em sua estrutura, para aliviar as tensões na estrutura do túnel.

6.Considerações Finais/Conclusões

Com base em tudo exposto no trabalho, foi possível concluir que é possível realizar a execução de um túnel NATM que não contém aço em sua estrutura, apesar da ideia de realizar uma estrutura sem aço, seja um pouco estranho para alguns, essa prática é possível e viável, imaginando o custo do aço e o quanto pode encarecer uma obra. No caso de túneis que não for necessário a utilização de aço, é possível utilizando a plastificação do concreto ao favor da estrutura, com isso o comportamento da estrutura muda quando solicitado por esforços em suas faces, lembrando que no caso de um túnel, ele vai estar confinado, portanto é de extrema importância saber com precisão todas as camadas de solos que vão estar na região que serão feitos o túnel e a sua geometria empregada.

Em suma o túnel é composto pela cambota e pelo revestimento, formando uma geometria que contribui muito para a distribuição de esforços por todo o túnel. Como mostrado em nossos resultados, é possível executar túneis utilizando a plasticidade do concreto ao nosso favor, e quando comparado com o concreto no estágio de elasticidade, considerando os mesmos dados e características, é possível verificar que para esse tipo de construção, a plasticidade trabalha melhor que a elasticidade para essa geometria de estrutura, sendo possível empregar o túnel com concreto no estágio elástico apenas quando armado, portanto é importante 'acabar' com a ideia que toda estrutura de concreto, é necessário empregar aço, lembrando que aço é um material que encarece muito as obras, pensando ainda em túneis, essas obras normalmente tem altos custos para o estado e empresas que estão construindo.

Por fim, o trabalho em questão teve como objetivo de provocar reflexão nos engenheiros atuais e futuros, em algum momento os minerais que são utilizados para se fabricar o aço, vai se tornar escasso, tornando obras muito mais caras, portanto é importante estudar a real necessidade dela em estruturas e até mesmo o estudo mais profundo para se realizar concretos mais resistentes e que emitem menos gás carbônico na atmosfera e em um futuro próximo poderemos utilizar toda a capacidade do material mais empregado no mundo, o cimento.

6. Referências Bibliográficas

Bernhard Maidl, Markus Thewes, Ulrich Maidl, David S. Sturge (Translator)-**Handbook of Tunnel Engineering, Volume I_ Structures and Methods**. 1-Ernst & Sohn (2013)

Austrian Society For Geomechanics Division “Tunnelling -NATM The Austrian Practice Of Conventional Tunnelling, October 2010, PG13.

AKAGI, Hirokazu. Amazing Underground Construction Technology in Japan – **Second Fujita Lecture. 9th International Symposium on Geotechnical aspects of Underground Excavations in Soft Ground**. São Paulo, 2017. Disponível em <<http://www.acqua-con.com.br/4cbt/ppt/dia4/09h00-hirokazu-akagi-04-04-plenaria.pdf> e <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781351583305> >. Acesso em maio de 2022.

ALMOG, E.; MANGIONE, M; CASHIA, G. **Ground relaxation in segmental lining design using the Convergence-Confinement Method**. Underground Design and Construction Conference, 2015. Disponível em: < <http://mobile.hkieged.org/download/groundrelaxation.pdf> >. Acesso em maio de 2022.

ARAÚJO, Renato; YANES, Diego Gazolli; BASTOS, Isabel Gomes; KOCHEN, Roberto. **Túnel em Rocha executado com Double-Shielded TBM no Brasil**. COBRAMSEG (Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica). Acesso em maio de 2022.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. 1974. **Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support**. Rock Mechanics. 6: 4:189-236. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support/ >. Acesso em maio de 2022.

BARTON, Nick; BIENIAWSKI, Z. T. RMR and Q – Setting records. **Tunnels and Tunneling International**. Londres, fevereiro de 2008. Disponível em: < https://home.agh.edu.pl/~cala/bieniaswski/rmr_q.pdf >, Acesso em maio de 2022.

CHISHIRO, Keizo. **Estudo sobre o comportamento mecânico durante a escavação de um túnel utilizando a técnica de revestimento de concreto produzido no local** (cast in place) (traduzido). 2011. Tese de doutorado em Engenharia Civil na cidade de Kyoto, Japão. 229 p. Disponível em: < http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/142192/2/D_Chishiro_Keizo.pdf >.

Acesso em julho de 2022.

N.Barton ; R. Lien; and J.Lunde - **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support**. Acesso em junho de 2022.

Almeida, Marcio de Souza Soares. **Análise Elasto-Plástico de Túneis pelo Método dos Elementos Finitos**. 1977. Tese de Mestrado em Ciências na cidade de Rio de Janeiro, Brasil

Disponível em: < <https://pantheon.ufri.br/bitstream/11422/2854/1/146176.pdf>>. Acesso em julho de 2022.

FRANÇA, Pedro Teodoro. **Estudo do comportamento de túneis**: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-08122006-151549/>. Acesso em: 06 nov. 2022.

SILVA, Guilherme Tavares. **Revestimento de concreto extrudado para túneis**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/205625>. Acesso em julho. 2022.

GOMES, Romero César. **Classificações geomecânicas de maciços rochosos**. 2002. Dissertação (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/7340>. Acesso em julho. 2022.

MURAKAMI, Claudio Atsushi. **Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Acesso em: julho. 2022.

ESTANQUEIRO, Lucas de Araujo. SALVI, Levi. **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, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/escavacao-de-tuneis>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/escavacao-de-tuneis. Acesso em: agosto.2022.

NEGRO, A., SOZIO, L. E., FERREIRA, A. A., **Solos da Cidade de São Paulo**, ABMS e ABEF, São Paulo, 1992.

ROCHA, M. **Mecânica das Rochas**, LNEC, Lisboa, Vol. 1, 1971, 276p

MACHADO, G. M. – **Análise por Elementos Finitos de Maciços Escavados por Túneis**, Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011, 102 p.

CARREIRA, Willian. **Análise dos deslocamentos no maciço, em túnel executado pelo método NATM**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.3.2014.tde-26082015-165940. Acesso em: setembro.2022.

MAGHOUS, Denise Bernaud. **Modelagem tridimensional em elementos finitos de túneis revestidos em concreto armado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. doi: <http://hdl.handle.net/10183/197244>. Acesso em: setembro.2022.