

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS E GEOTÉCNICA

BRUNO GONZALO SOCUALAYA MOLINA

GUILHERME PÁDUA DE GOUVÊA

**MODELAGEM BIM E INTEROPERABILIDADE APLICADA AO
PROJETO DE TÚNEL METROVIÁRIO**

Texto apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica como parte dos requisitos para conclusão da disciplina Trabalho de Formatura em Projeto Estrutural e Geotécnico II.

Orientador: Prof. Dr. Claudius de Sousa Barbosa

São Paulo

2019

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Claudius de Sousa Barbosa, por todo o suporte e orientação do trabalho.

Agradecemos à empresa Maffei Engenharia, pelo fornecimento de material didático de apoio em todas as etapas do trabalho, em especial aos engenheiros Rodolfo Simoni e Bruno Scodeler.

Agradecemos ao engenheiro Alex Nowak La Flor pelo fornecimento de material sobre aplicação de BIM em projeto de túneis.

Agradecemos ao engenheiro Gabriel Castaño, da empresa Castaño Engenharia, pela entrevista concedida e pela ajuda na resolução de problemas de modelagem de túnel.

Agradecemos ao engenheiro José Carlos Soares, da empresa Consultores BIM, pelo suporte e disponibilização de códigos de programação para modelagem de túnel.

Agradecemos à empresa BIM Works, em especial ao engenheiro Gustavo Peres, pelo auxílio na modelagem de armaduras em estruturas complexas.

Agradecemos às empresas fabricantes das ferramentas digitais, em especial à Autodesk, que contribuem para o progresso do processo construtivo e ao desenvolvimento da metodologia BIM e estão constantemente renovando suas ferramentas.

E finalmente agradecemos às nossas famílias por todo o suporte e pela compreensão de eventuais ausências durante a preparação do trabalho.

RESUMO

Com uma busca cada vez maior de otimização de etapas de projetos na engenharia, a metodologia BIM de trabalho se apresenta como uma ferramenta muito útil. Sua implementação já se encontra bastante difundida entre profissionais e é amplamente abordada em obras convencionais de Engenharia Civil. No entanto, quando se trata de obras subterrâneas, projetos de pouca padronização e maior complexidade, existe uma considerável diferença de desenvolvimento e maturação da metodologia. Nesse contexto, este trabalho visa a avaliação das potencialidades e limitações das ferramentas BIM no projeto de túneis metroviários, assim como sua interoperabilidade no processo. Os dois grandes pilares tomados como base para o desenvolvimento do trabalho são as características de projetos de túnel e a modelagem de infraestrutura em BIM de uma forma geral. Estes temas são amplamente revisados e sintetizados na revisão bibliográfica. Do primeiro busca-se entender as características que fazem de uma obra de túnel diferente a outro tipo de obras, tanto no projeto geométrico e faseamento construtivo quanto no quesito estrutural. Através do segundo, são procuradas informações atualizadas do conhecimento existente na utilização de BIM em projetos de infraestrutura e em obras de túneis. Como meio para a aplicação de tais conceitos e investigação das potencialidades, o trabalho aborda dois estudos de caso com estruturas reais. Nesses casos práticos avaliam-se vantagens e desvantagens das ferramentas BIM envolvidas em todo o processo e define-se uma rotina de modelagem. Por fim, são feitas conclusões com relação ao estado atual das ferramentas de modelagem BIM para tais obras, avaliando-se criticamente a utilização da metodologia.

SUMÁRIO

1.	Introdução	6
1.1)	Justificativa	8
1.2)	Objetivos	9
2.	Revisão bibliográfica	10
2.1)	Projeto de túnel	10
2.1.1)	Método de escavação: NATM	10
2.1.2)	Projeto geométrico	11
2.1.3)	Concreto projetado	12
2.1.4)	Projeto estrutural	13
2.2)	Modelos de infraestrutura em BIM	15
2.2.1)	Utilização em projetos de infraestrutura	16
2.2.2)	Utilização em projetos de túneis	18
3.	Estudo preliminar: túnel Boiúna	20
3.1)	Descrição da obra	20
3.2)	Modelagem geométrica	22
3.2.1)	Modelagem do maciço	22
3.2.2)	Modelagem geométrica do túnel	23
3.2.2)	Modelagem dos elementos internos	25
3.3)	Exportação para análise estrutural	26
3.4)	Avaliação das capacidades e limitações	28
4.	Estudo de caso: poço Padre Francisco Xavier Roser	30
4.1)	Descrição da obra	30
4.2)	Modelagem do maciço	34
4.3)	Modelagem geométrica	36
4.2.1)	Poço de ventilação	37
4.2.2)	Túnel de ligação	39

4.2.3)	Túnel.....	41
4.4)	Compatibilização de modelos	52
4.4.1)	Integração Revit e Civil 3D	52
4.4.2)	Ferramenta Navisworks	53
4.5)	Potencialidades do modelo integrado BIM.....	55
4.5.1)	Modelagem 4D	56
4.5.2)	Extração de quantitativos.....	61
4.6)	Exportação para análise estrutural	63
4.6.1)	Análise da estrutura do poço de ventilação	63
4.6.2)	Análise da estrutura do túnel em 2D	65
4.6.3)	Análise da estrutura do túnel em 3D	67
4.7)	Detalhamento de armaduras.....	70
5.	Conclusões.....	73
6.	Referências bibliográficas	76

1. INTRODUÇÃO

O *Building Information Modeling* (BIM), ou Modelagem de Informação da Construção, é um método colaborativo baseado em ferramentas digitais que permite integrar diversas partes do processo construtivo. Seu grande diferencial em relação ao método tradicional é a maior eficiência no compartilhamento da informação. De acordo com a Building Smart (2019), organização mundial de tecnologia para o setor da construção, o conceito de BIM pode ser definido como:

“Representação digital das características físicas e funcionais de uma edificação, que permite integrar de forma sistêmica e transversal as várias fases do ciclo de vida de uma obra com o gerenciamento de todas as informações disponíveis em projeto, formando uma base confiável para decisões durante o seu ciclo de vida, desde a primeira concepção até à demolição.”

Dessa forma, o BIM permite que correções necessárias ao longo das etapas de projeto sejam feitas de forma muito mais simples e quase automática, já que há uma facilidade e rapidez muito grande no envio de informações. Grande parte do esforço requerido para compatibilização dos diferentes projetos que compõem a construção é transferida para a fase de concepção e modelagem, enquanto no método tradicional esse esforço ocorre posteriormente, na fase de documentação. Assim, o método BIM pode gerar uma considerável economia dos custos, já que eventuais alterações nas fases de concepção impactam muito menos o custo global do projeto que alterações ao longo do projeto executivo. Isso é ilustrado na curva desenvolvida pelo arquiteto americano Patrick MacLeamy, ilustrada na Figura 1.

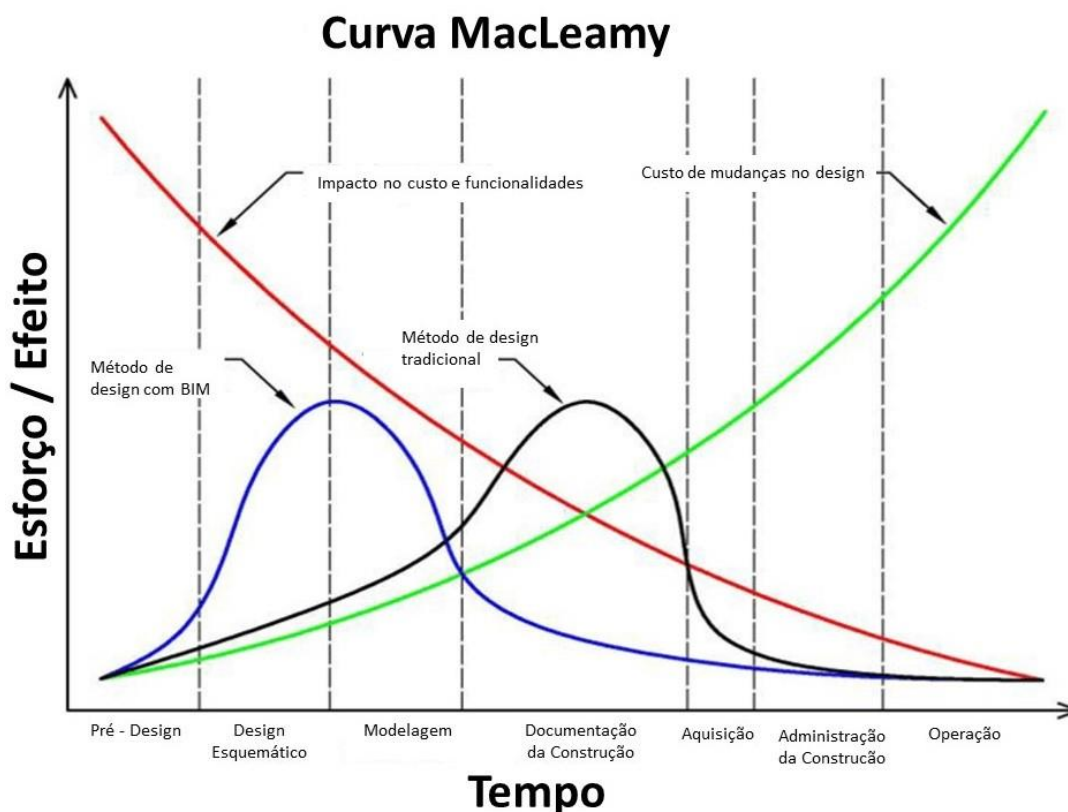


Figura 1 - Curva MacLeamy (Tagliari, 2018)

No contexto da construção de edificações, o BIM já está bastante difundido, com ferramentas especializadas para esse tipo de construção presentes no mercado há algum tempo e cada vez mais empresas adotando o método. Os projetos de obras de infraestrutura, por sua vez, ainda apresentam uma utilização reduzida da metodologia BIM. Por envolver diversos fatores específicos para cada obra, como características do terreno, e pouca padronização, o método ainda possui dificuldades de se difundir nesse ramo do mercado da construção. Contudo, há muito espaço para o seu desenvolvimento. Os projetos de infraestrutura necessitam de uma grande colaboração entre as diversas partes envolvidas para atingir a configuração final e é justamente nessa integração que o BIM tem muito a oferecer.

Dessa forma, visando uma incorporação completa do BIM em projetos de infraestrutura, é necessária uma cooperação acadêmica e profissional, de forma que o trabalho acadêmico seja responsável pela exposição do cenário e capacidades atuais do método e suas ferramentas digitais, promovendo, assim, o suporte necessário para uma maior utilização nos projetos reais.

1.1) Justificativa

Nas últimas décadas, em conjunto com o elevado crescimento econômico e populacional, houve um aumento considerável na necessidade de obras de infraestrutura no país, principalmente nas redes de transporte. É importante lembrar que no Brasil ainda há uma defasagem muito grande entre as redes existentes e a capacidade necessária para atender a demanda do país, que possui dimensões continentais. Entretanto, esse cenário vem lentamente sendo alterado, com esforços de diversas entidades públicas e privadas para estabelecer no país uma infraestrutura de transportes condizente com suas necessidades. No ramo rodoviário e ferroviário, houve novas vias construídas e ampliação de pistas de muitas outras, como mostra a Figura 2.

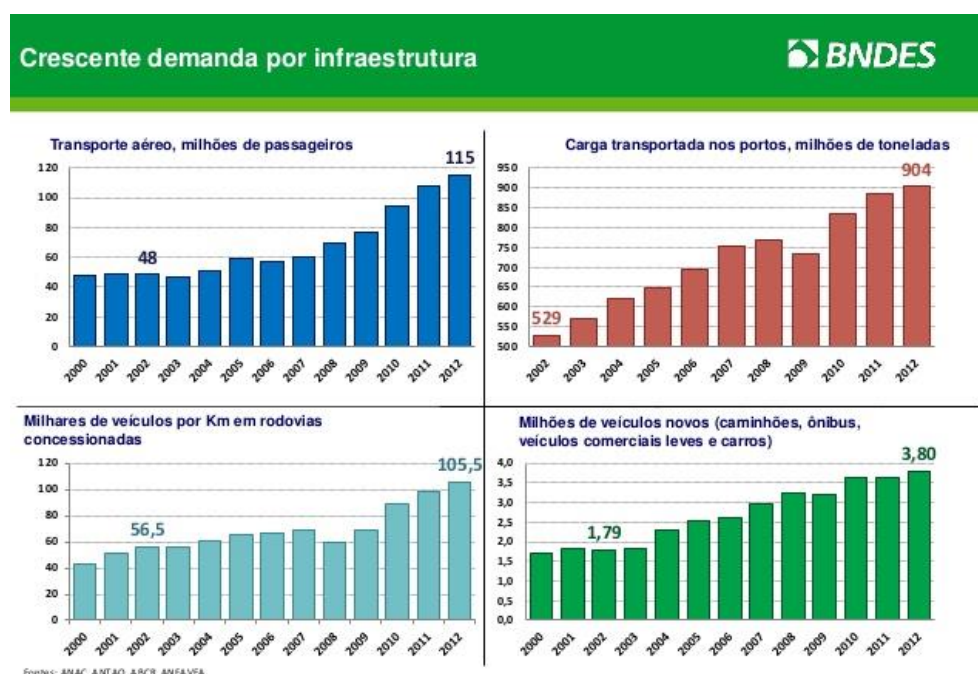


Figura 2 - Demanda crescente por infraestrutura no Brasil (FGV EBAPE / BNDES, 2014)

Esse desenvolvimento nos sistemas de transportes criou uma demanda por novas obras subterrâneas considerável, incluindo muitos túneis para interligação das vias. Além de possuir um território muito grande com relevos acidentados, o que justifica a necessidade de túneis nas regiões rurais e montanhosas, o Brasil também apresenta uma grande demanda no meio urbano. Segundo Murakami (2001), fatores como a intensa ocupação superficial, os altos valores imobiliários de desapropriação, as interferências com obstruções superficiais e aéreas e os conflitos das obras executadas a céu aberto com o tráfego e a comunidade justificam a opção por esse tipo de obra subterrânea para as vias.

Diante do cenário exposto, em que existe uma demanda crescente de obras de infraestrutura no país com um uso ainda reduzido da metodologia BIM, busca-se, por meio deste trabalho, explorar as possibilidades e dificuldades da aplicação do método nos projetos de túneis, através da modelagem de projetos existentes.

1.2) Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é avaliar os potenciais e limitações atuais da modelagem através de metodologia BIM para projetos de infraestrutura subterrâneos, utilizando alguns pacotes computacionais disponíveis no mercado. Essa verificação será realizada a partir de um estudo preliminar e um estudo de caso de projetos existentes já construídos, utilizados como base para avaliação da capacidade das ferramentas. Como objetivos específicos, têm-se:

- A avaliação da capacidade da ferramenta digital Autodesk Revit na modelagem tridimensional de uma estrutura subterrânea, o maciço que a envolve e os elementos internos. Além disso, analisar sua interoperabilidade com outras ferramentas digitais, na importação/exportação de elementos;
- A avaliação da capacidade da ferramenta digital Autodesk Civil 3D para modelagem de um túnel e sua interoperabilidade com outras ferramentas digitais, tanto no processo de importação de dados do terreno quanto na exportação do modelo de estrutura;
- A avaliação das capacidades das ferramentas digitais Autodesk Infraworks, em relação à extração de dados do terreno, e Autodesk Navisworks, em relação à visualização espacial de fases construtivas do modelo e extração de quantitativos;
- A avaliação da capacidade de análise estrutural e a interoperabilidade da ferramenta Robot Structural, também da Autodesk, para obras de infraestrutura subterrâneas, assim como a avaliação das capacidades dos programas Revit e Allplan para detalhamento de armadura em obras de infraestrutura;
- O desenvolvimento de rotinas que possam contribuir para a automatização da construção do modelo virtual;
- A definição de um fluxo de trabalho seguindo a metodologia BIM e utilizando as diversas ferramentas computacionais previamente avaliadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse item serão abordados alguns aspectos de maior relevância sobre os principais temas desse trabalho: o projeto de túnel e a modelagem em BIM.

2.1) Projeto de túnel

As obras subterrâneas têm características diferentes das obras de infraestrutura convencionais devido ao meio no qual se encontram. Dessa maneira, nesta sessão é feita uma revisão bibliográfica dos aspectos considerados mais importantes para a realização de um projeto de túnel.

2.1.1) Método de escavação: NATM

Na literatura foram encontrados os seguintes métodos de escavação de túneis: tradicional, de couraça (ou *shield*), *pipe jacking* e NATM (*New Austrian Tunnelling Method*). Por ser o mais utilizado no mercado brasileiro de projetos de túneis, o foco será neste último método. A característica mais importante do método, encontrada em diversas referências bibliográficas, é o alívio de tensões no revestimento devido a tensões e deformações controladas do maciço. Os elementos principais para a estabilização do maciço são o concreto projetado, cambotas (treliças metálicas) e enfilagens (tubos de aço com calda de cimento). Esses elementos compõem o revestimento primário, que é instalado logo após a escavação. Abaixo dessa camada há outra capa de concreto que busca resistir aos esforços existentes ao longo da vida útil do túnel, conhecida como revestimento secundário. Esta pode ser feita através do concreto moldado in loco ou projetado.

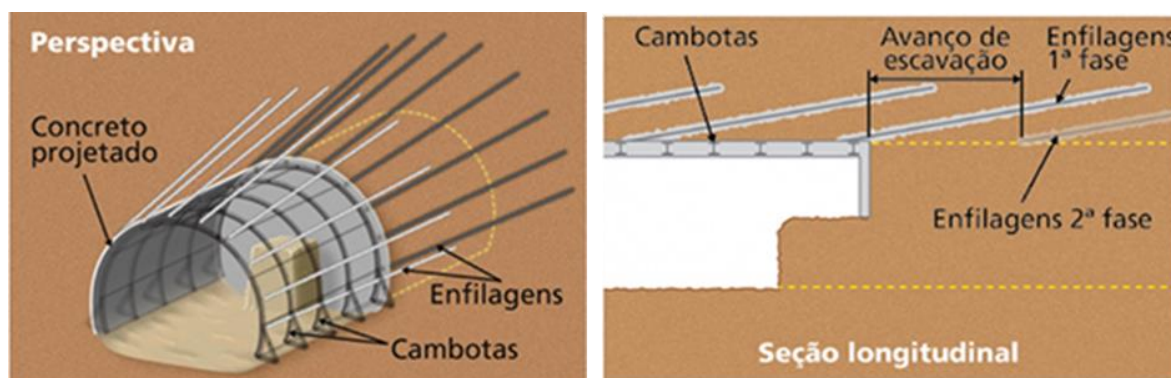


Figura 3 - Componentes construtivos no método NATM (Solotrat, 2019)

O método pode apresentar algumas variações dependendo das condições locais de cada túnel, porém a linha de trabalho é a seguinte:

1. Escavação e contenção do solo até a cota do plano de trabalho (emboque do túnel).
2. Execução da viga portal com enfilagens injetadas.
3. Escavação de um avanço (aproximadamente 80 cm). O método NATM separa a seção em diferentes partes na escavação para manter a estabilidade do solo.
4. Colocação da cambota (armadura de suporte) e concreto projetado.
5. Colocação de enfilagens para o próximo avanço e pregagens (barras de aço com caldas de injeção) na frente.
6. Colocação de drenos, segundo especificação de projeto.
7. Após alguns avanços na cota de trabalho é feita a escavação até a cota de fundo.
8. Concretagem do arco invertido.
9. Concretagem do revestimento secundário.

Na prática usual de túneis, os avanços são de 80 cm e de 0,2 vezes o diâmetro do túnel de distância entre o arco invertido e a frente de escavação. Caso seja um maciço rochoso, além das enfilagens, é necessária a instalação de tirantes nas zonas de fraturas das rochas verificadas no momento da escavação. O revestimento secundário pode ser feito de concreto moldado in loco ou também com concreto projetado, que usualmente é reforçado com telas soldadas ou fibras de carbono.

2.1.2) Projeto geométrico

Ao realizar o projeto geométrico do túnel deve se tomar em consideração dois aspectos: o primeiro é respeitar o gabarito dinâmico, no caso de túneis ferroviários, e o segundo é otimizar o funcionamento estrutural do túnel, isto é, que ele trabalhe como uma estrutura cuja força predominante seja a compressão.

Para o túnel trabalhar de tal forma, os arcos de circunferências devem evitar raios pequenos comumente presentes em estruturas com arcos invertidos (Maffei, 1995). Isso se deve à relação inversa da tensão atuante no revestimento com o raio do arco expressa na fórmula $N = p \times R$, onde N é a força normal, R é o raio e p a tensão atuante sobre o revestimento. O limite mínimo de raio permitido está em função da tensão correspondente para manter a normal e o limite de tensão no solo que leva ao estado passivo (Maffei, 1995).

A Figura 4 mostra graficamente que para R_2 menor que R_1 tem-se P_2 maior que P_1 , atendendo a equação $N = R_1 \times P_1 = R_2 \times P_2$

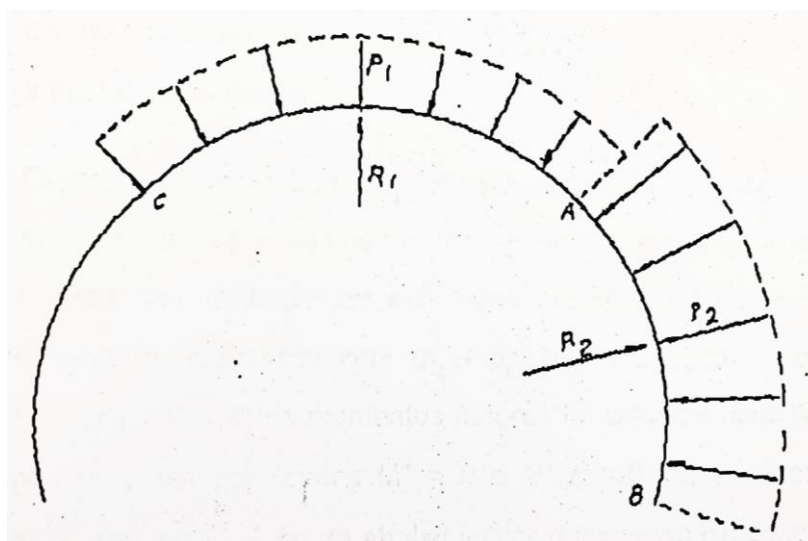


Figura 4 - Arcos que compõem a seção do túnel com raios diferentes e tensões atuantes (Maffei, 1995)

2.1.3) Concreto projetado

Para compor a estrutura do túnel, é comum o uso do concreto projetado. Segundo a NBR 13044 (2012), trata-se de um concreto com dimensão máxima do agregado superior a 4,8 mm, lançado a uma velocidade alta através de ar comprimido, adensado por impacto e que é transportado por mangote. Segundo exposto no trabalho de Silva (1997) citado por Martins (2008), é recomendada uma dimensão máxima do agregado de 12 mm. Ele pode ser projetado de duas formas: por via seca ou por via úmida. A via seca é um método no qual se adiciona água no bico projetor em que é lançado o concreto, enquanto no método de via úmida a água é adicionada previamente na mistura.

Neste tipo de concreto é fundamental controlar a dosagem dos componentes, havendo a norma NBR 13044 (2012) para estabelecer os parâmetros desse controle. Para melhorar seu comportamento e devido às circunstâncias nas quais é aplicado, é comum se adicionar aditivos acelerantes e superplastificantes. Além disso, é necessário haver uma atenção especial quanto a variação da resistência e a rigidez ao longo do tempo, já que o concreto deve ser capaz de equilibrar as forças do maciço durante o tempo de avanço da escavação (cerca de 8 horas para cada avanço).

Com relação ao seu desempenho durante a vida útil do projeto, a norma NBR 12655 (2015) estabelece os mesmos requisitos que um concreto convencional, uma resistência mínima de 25 MPa. Quanto à armação, é usualmente utilizada uma tela soldada ou fibras de aço.

Ao se utilizar concreto projetado em túneis, é preciso levar em consideração a variação das suas propriedades no tempo. No trabalho de Martins (2008), são exploradas duas informações importantes do projeto de túnel: o módulo de elasticidade, que em 7 dias já atinge uma alta porcentagem do valor final; e a inviabilidade de avanços no túnel em pouco tempo, já que o concreto não atingiria uma resistência adequada a tempo para garantir a segurança.

2.1.4) Projeto estrutural

Como principais características a serem consideradas em um projeto de túnel é possível listar as seguintes (Lunardi, 2008):

- Os efeitos críticos para análise estrutural da seção de túnel não estão na condição final, mas sim no processo de escavação, ressaltando a importância das fases construtivas.
- Propriedades físicas e o comportamento do maciço têm incertezas. Quanto maior a quantidade de dados do maciço, melhor será a representação de sua realidade.
- Não há carregamentos pré-estabelecidos para se inserir na seção, já que cada túnel gera um campo de tensões de acordo com o distúrbio e redistribuição de esforços no maciço proveniente da escavação, sendo necessária uma análise geotécnica.

Para iniciar um projeto de dimensionamento de túnel, deve-se primeiramente conhecer o que acontece no processo de escavação e como surgem as tensões solicitantes na seção. O maciço, que pode ser rochoso ou mais próximo a um solo, está em equilíbrio através de um campo de tensões naturais internas. Quando a escavação é iniciada, haverá um distúrbio neste equilíbrio, gerando uma redistribuição dos esforços e causando efeito de arco no campo de tensões (Lunardi, 2008).

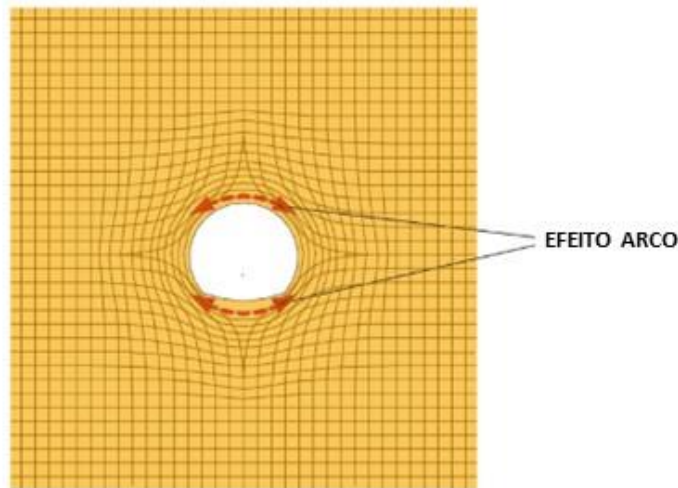


Figura 5 - Efeito de arco no campo de tensões ao redor de uma cavidade (Lunardi, 2008)

Lunardi (2008) ressalta no seu livro a existência de três possíveis reações distintas na região perturbada do maciço, resultantes do distúrbio causado pela escavação:

- Ocorrem deformações elásticas, que são desprezíveis. O efeito de arco é gerado naturalmente na região próxima à escavação.
- Há plastificação e aumento no volume de solo afetado. O efeito de arco é formado longe da seção e é necessária uma estabilização do maciço.
- O maciço nessa região não é capaz de suportar a redistribuição de esforços e há ruptura. Nesse caso, é necessário a colocação de um suporte para produzir o efeito de arco artificialmente.

Também deve-se considerar o efeito da escavação no perfil longitudinal do túnel. Para fazer uma avaliação desse comportamento, diversos autores utilizam três seções ao longo do túnel. A primeira é a seção não perturbada, na qual ainda não houve escavação e que está distante da influência da face do túnel, nesta região o maciço se encontra nas condições iniciais. A segunda é a seção próxima à face de escavação, onde há mudança do estado triaxial para o estado biaxial de deformação. A terceira é a zona de estabilização, na qual desaparece o efeito longitudinal decorrente da frente de escavação. Por haver uma zona de influência da frente onde não se tem um estado plano de deformação, o modelo de túnel para análise estrutural deve levar em conta efeitos em 3D.

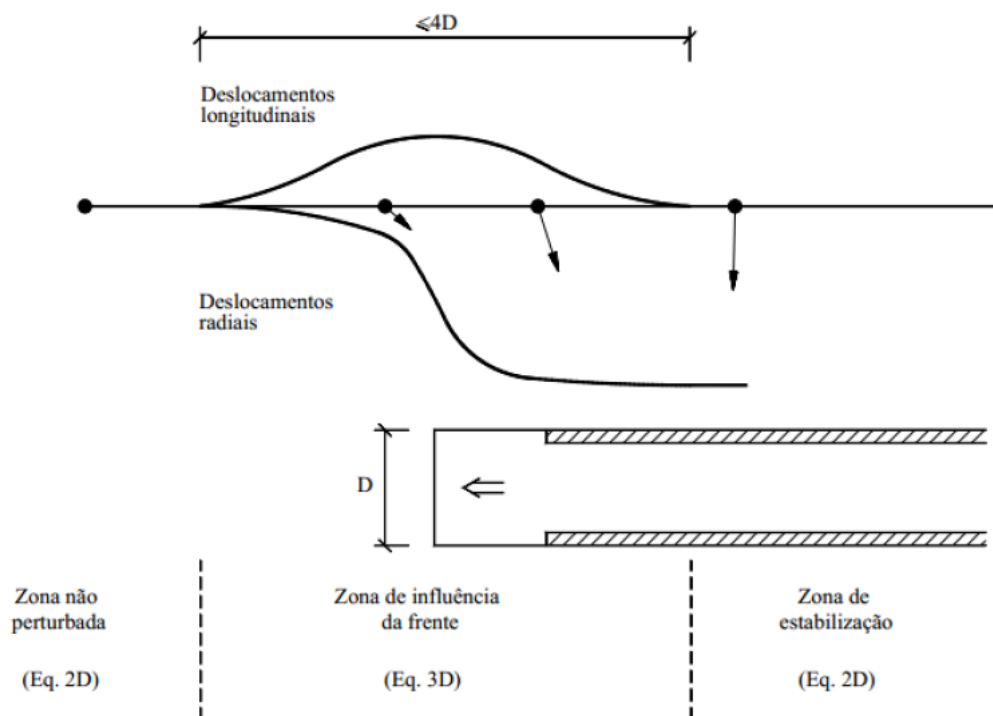


Figura 6 - Divisão de zonas com comportamentos diferentes no perfil longitudinal da escavação (Almeida e Souza, 2005)

Para cálculo de esforços na seção de túnel foram encontradas na literatura os seguintes métodos de cálculo:

- Métodos Empíricos
- Métodos Semi Empíricos
- Método das Reações Hiperestáticas
- Método dos Elementos Finitos (2D e 3D)

2.2) Modelos de infraestrutura em BIM

Muitos trabalhos já tiveram como foco a utilização da metodologia BIM para obras de infraestrutura. Para um melhor entendimento e posterior pesquisa e desenvolvimento de estudos de caso, foram revisados alguns textos de diversos autores, com focos tanto na utilização do BIM para projetos de infraestrutura quanto para projetos específicos de túneis.

2.2.1) Utilização em projetos de infraestrutura

Apesar de não terem sido o foco no processo de desenvolvimento do método BIM, as obras de infraestrutura estão cada vez mais inseridas no seu universo e devem tornar-se dependentes dele num futuro não muito distante. De acordo com Chong et al. (2016), assim como em obras de edificações, é possível proporcionar resultados muito mais eficientes e econômicos nos projetos de infraestrutura utilizando-se as ferramentas digitais presentes no método. Essas ferramentas participam diretamente da criação, gestão e manutenção de todas as informações necessárias para uma obra desse tipo.

Foram realizadas diversas publicações nos últimos anos sobre as dificuldades e potenciais da implementação do BIM nos projetos de infraestrutura. A seguir são apresentadas algumas delas, que apresentam estudos comparativos para uma melhor visualização de sua implantação em projetos reais.

Osello et al. (2017) afirmam que as ferramentas BIM ainda não se encontram completamente desenvolvidas a ponto de gerar resultados ótimos em termos de acessibilidade e confiabilidade. Em seu trabalho, são mostrados alguns exemplos dos grandes esforços para a criação de elementos paramétricos, já que os softwares BIM atuais não possuem bibliotecas com elementos específicos para modelagens de infraestruturas. A conclusão apresentada é que as vantagens da utilização do método podem ser aproveitadas de uma forma melhor na fase de design, ou seja, na concepção inicial da estrutura de projeto.

Com a intenção de analisar e comparar a adoção e uso do BIM em projetos de infraestrutura, Chong et al. (2016) realizam um estudo de caso com dois grandes projetos de rodovia, na Austrália e China. O estudo foi subdividido nas etapas de pré-construção, construção e pós-construção. Na primeira etapa do projeto australiano, foi constatado que, apesar de algumas complicações por ser o primeiro uso, o método foi de grande ajuda no preparo e planejamento do local de construção graças a simulações de impacto de tráfego que determinaram o volume de veículos e o nível de saturação da rodovia. Durante a construção, o uso do BIM assegurou mais precisão na locação dos elementos da via e pode garantir um melhor cuidado com o desvio de obstruções já existentes, já que ambos o engenheiro projetista e o responsável pelos trabalhos de escavação tinham acesso aos projetos virtuais, ficando mais claro quais áreas não escavar.



Figura 7 - Comparação do modelo virtual com o realizado em campo (Chong et al., 2016)

Como a manutenção da rodovia era de responsabilidade do governo, não foi possível avaliar os impactos do BIM na fase pós-constructiva neste projeto. Entretanto, foi demonstrado um alto interesse na adoção do método na operação da rodovia, para sua manutenção e rastreamento geoespacial, que são trabalhos ainda não completamente integrados ao BIM.

A partir do estudo comparativo que Fanning et al. (2015) realizaram entre duas pontes, uma projetada com métodos tradicionais e outra com o uso do BIM, foi possível identificar as principais diferenças no processo construtivo e seus resultados. Apesar de apresentarem certas diferenças com relação às dimensões e complexidade das obras, as pontes Fort Lyon Canal Bridge (sem uso de BIM) e Pecos Street over I-70 Bridge (com uso de BIM) foram feitas pela mesma construtora americana e utilizaram o mesmo método construtivo. Surpreendentemente, foi constatado que a construção que utilizou o método BIM obteve um custo por metro quadrado construído 70% maior para o projeto da superestrutura, já desconsiderando diferenças não relacionadas à implementação do BIM entre os projetos. O autor atribui essa diferença a maior complexidade do projeto, que foi executado numa área urbana densamente povoada, e à curva de aprendizagem necessária para a primeira implementação do BIM pela empresa, sendo possível reduzir significativamente esse custo com a prática ao longo do tempo. De acordo com a contratante, a construção só foi possível de ser feita dentro do cronograma e com as restrições espaciais necessárias devido a utilização das ferramentas digitais. Além disso, a possibilidade de fornecer visualizações precisas e realistas da obra antes da construção foi determinante para o engajamento do público e suporte necessário para o sucesso da obra.

A conclusão apresentada é que o BIM impacta positivamente diversas métricas de retorno desse tipo de obra. No entanto, a magnitude desse impacto está diretamente relacionada ao grau de experiência e familiaridade dos projetistas com as ferramentas digitais e suas interações. Ainda há muitas barreiras para a implementação completa do BIM como o desenvolvimento de

padrões que facilitem a transferência de informação entre as ferramentas e permitam o acesso entre os múltiplos agentes de interesse por um longo período. Esses padrões têm sido coordenados Building Smart, que está visando implementar e difundir o *Industry Foundation Classes* (IFC) como uma opção aberta para o intercâmbio de informações construtivas.

2.2.2) Utilização em projetos de túneis

Os túneis englobam uma parte relevante da demanda dos projetos de infraestrutura e muitos projetos de rodovias e ferrovias dependem da sua construção em trechos ao longo de sua extensão. No entanto, assim como as obras de infraestrutura no geral, eles ainda enfrentam algumas barreiras para ter seu método construtivo integrado por meio da tecnologia BIM. Apresentado por alguns autores como TIM (*Tunnel Information Modeling*), a utilização do BIM em projetos de túneis foi abordada em alguns trabalhos, que visam expor os desafios encontrados e seu panorama atual.

De acordo com Osello et al. (2017), as dificuldades encontram-se principalmente em adaptar uma metodologia para lidar com uma grande quantidade de dados heterogêneos. Seu trabalho, que faz um estudo de caso da utilização do método em um túnel italiano, avalia a qualidade da interoperabilidade do software Autodesk Revit com softwares de elementos finitos. Como produto do estudo, verificou-se com sucesso a exportação do modelo do túnel para a análise de elementos finitos, evitando a replicação do modelo e possíveis erros neste processo. Entretanto, a exportação não permitiu a análise em múltiplas direções, tendo sido perdidas algumas informações de material e características do solo.

Outros três estudos de caso foram realizados por Júnior et al. (2017). Trata-se de publicações de projetos de túnel realizadas no Congresso Mundial de Túneis – WTC em 2014. Após a reunião de diversas rotinas de trabalho e ganhos relatados nesses projetos, concluiu-se que é fundamental a atuação do proprietário (que no caso de obras de infraestrutura é normalmente o poder público) com o principal agente na adoção do BIM nas diversas etapas dos projetos e que a evolução do compartilhamento de informações através do IFC é primordial para uma modelagem apropriada.

Por fim, Tagliari (2018) realizou um estudo preliminar da modelagem da seção transversal de um túnel utilizando a tecnologia BIM por meio do ambiente Dynamo Studio do Autodesk Revit, conforme ilustra a Figura 8.

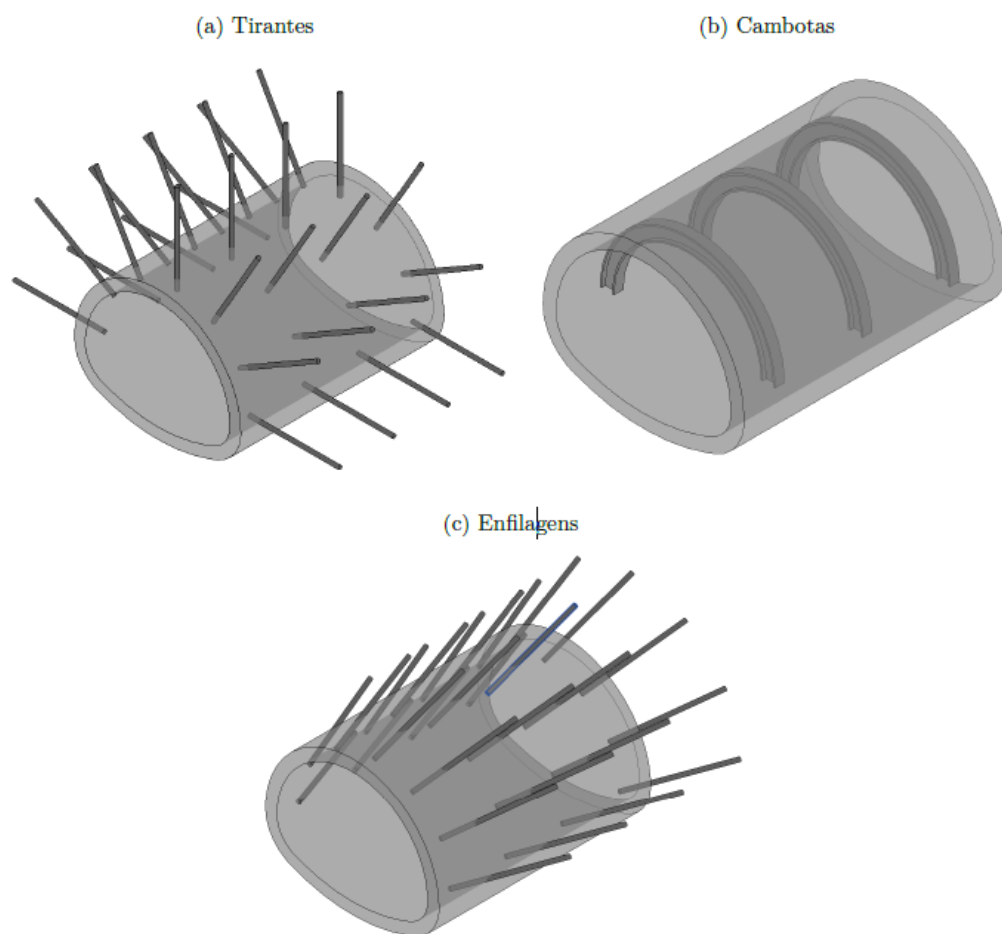


Figura 8 - Vista isométrica do modelo gerado no Dynamo (Tagliari, 2018)

Foi constatado que é possível reproduzir com precisão as dimensões do projeto na ferramenta e obter com facilidade estimativas de quantitativos de materiais usados na obra, como volume de material escavado, volumes de concreto e graute e massa de aço. No entanto, verificou-se que é necessário um alto trabalho computacional para a exportação do modelo gerado para o ambiente Revit, de modo que é mais simples se obter as informações desejadas diretamente no ambiente de modelagem Dynamo. Além disso, esta ferramenta possui um ambiente mais próximo da programação que da modelagem propriamente dita, dificultando o processo de criação do modelo geométrico.

3. ESTUDO PRELIMINAR: TÚNEL BOIÚNA

Como primeira etapa do trabalho, foi explorada a capacidade de modelagem de um projeto real de túnel inteiramente no software Autodesk Revit, buscando-se analisar potenciais e limitações. A seguir, são expostos os resultados obtidos utilizando o ambiente do Revit para a modelagem geométrica do maciço, da estrutura do túnel e seus principais elementos internos. Por fim, foi realizada uma breve interação com o software de análise estrutural Robot, no que diz respeito à importação do modelo e entendimento de suas ferramentas.

3.1) Descrição da obra

O túnel Boiúna compõe um trecho subterrâneo da via Transolímpica na altura da Estrada da Boiúna, no bairro de Taquara no Rio de Janeiro. O túnel escolhido, juntamente com o túnel Engenho Velho, faz parte de um complexo com uma extensão total de 1400 metros, que possuem duas galerias com vias para automóveis e ônibus da linha BRT em ambos os sentidos.

A construção dos túneis foi executada pelo consórcio Construtor Transrio, composto pela Odebrecht, OAS, Andrade Gutierrez e Camargo Corrêa, que foi responsável pela execução de 13 dos 26 quilômetros que compõem a via expressa Transolímpica. A obra foi concluída em julho de 2016 e teve como finalidade melhorar a mobilidade urbana da cidade visando os Jogos Olímpicos de 2016, ligando dois pólos de eventos: o Parque Olímpico da Barra da Tijuca e o Parque Olímpico de Deodoro. A via possui três faixas em cada sentido, sendo duas para automóveis e uma para o corredor de ônibus BRT.

O túnel Boiúna teve o seu projeto estrutural desenvolvido pela Maffei Engenharia, empresa especializada em projetos executivos de túneis e contenções, que forneceu algumas plantas e cortes do projeto. O túnel tem uma extensão total de 190 metros e uma profundidade máxima de cerca de 40 metros, composto principalmente por solo residual.

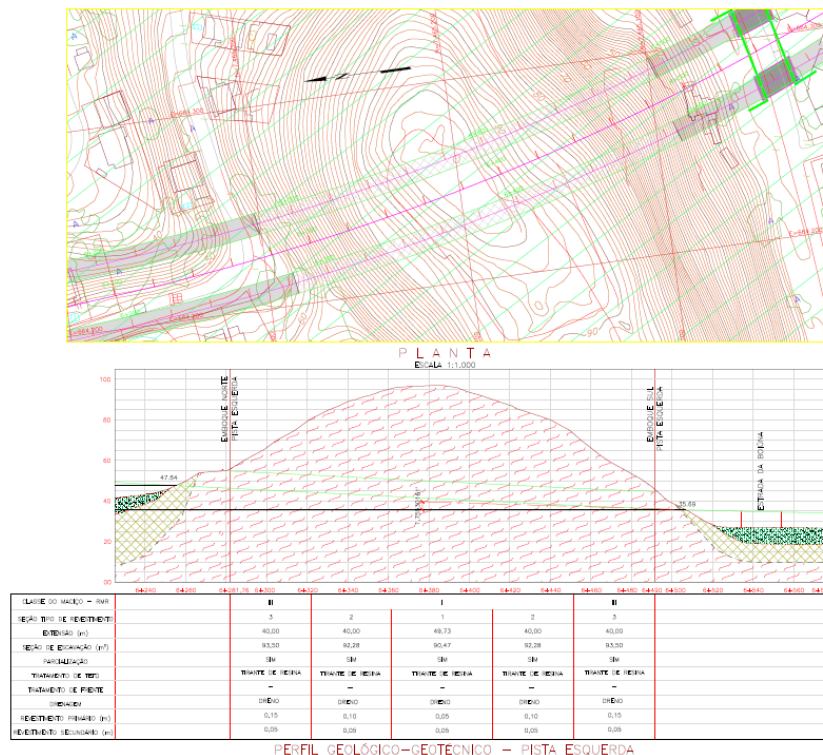


Figura 9 - Vistas do perfil longitudinal do túnel e terreno (Memorial de Cálculo Túnel Engenho Velho e Boiúna)

A escolha do projeto em questão se deu principalmente pela facilidade de contato com a empresa projetista da estrutura, que trabalha com diversos projetos de túnel no Brasil. O projeto do Boiúna foi selecionado por se tratar de uma obra relativamente simples e de pequenas dimensões, sendo mais apropriada para uma modelagem inicial.

Vale ressaltar que foi preciso realizar algumas simplificações quanto ao projeto original do túnel, principalmente na parte de modelagem dos elementos internos que não são contínuos ao longo do eixo. Isso foi feito visando os objetivos do trabalho, já que a modelagem desses elementos não seria uma limitação da ferramenta.



Figura 10 - Túnel Boiúna e sua localização em planta (Google Maps, 2019)

3.2) Modelagem geométrica

Por meio da modelagem geométrica, buscou-se representar o projeto de túnel escolhido com todos os seus elementos estruturais, visando uma posterior exportação para um software de análise estrutural. Essa modelagem se deu de maneira simplificada dada a complexidade do projeto e os múltiplos detalhes que o englobam, como especificado anteriormente. Entretanto, a modelagem irá conter todas as informações básicas necessárias para a análise estrutural.

Além disso, foram inseridas as principais características do túnel para uma representação realista. Buscando descobrir as limitações e potenciais do Autodesk Revit, a modelagem será feita utilizando apenas suas ferramentas. Dessa forma serão modelados o maciço, a estrutura do túnel e os elementos da via.

3.2.1) Modelagem do maciço

Como primeiro passo para realizar a modelagem do projeto de túnel escolhido, é necessário representar o maciço em que ele se encontra inserido. Dessa forma, foi obtido o perfil topográfico do terreno através de plantas topográficas a partir do software AutoCAD, fornecidas pela empresa projetista.

No software Revit, há uma ferramenta específica para a modelagem de terrenos, chamada *Toposurface*. Através da ferramenta, é possível inserir pontos com determinadas cotas, compondo curvas de nível. Outra possibilidade é a importação de curvas de nível de um arquivo *.dwg* e a direta interpretação desses elementos pelo programa. Para o funcionamento correto dessa ferramenta, é necessário haver a informação da cota Z no arquivo de onde ocorre a importação.

Foi justamente esta opção que foi utilizada para a modelagem das curvas de nível do maciço do túnel no Revit. Assim, elas foram diretamente importadas e foi possível visualizar o modelo tridimensional do terreno.

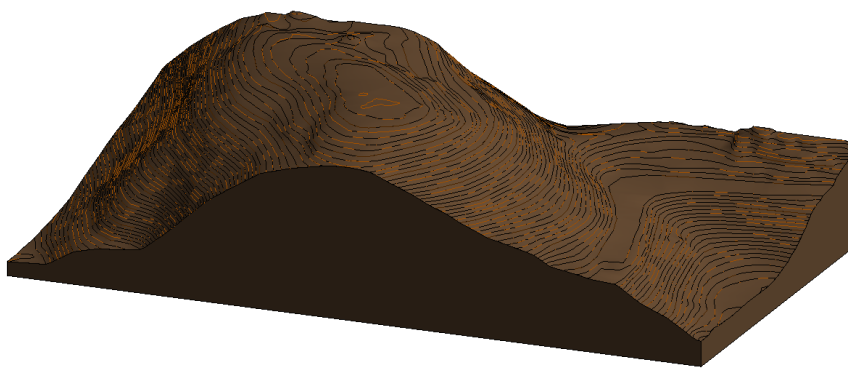


Figura 11 - Perfil topográfico do maciço de projeto

3.2.2) Modelagem geométrica do túnel

Ela consiste em representar geometricamente o revestimento primário e secundário. Dessa maneira, por meio da ferramenta *Model in Place* do Revit, foi possível gerar uma seção transversal e prolongá-la ao longo de um eixo longitudinal, por meio do comando *Sweep*. Portanto, para o projeto do túnel em questão, foi importado tanto o eixo longitudinal do túnel quanto sua seção transversal, ambos em arquivo AutoCAD. Não foi possível inserir a curvatura vertical do projeto por uma limitação da ferramenta *Sweep*, sendo simplificado o projeto para um eixo horizontal para adequação à ferramenta. Assim, foi utilizada a ferramenta para criação do túnel por meio do prolongamento da seção no eixo, como mostra a Figura 12.

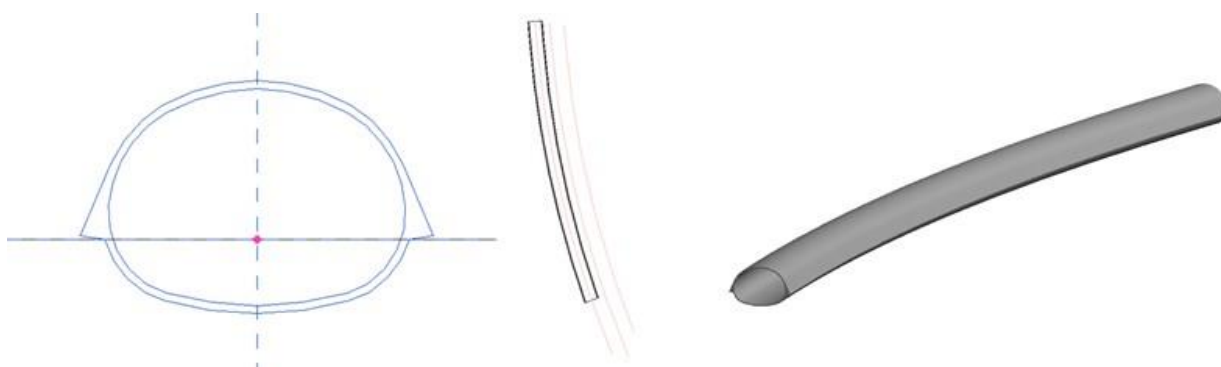


Figura 12 - Seção transversal e seu prolongamento no eixo

O próximo passo foi definir as áreas de intersecção da estrutura do túnel com o maciço, de forma que não haja sobreposição. Para isso, foi definida uma área que será recortada da superfície original. Assim, ao se projetar a seção a estrutura do túnel sobre a área do maciço fica visível a fronteira de intersecção, sendo possível delimitá-la através da ferramenta e obter uma situação geométrica realista da estrutura do túnel inserida no maciço.

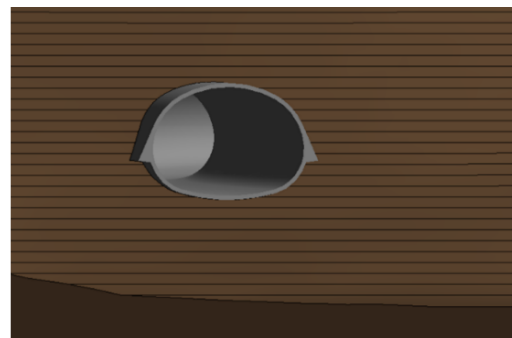
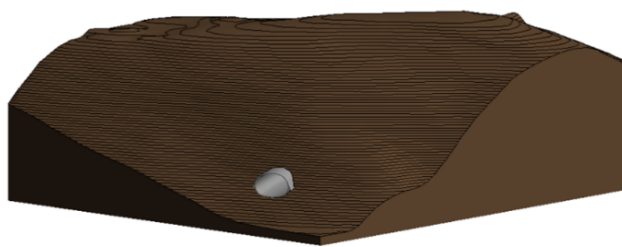


Figura 13 - Estrutura do túnel inserida no maciço

Quanto à inserção do material utilizado, que no caso é o concreto, verificou-se a possibilidade de se inserir um material para a família. Assim, é possível se obter todas as propriedades físicas do material já instaladas no programa, ou então inseri-las manualmente, como mostra a Figura 14.

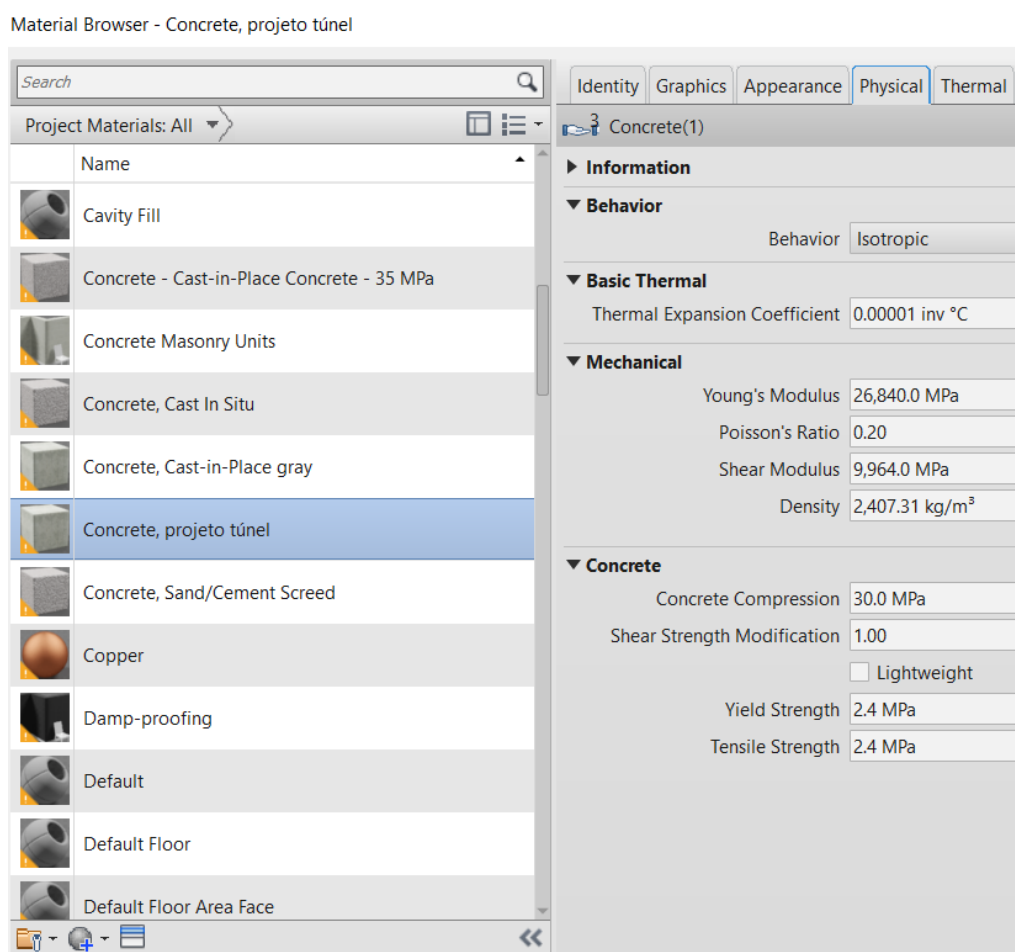


Figura 14 - Material do revestimento primário

Essa modelagem, portanto, atende aos padrões BIM, já que os elementos geométricos são caracterizados como objetos, possuindo um material que determina suas propriedades físicas. Estas propriedades serão fundamentais para entender o comportamento da estrutura na fase de análise estrutural após a exportação para o software apropriado.

3.2.2) Modelagem dos elementos internos

O túnel contém diversos elementos internos, que são os componentes da via, dutos, equipamentos de segurança, entre outros. Através da seção transversal típica, é possível obter visualmente as dimensões aproximadas desses elementos.



Figura 15 – Projeto original: elementos internos do túnel (Memorial de Cálculo Túnel Engenho Velho e Boiúna)

Dessa forma, definiu-se uma seção transversal típica simplificada com dimensões estimadas e que se aproxima muito com a do projeto. Assim, utilizando-se o comando de prolongamento (*Sweep*), modelaram-se os elementos da seção ao longo do túnel. Como materiais de concreto, foram definidos o pavimento, as canaletas de drenagem, a barreira vertical, a abertura para a passagem de dutos e o passeio para pedestres. Além disso, foram inseridas quatro camadas de revestimento do pavimento: o asfalto, camada de ligação, base e sub-leito.

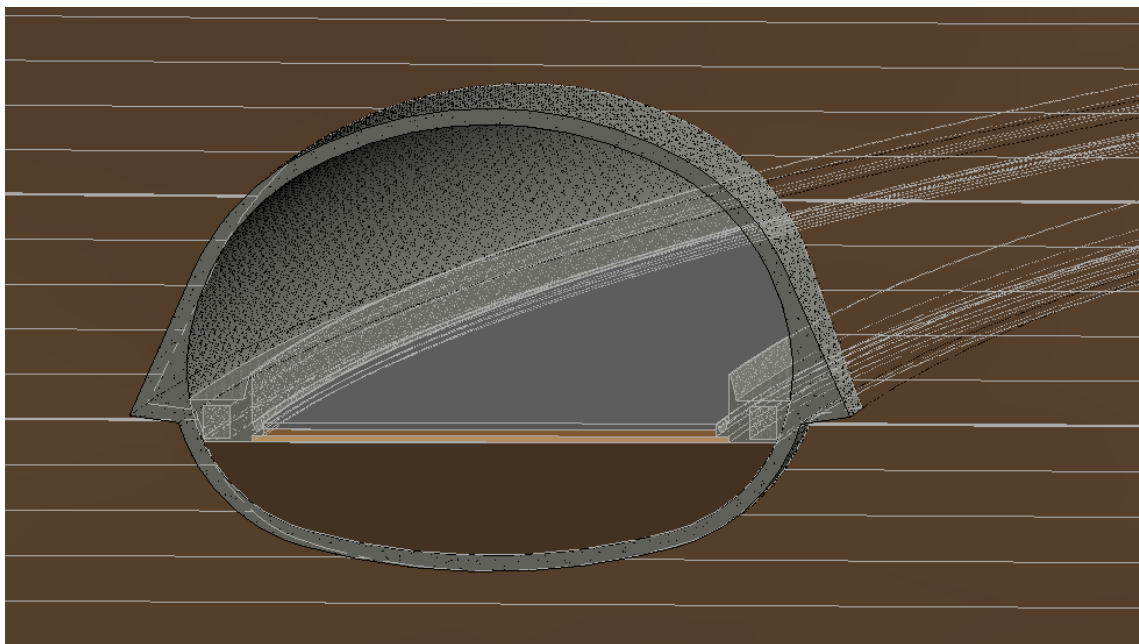


Figura 16 - Elementos internos modelados

No momento de inserir os diferentes materiais para as camadas que compõem o pavimento, percebeu-se que só havia um tipo de material granular cimentício disponível. Dessa maneira, para modelagem correta dos elementos, seria necessário a busca de um arquivo adicional que contenha a família de materiais para pavimentos ou a elaboração de um novo material.

Além desses elementos internos do túnel, é possível adicionar também alguns outros que não possuem uma dimensão contínua ao longo do túnel e ocorrem esporadicamente, com dimensões reduzidas, como por exemplo portas, extintores, luminárias e sistema de ventilação. Esses elementos podem ser facilmente inseridos através do Revit, através de comandos ou importação de famílias externas, mas, por não se tratar do objetivo principal deste trabalho, optou-se por não modelá-los.

3.3) Exportação para análise estrutural

Uma vez concluída a modelagem, foi feita uma tentativa de exportação a um software que possibilite a análise estrutural. Foi escolhido o Robot Structural Analysis, também da Autodesk, por ser uma ferramenta conhecida para estes fins em projetos de edifícios. Assim, a análise visa a inserção dos carregamentos provenientes do maciço e da via permanente para a obtenção dos esforços solicitantes na seção.

Como passo preliminar da análise, foram exportados apenas os elementos estruturais do modelo: os revestimentos primário e secundário. O objetivo desta primeira interação com o software estrutural foi identificar as principais características de funcionamento da ferramenta e possíveis dificuldades na importação desses elementos.

Inicialmente, para o entendimento da interação entre o Revit e Robot, foram realizados diversos testes por meio da exportação de elementos estruturais comuns. Verificou-se que, através da instalação de um pacote adicional de análise estrutural no Revit, é possível exportar o modelo diretamente para o Robot. Dessa maneira, em caráter de teste, foi modelado um pórtico composto por dois pilares e uma viga no Revit e importado com sucesso na ferramenta. Nesse processo, foi possível transmitir as características físicas dos materiais que compõem os elementos, além das informações geométricas. Assim, realizou-se com êxito o dimensionamento da armadura e exportou-se o modelo de volta para o Revit com as barras de aço inseridas.

Por outro lado, quando tentou-se exportar a seção do túnel, o programa Robot não foi capaz de reconhecer o elemento como estrutural, sendo impossibilitada a exportação direta. Portanto, foi necessário salvar o arquivo com a extensão *.sat* e abri-lo no Robot. A desvantagem desse processo foi que os materiais dos elementos não foram reconhecidos e tiveram que ser inseridos novamente de forma manual. Após ter o modelo no ambiente do Robot, foi possível a criação de uma malha de elementos finitos na estrutura. Ainda foi realizada, como teste, a inserção de carregamentos concentrados e apoios. A Figura 17 ilustra a malha e a Figura 18, os carregamentos e apoios.

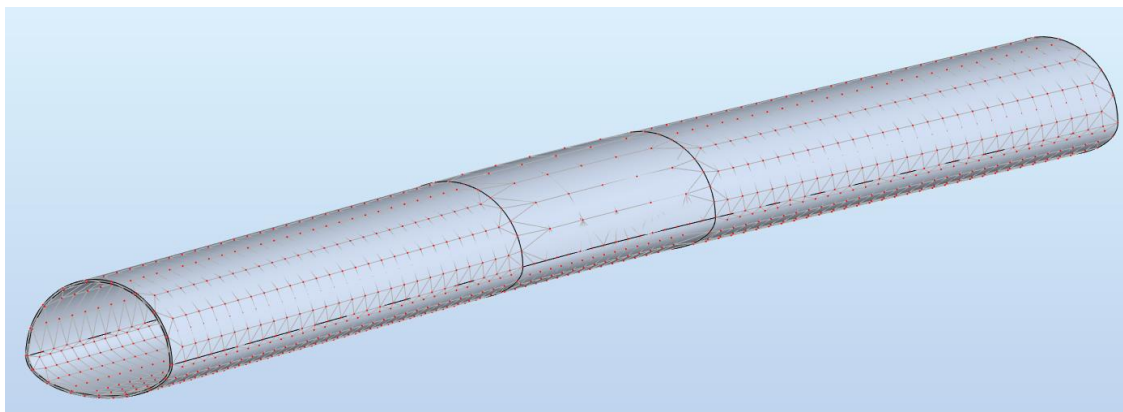


Figura 17 - Malha de elementos finitos gerada no Robot Structural Analysis

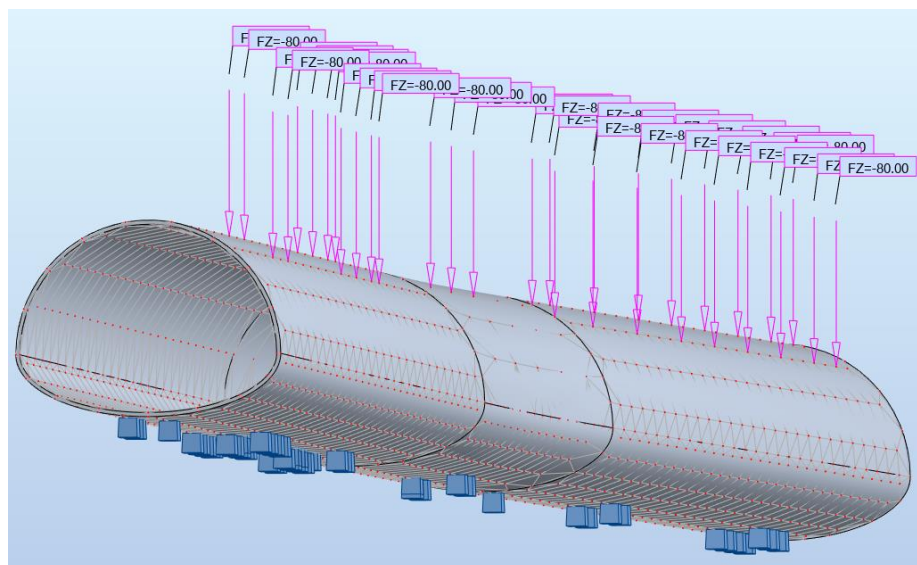


Figura 18 - Modelo teste com carregamentos e apoios

3.4) Avaliação das capacidades e limitações

Tanto na fase de estudo dos pacotes computacionais quanto na própria modelagem da geometria tridimensional do túnel, foi possível ter uma ideia dos potenciais e limitações do software Revit. Verificou-se que a ferramenta ainda possui muitas limitações para ser plenamente inserida no campo de projetos de infraestrutura, até porque a origem de seu desenvolvimento não foi realizada com esse objetivo. Além disso, por ser um ambiente de trabalho relativamente novo e mais complexo, o conhecimento do Revit ainda está em processo de aprendizagem pelos profissionais do mercado, tornando seu processo de aprimoramento e difusão em diversos campos de projetos mais lento.

No processo de criação do modelo, não foram encontradas atribuições para os elementos relacionadas a projetos de infraestrutura, como revestimento de túnel. Além disso, os materiais disponíveis limitam-se aos mais utilizados em edificações, sem possuir famílias de materiais para pavimentos rodoviários. Outra limitação encontrada foi na criação do eixo do túnel. Apesar de a ferramenta *Model in Place* possibilitar diversos comandos para modelagem de elementos com formas variadas, tornando simples o processo de criação de elementos tridimensionais extensos, ela não permite a geração de uma curvatura vertical no eixo. Tanto o comando *Sweep* utilizado quanto os outros comandos disponíveis só trabalham com elementos com eixo coincidente com um dos planos horizontais de projeto. Este é um fator bastante limitante para a ferramenta, já que praticamente todos os projetos de infraestrutura subterrânea apresentam alguma variação de declividade vertical.

Como ponto positivo da ferramenta, destaca-se a existência de boa interação entre as diversas ferramentas da Autodesk, Revit e Robot, que permitem uma rápida exportação de modelos que é fundamental na metodologia BIM.

Apesar de não ter sido utilizado para sua finalidade de análise estrutural, já foi possível adquirir algumas noções sobre o software Robot, através da primeira interação com seu ambiente e tentativa de importação de modelos do Revit. Com relação à geração de um modelo para o túnel, apesar de ter sido possível a geração da malha de elementos finitos da estrutura do túnel, o processo tomou muito tempo e o parou de responder no momento da geração de esforços. Portanto, o programa não obteve uma boa resposta para modelos de geometrias mais complexas, se mostrando bastante limitado às estruturas usuais de edifícios, como vigas e lajes.

Optou-se, para as fases seguintes do trabalho, por não dar continuidade ao processo de análise estrutural do túnel com a ferramenta Robot. Esta não pareceu muito promissora para a realização de uma análise estrutural que levasse em conta todos os parâmetros geotécnicos, de maneira automatizada, necessários para um bom cálculo estrutural do projeto. A ferramenta foi escolhida por ser um pacote computacional conhecido no mercado, porém sua interface, assim como o Revit, foi toda planejada para cálculos em edifícios.

Dessa maneira, na etapa seguinte, optou-se pela realização de uma modelagem de túnel mais complexa e realista. Para isso, a partir de um novo projeto já desenvolvido, aprofundou-se em técnicas de modelagem e novas ferramentas computacionais que auxiliem nesse processo. Com relação à análise estrutural do túnel, a fase seguinte do trabalho também consistiu na busca de outras ferramentas que permitissem uma exportação do modelo geométrico do maciço e parâmetros do solo, para realizar uma análise geotécnica que também levasse em consideração as fases de escavação.

4. ESTUDO DE CASO: POÇO PADRE FRANCISCO XAVIER ROSER

Como base para a continuação da avaliação dos potenciais de softwares de modelagem BIM, foi escolhido um projeto mais complexo. Trata-se da integração de um poço de ventilação com um trecho do metrô na cidade de São Paulo. Nesse novo projeto, serão avaliadas as potencialidades dos softwares de modelagem Civil 3D e Revit, agora com a ferramenta de auxílio *Dynamo*. Para isso, também foram utilizadas no processo as ferramentas da Autodesk Infraworks e Navisworks, enriquecendo a interação BIM no projeto. Para análise estrutural buscou-se aproveitar o modelo gerado em análises usuais em 2D e também em 3D. Finalmente foi avaliada a capacidade dos programas Revit e AllPlan para detalhamento de armaduras nas estruturas de concreto armado.

4.1) Descrição da obra

O projeto escolhido para o estudo final é a integração do túnel com um poço de ventilação da Linha 2-Verde do metrô de São Paulo. O poço fica localizado próximo à estação Sacomã, no bairro do Ipiranga, na Rua Padre Francisco Xavier Roser com a Avenida Doutor Gentil Moura, como pode-se observar na Figura 19. O poço de ventilação encontra-se entre a estação Alto de Ipiranga e estação Sacomã e o acesso é mediante um túnel de ligação. Os dados do projeto foram fornecidos pela Maffei Engenharia, empresa especialista em realização de projetos estruturais de obras subterrâneas, que desenvolveu os dois projetos.

Vale ressaltar ainda que foram feitas algumas simplificações quanto ao projeto original do poço, principalmente na laje de cobertura, devido à falta de desenhos com alguns detalhes essenciais para a compreensão do projeto. Contudo, foi tomado o cuidado de selecionar criteriosamente essas informações de modo a não alterar significativamente o modelo.

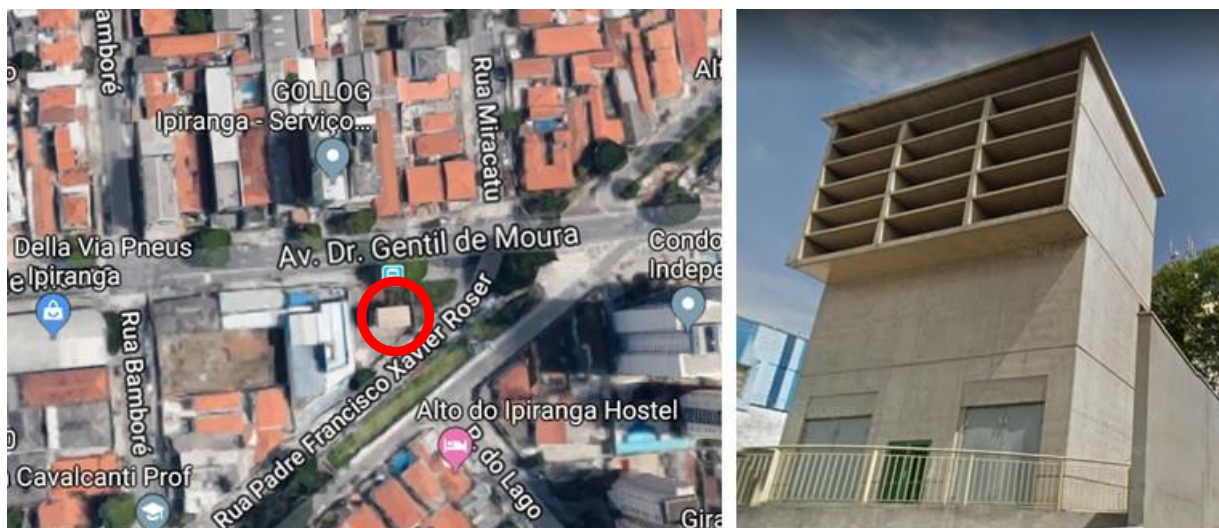


Figura 19 - Localização e saída do poço de ventilação (Google Maps, 2019)

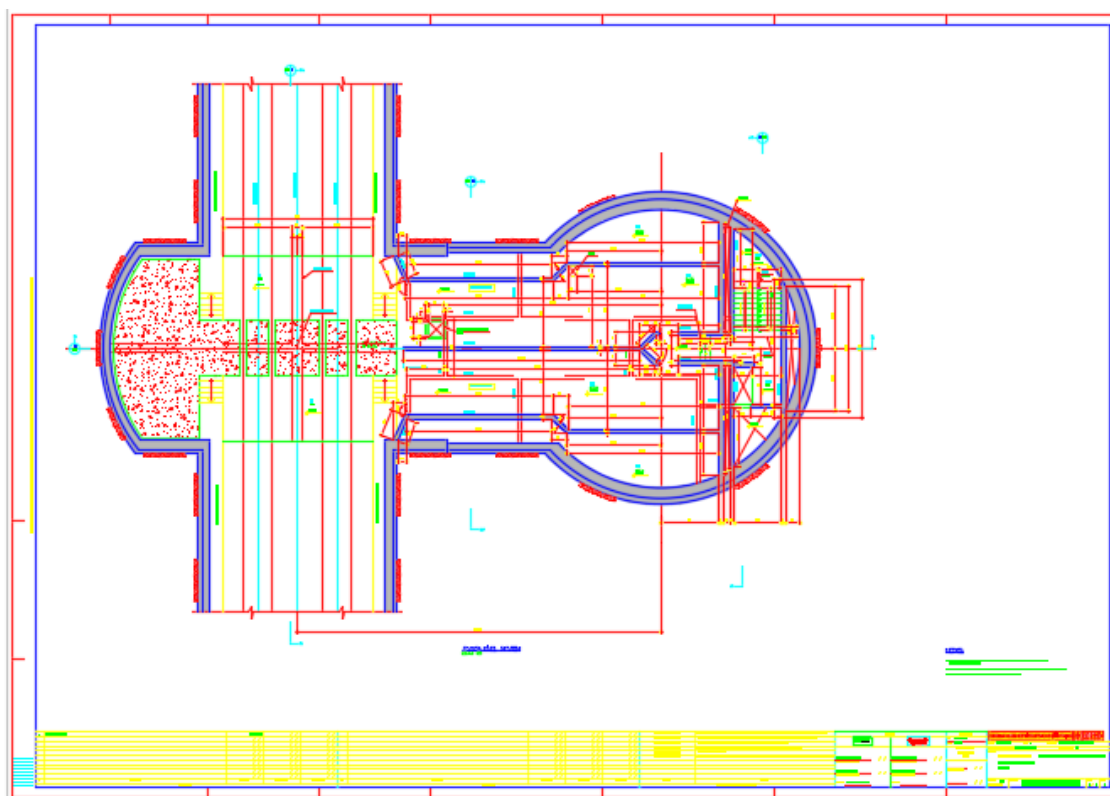


Figura 20 - Planta de pavimento do poço (Maffei Engenharia)

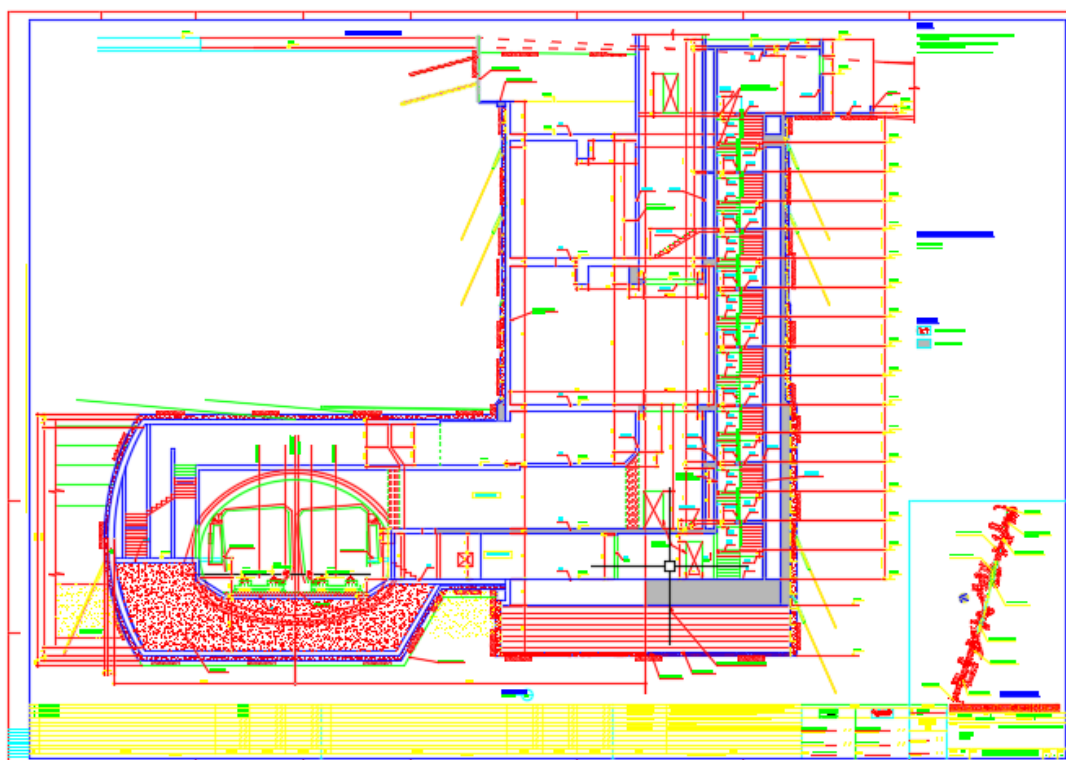


Figura 21 - Corte transversal do poço e integração com túnel (Maffei Engenharia)

O túnel encontra-se a uma profundidade de cerca de 30 metros. Por se tratar de um túnel muito extenso e visando simplificar a modelagem para explorar um maior número de ferramentas para a realização do projeto, foi definido um trecho de aproximadamente 240 metros para a modelagem, com 120 metros de extensão para cada lado a partir do centro do túnel de ligação.

Não foi encontrada nos projetos a superfície do terreno da área de interesse, apenas as cotas ao longo do eixo do túnel, como é mostrado na Figura 22. Também são exibidas na Figura 24 as características da seção do túnel. Observa-se nessa figura a existência de um arco invertido provisório, que, por não possuir desenhos com suas dimensões detalhadas, não pôde ser considerado na elaboração das fases de construção que será abordada mais adiante.

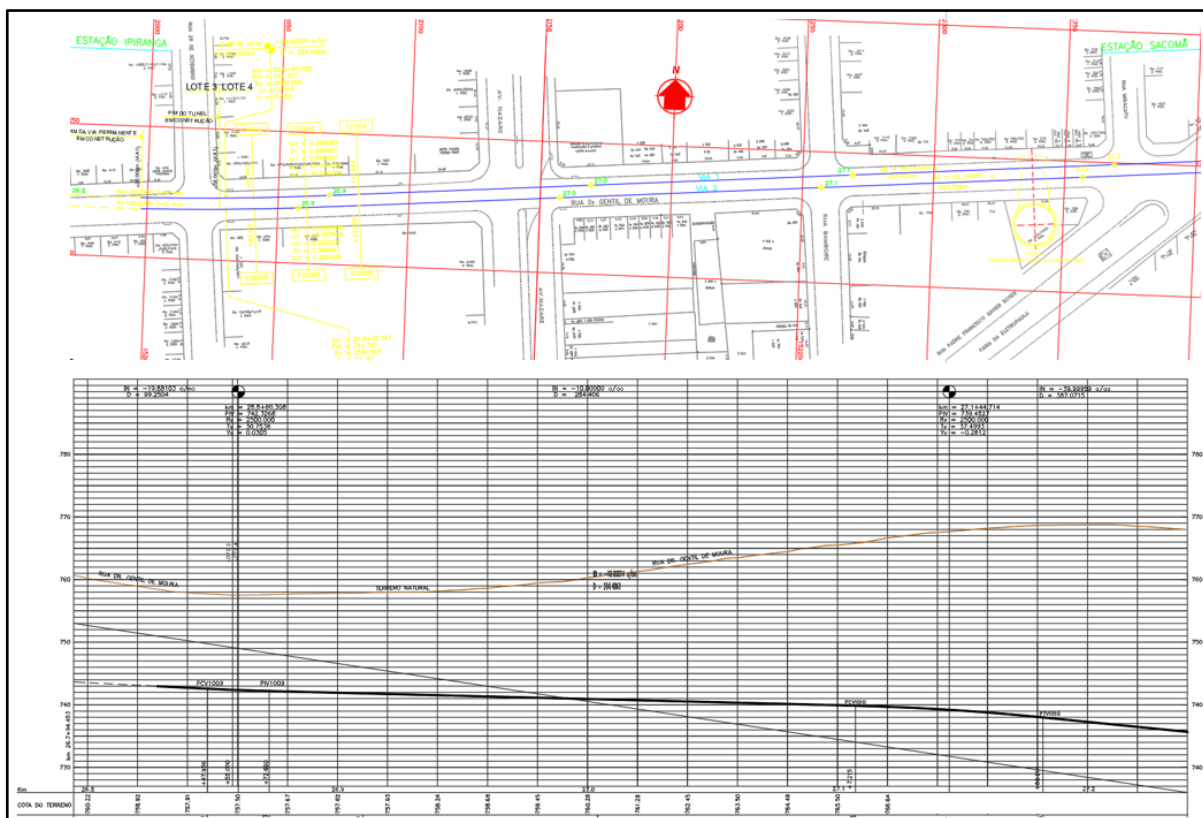


Figura 22 - Planta e elevação do trecho de interesse (Maffei Engenharia)

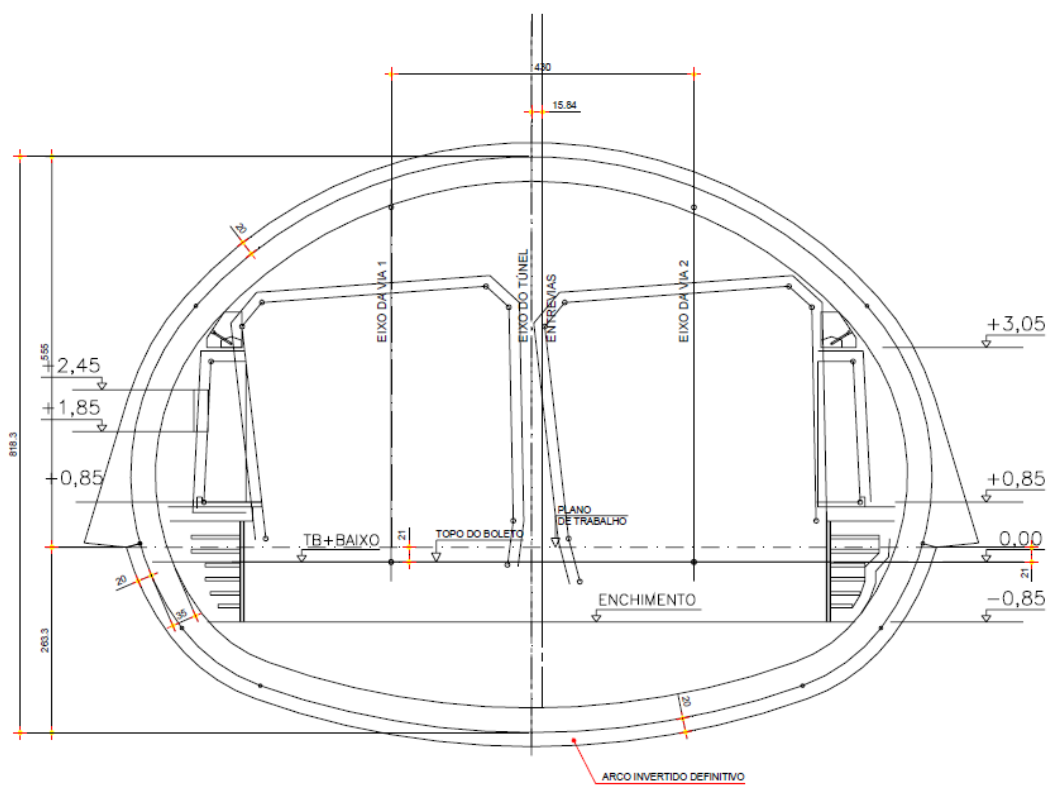


Figura 23 - Gabarito interno e dimensões finais do túnel (Maffei Engenharia)

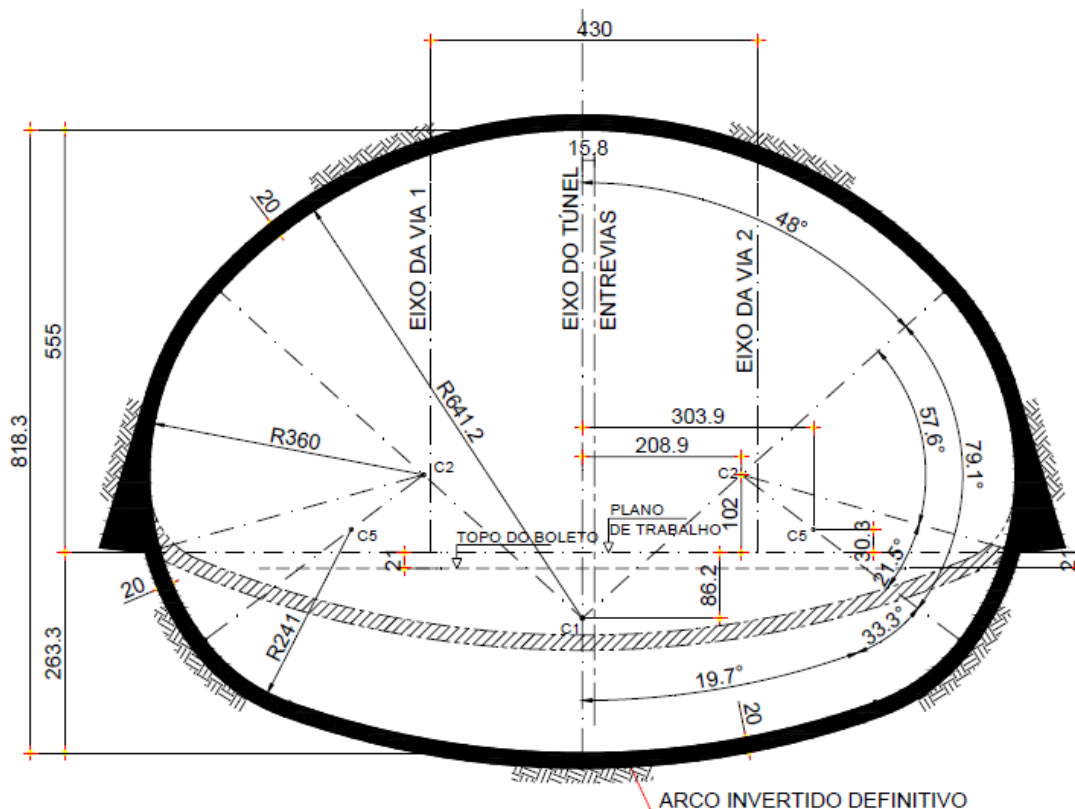


Figura 24 - Geometria do revestimento primário do túnel (Maffei Engenharia)

4.2) Modelagem do maciço

Para a modelagem do maciço, optou-se pela busca de informações em outra plataforma, apropriada para a coleta de informações de terrenos naturais e modelagem de infraestruturas: o Autodesk Infracore. Nele, conseguiu-se comprovar sua capacidade de extração de superfícies de interesse, sendo útil para a modelagem do maciço.

Dessa maneira, encontrou-se a zona de interesse através da delimitação de um retângulo no mapa que oferecido pela ferramenta, selecionando uma área que compreendia o trecho de 240 metros de túnel e sua parte central, com o poço de ventilação. O modelo do terreno foi então exportado ao software Civil 3D para posterior extração das coordenadas.

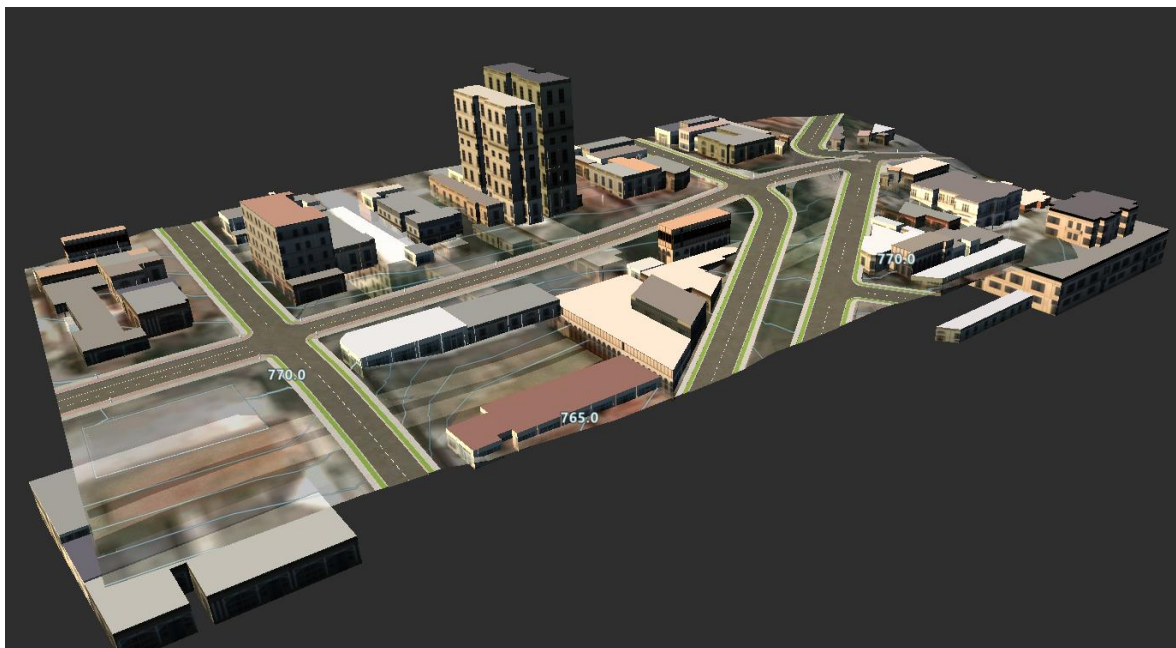


Figura 25 - Área de interesse no software Infracore

Assim, ao ser aberto pelo programa Civil 3D, foram mantidas as coordenadas UTM (metros). Foi possível, portanto, obter os dados completos da região, assim como um mapa de vias simplificado. No entanto, como mostra a Figura 26, houve algumas incompatibilidades entre o retângulo de interesse e o mapa completo. Nela, percebe-se que as linhas vermelhas, que representam as ruas da área de interesse, não coincidem com as ruas do mapa. O problema foi solucionado através da ferramenta de edição de localização, que permite mover o retângulo através da definição de um ponto em comum entre os mapas.

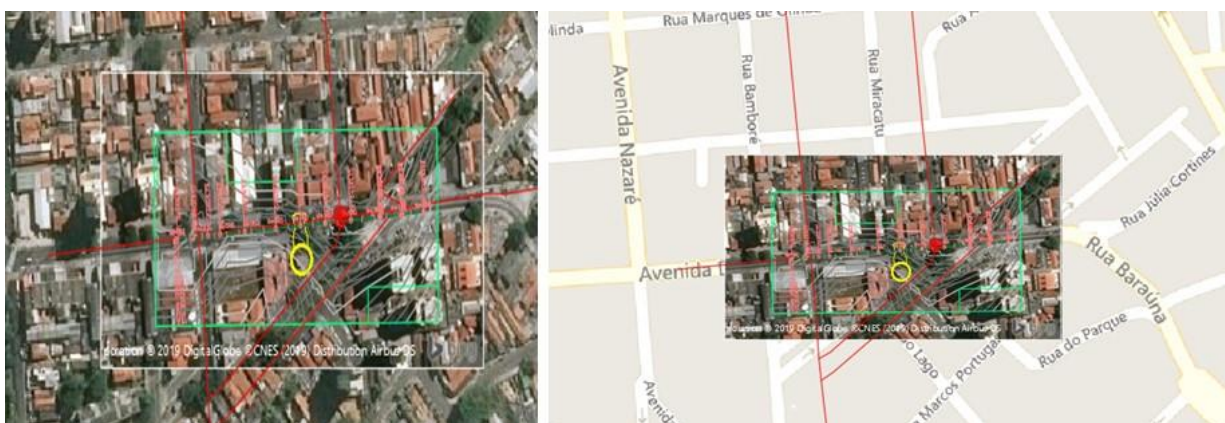


Figura 26 - Mapa georreferenciado com o retângulo de interesse e mapa de vias

Comparando-se a superfície fornecida pelo Infracworks com cotas do projeto (do eixo do túnel) encontrou-se uma diferença e, para ilustrar a comparação entre os dois perfis, plotou-se as cotas do projeto juntamente com as cotas do Infracworks, como mostra a Figura 27.

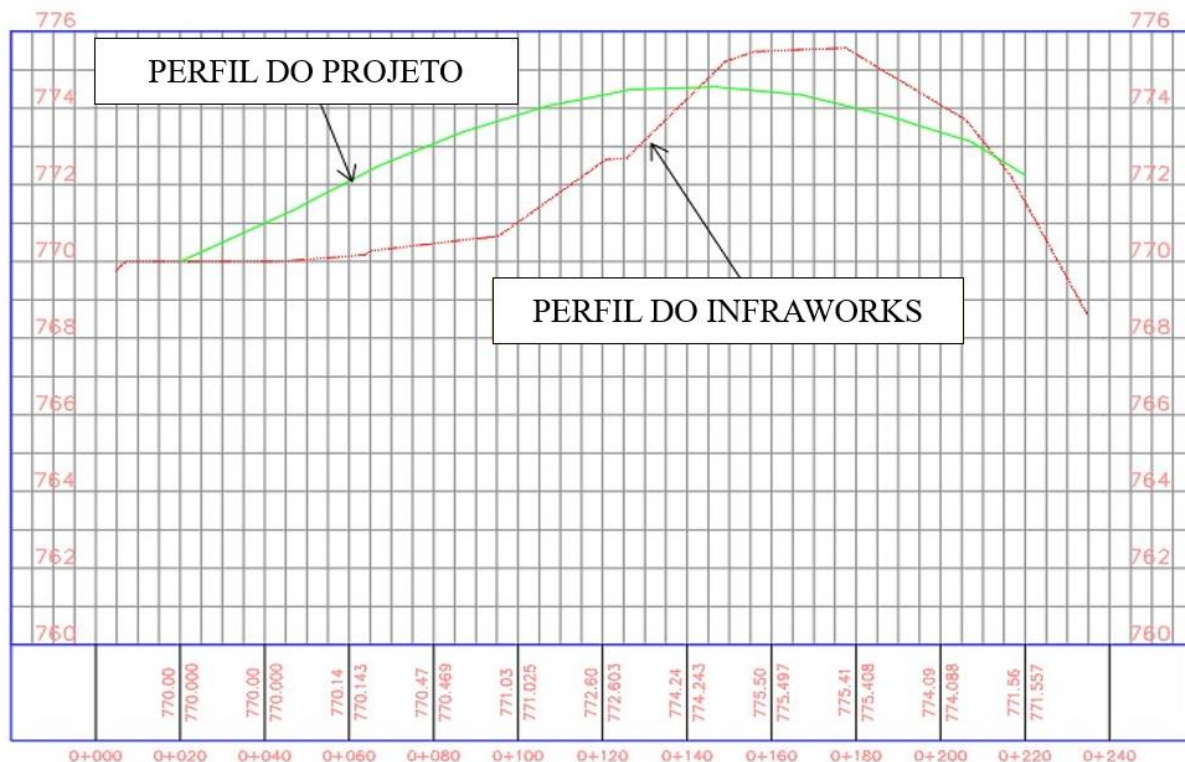


Figura 27 – Comparação dos perfis do terreno e Infracworks

A diferença entre os valores, muito provavelmente, se deve à incertezas trazidas pelo software Infracworks, que trata-se de uma ferramenta útil para a realização de projeto básico e fornece uma aproximação do terreno estudado. Para a realização de um projeto executivo real é essencial que haja um levantamento topográfico para identificação das posições exatas das cotas do terreno. Entretanto, optou-se por modelar o maciço com os dados provenientes do Infracworks, já que este apresenta um perfil mais detalhado do que apenas as cotas do eixo do túnel disponibilizadas no projeto.

4.3) Modelagem geométrica

A modelagem geométrica do projeto foi subdividida na modelagem do túnel, através de dois softwares, e do túnel de ligação e poço de ventilação, através do software Revit.

4.2.1) Poço de ventilação

Por se apresentar de forma muito semelhante a um edifício, optou-se por se realizar a modelagem do poço de ventilação no ambiente usual do software Revit. Visando uma maior rapidez no processo, foram modeladas apenas a estrutura externa e interna do poço, já que os demais elementos internos, como portas e janelas, consistem apenas em detalhes de acabamento e podem ser facilmente inseridos com comandos usuais da ferramenta. Portanto, a modelagem foi realizada utilizando-se pavimentos e paredes de espessuras variadas, conforme projeto original.

O poço é um edifício de 6 pavimentos, com sua estrutura toda em concreto. Há um revestimento externo em contato com o solo, que pode ser dividido em primário e secundário. Também há no projeto uma abertura em todos os pavimentos para os dutos de ventilação. O processo de modelagem se deu com o uso das ferramentas usuais para edifícios, como a de lajes e paredes, sobrepondo as plantas importadas do projeto em AutoCAD. Também foi modelada uma escada, que conecta todos os pavimentos, através do comando apropriado e colocada a estrutura da saída de ar no topo da estrutura.

Além da estrutura principal do poço, há uma conexão com o túnel principal nos três pavimentos inferiores, através de um pequeno túnel de ligação. No terceiro pavimento há uma passarela que permite, através de uma escada, a manutenção do túnel pelo lado contrário ao poço. As figuras a seguir mostram com mais detalhes os produtos desta modelagem.

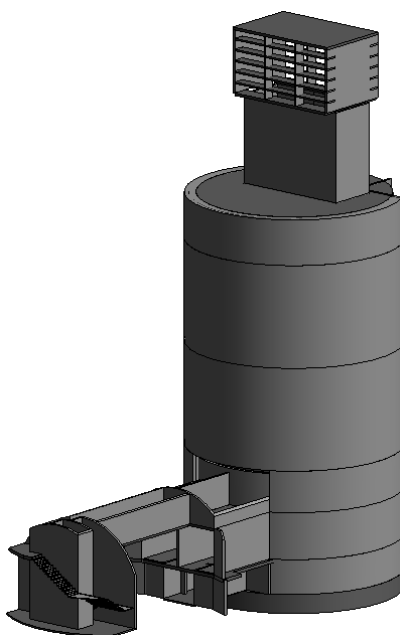


Figura 28 - Estrutura externa do poço e integração com o túnel

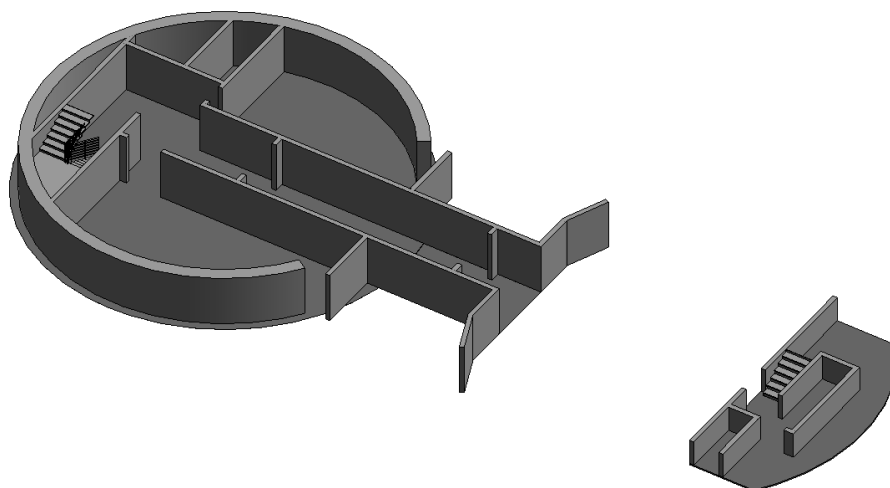


Figura 29 - Pavimento Inferior: Visitação ao túnel

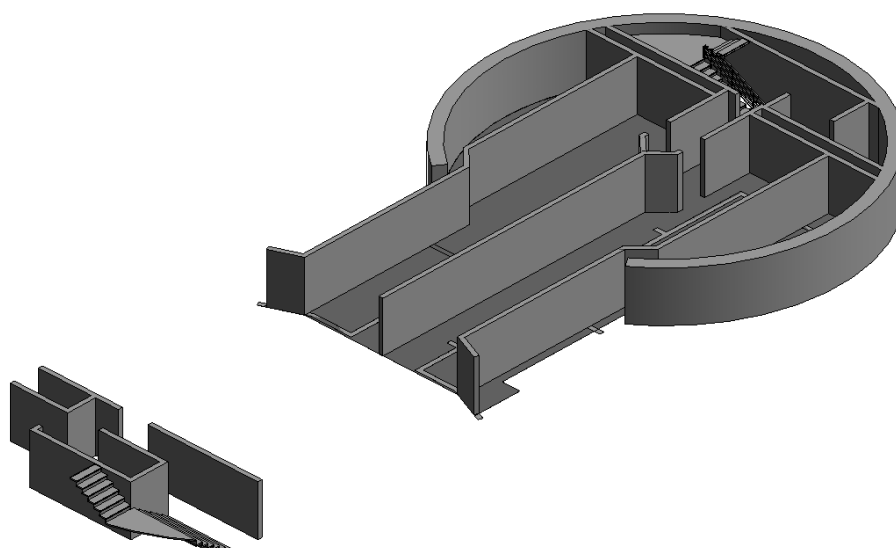


Figura 30 - 2º Pavimento: Chegada dos dutos de ventilação

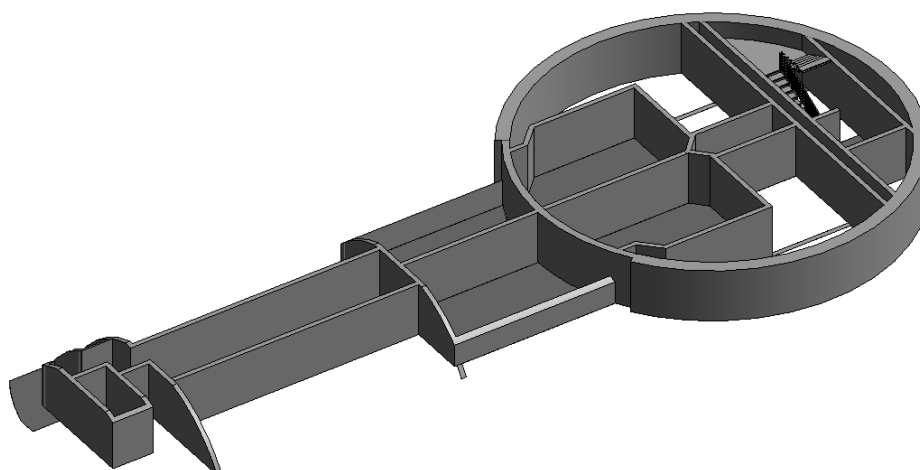


Figura 31 - 3º Pavimento: Passarela superior

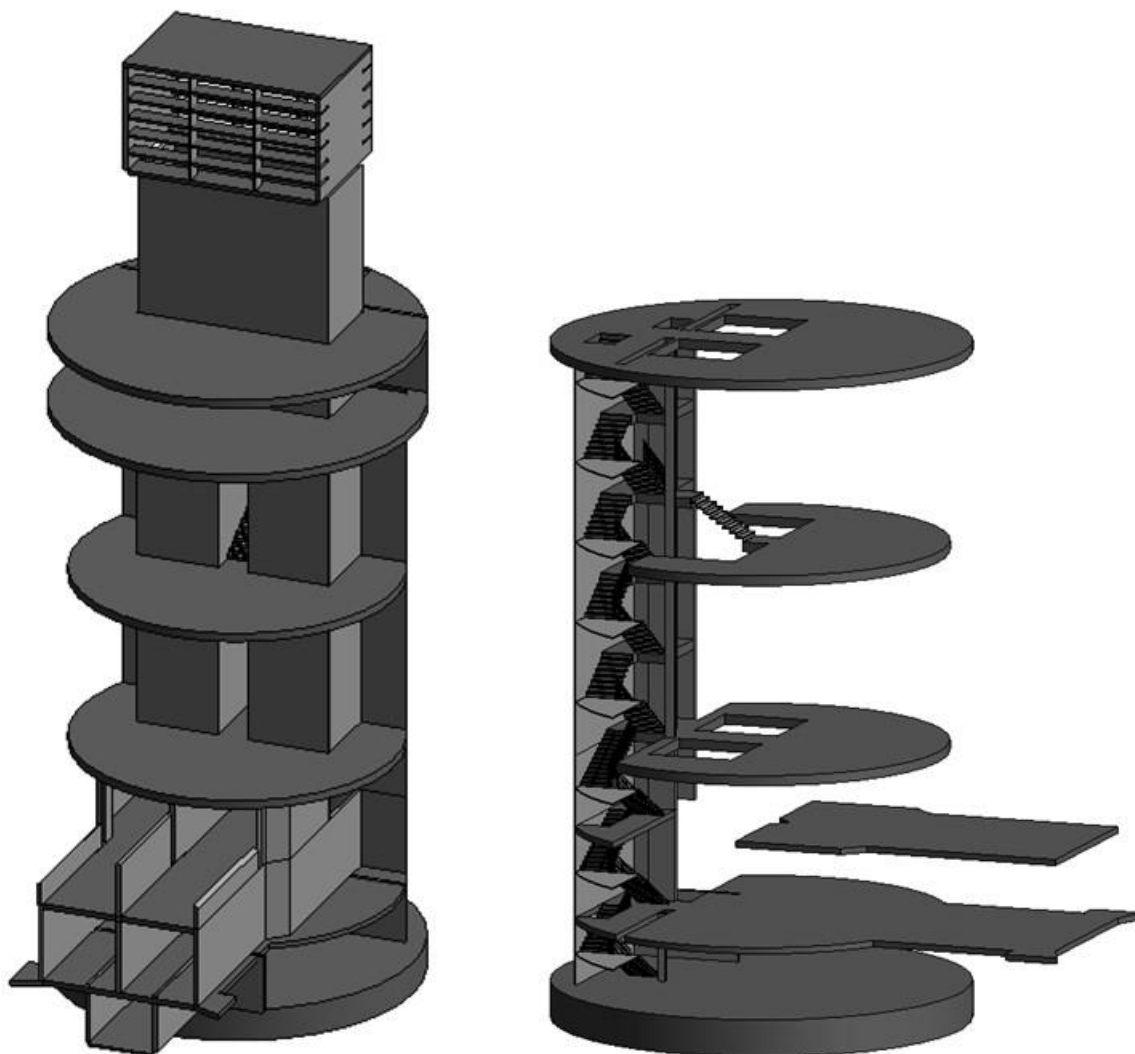


Figura 32 - Visualização interna do poço e Escada

4.2.2) Túnel de ligação

O túnel que realiza a ligação entre os pavimentos inferiores do poço de ventilação e o túnel propriamente dito foi modelado juntamente com o projeto do poço, no software Revit. Por apresentar uma geometria simples, com eixo reto sem declividades, optou-se por modelar seu revestimento da mesma maneira que o túnel do projeto preliminar foi modelado: através do comando *Sweep*, dentro do ambiente *Model in Place*.

Em certo ponto ao longo da extensão do túnel de ligação, há uma mudança de seção, com um trecho com declividade unindo ambas. Dessa maneira, foram criadas duas extrusões distintas em eixos sem declividades, uma para cada seção. Para modelar o trecho em declive, utilizou-se o comando *Swept Blend*, que permite criar uma extrusão com um eixo ligando duas seções distintas. Assim, obteve-se o trecho de ligação entre as duas seções, mostrado na Figura 33.

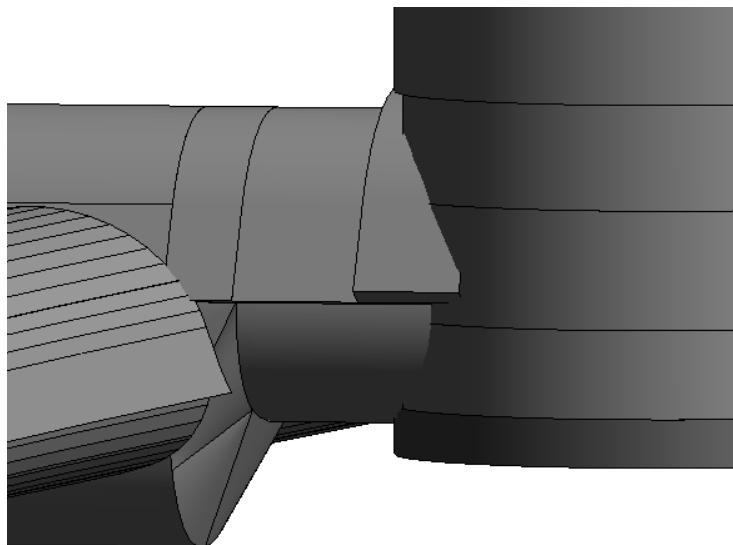


Figura 33 - Trecho em declive, unindo trechos de seções distintas

Para delimitar a intersecção entre o túnel e o revestimento externo do poço, foi criada uma extrusão de um cilindro vazio, com o mesmo raio das paredes. Assim, foi possível realizar o corte da parede do túnel na fronteira exata de intersecção com as paredes do poço, fazendo uma conexão entre as duas estruturas. Para fechamento do revestimento do túnel, na outra extremidade, não foi encontrada uma maneira de se reproduzir exatamente a casca esférica estabelecida no projeto apenas com comandos do Revit. Assim, foi feita uma aproximação do modelo através do mesmo comando *Swept Blend*, que se assemelha com o modelo.

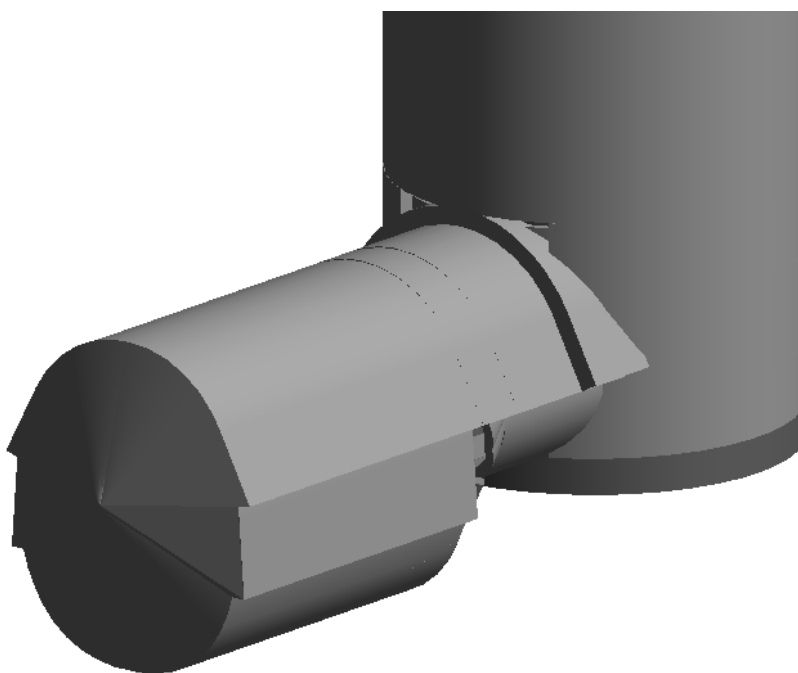


Figura 34 - Modelo do túnel de ligação

4.2.3) Túnel

Para abordar diferentes ferramentas BIM envolvidas na criação do túnel, foram escolhidos dois softwares adequados à modelagem de elementos como túneis: o Autodesk Civil 3D e o ambiente Dynamo, contido no Revit.

4.2.3.1) Modelagem no Civil 3D

O Civil 3D, foi indicado por profissionais da área como a ferramenta mais utilizada no caso de obras de túneis. Também é disponibilizada pela empresa Autodesk e a interface é a mesma que a do software AutoCAD, comumente utilizado nos projetos de Engenharia Civil. Segundo descrição do programa no site da Autodesk, ele é responsável por suporte a obras de infraestrutura e à metodologia BIM. Foi possível, portanto, comprovar a utilidade das ferramentas principalmente na modelagem de obras lineares e na caracterização de terrenos, sendo possível integrar dados coletados com instrumentos topográficos e facilitando a criação de superfícies. Além disso, também é possível importar a superfície pela integração com outros softwares, que foi o processo adotado aproveitando a boa interação com o software Infraworks como foi explicado na seção 4.2).

A metodologia adotada para modelagem do túnel envolve primeiramente a criação de uma superfície que defina o terreno, que no caso foi utilizada a superfície extraída do Infraworks. O Civil 3D conta com uma aba especial para integração com o programa, facilitando o processo de intercâmbio de dados. Assim, é traçado o eixo do túnel em planta, como mostra a Figura 35, através da ferramenta de alinhamento, na qual é possível fazer um traçado seguindo critérios de desenhos pela AASHTO (Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte) ou inserir critérios próprios. A elevação do eixo é inserida por meio da ferramenta de perfil, mostrada na Figura 36, caracterizando, assim, o eixo do túnel por completo. Assim como na ferramenta de alinhamento, também é possível inserir critérios de desenho ou seguir os fornecidos pela AASHTO. Por fim, é inserida a seção ou seções que serão extrudadas ao longo do trecho.

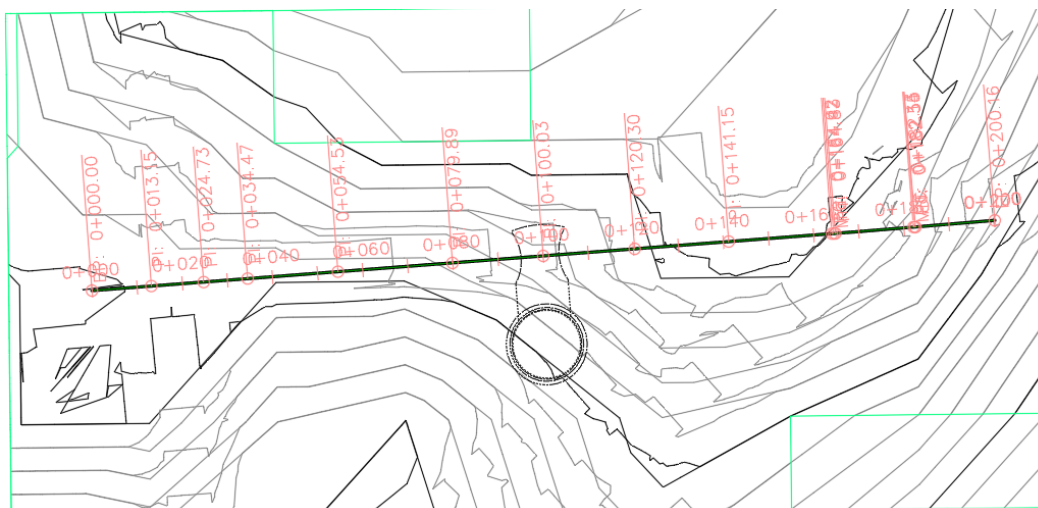


Figura 35 - Traçado em planta

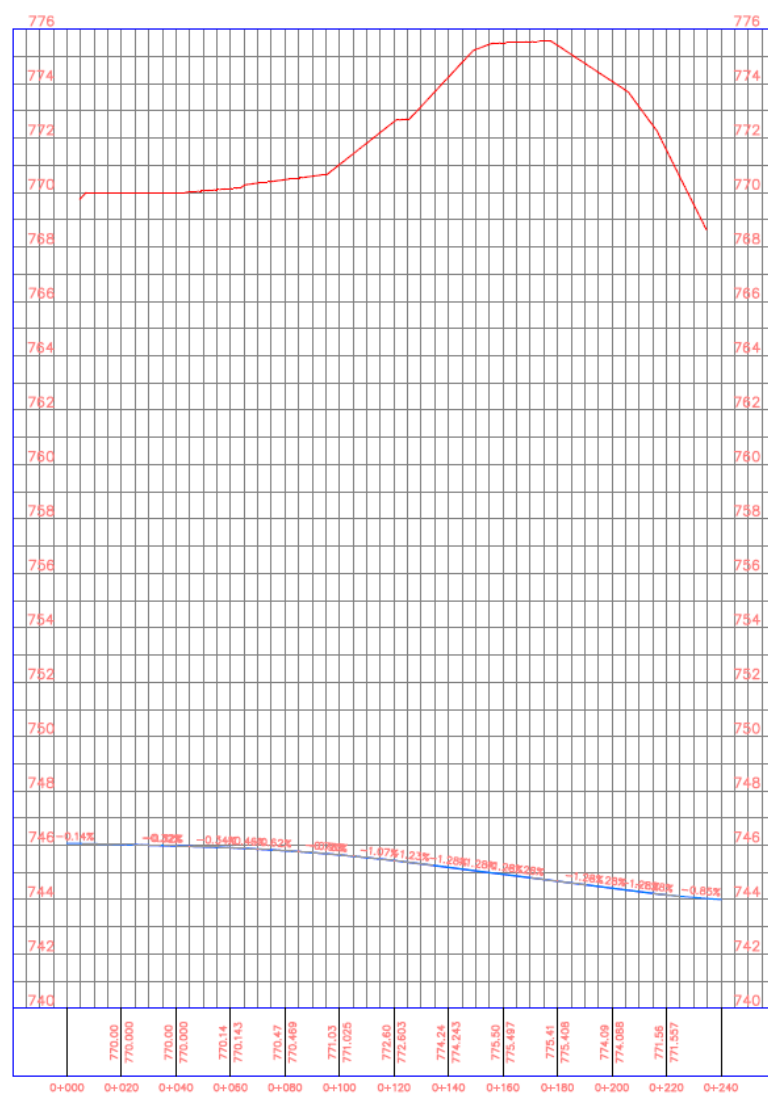


Figura 36 - Perfil do eixo do túnel sob o terreno do maciço

A criação da seção do túnel foi a parte de maior complexidade. Apesar de o Civil 3D já ter seções padrão para rodovias e ferrovias, a seção de túnel NATM não está implementada, já que se trata de uma seção fechada, diferentemente das seções de rodovias comumente encontradas no programa.

Portanto, para criar a seção partiu-se de um conjunto de linhas (ferramenta *Polyline*). Para a assimilação da seção pelo programa, foi necessário realizar uma discretização das linhas adicionando um código a cada uma delas. Este processo foi demorado e posteriormente gerou problemas na criação de superfícies e volume. Após uma consulta com o engenheiro Gabriel Castaño, da Castaño Engenharia, e o engenheiro Bruno Scodeler, da Maffei Engenharia, ambos com bastante experiência em projetos utilizando o programa Civil 3D, foi possível resolver os problemas separando a seção em duas: a superior e a inferior. Agora, as linhas da parte superior da seção receberam um único código, assim como as linhas da parte inferior. Ainda assim, o processo foi demorado devido ao grande número de elementos e resultou numa seção não paramétrica, em que quaisquer alterações demandariam um grande esforço de rearranjo das linhas que a constituem. A seção resultante, mostrada na Figura 37, é caracterizada pelo revestimento primário e secundário. É possível observar nela os pontos que delimitam cada trecho de discretização. Além disso, como uma ilustração gráfica da ferrovia utilizada ao final da obra, foram inseridos alguns elementos que a compõem: o enchimento de argamassa, duas lajes de concreto e quatro trilhos.

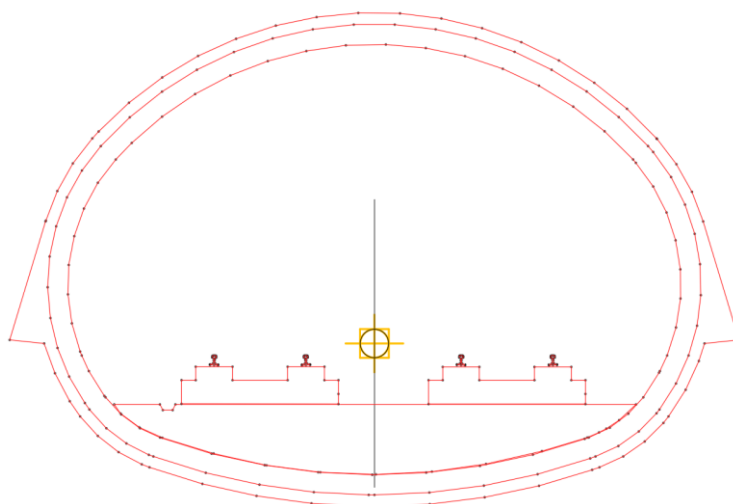


Figura 37 - Seção do túnel a partir de polilinhas (polyline)

Devido aos problemas relatados anteriormente, buscou-se outras opções para a modelagem do túnel na ferramenta. O ambiente *Subassembly Composer* mostrou-se bastante promissor para a

modelagem da seção. Ele é instalado juntamente com o Civil 3D e tem como principal vantagem a criação rápida e direta de segmentos de seção e superfícies, que posteriormente serão úteis para a criação de superfícies e volumes do *corredor*, respectivamente. Outra vantagem é a possibilidade de criação de seções paramétricas, que podem ser utilizadas em diferentes projetos.

Para criação das seções paramétricas no *Subassembly Composer* são inseridos parâmetros geométricos, que podem ser rapidamente alterados em uma tabela. Os dados de entrada para o revestimento primário foram a espessura do revestimento, quatro raios de curvatura, ângulos de abertura de cada circunferência que compõe a seção e coordenadas de alguns pontos especiais, que são mostrados na Figura 38. Posteriormente, a geometria é definida colocando elementos do tipo ponto, linha, curva e superfície, como mostra a Figura 39. Percebe-se que a geração da geometria é um processo linear, em que cada elemento depende da criação dos anteriores. Para o revestimento primário, foi colocado primeiramente o ponto que define o centro da circunferência superior, então colocou-se os pontos e curvas que definem o arco externo e interno do trecho. Este processo foi repetido para os arcos de circunferência laterais e inferior. Nota-se que os centros das circunferências laterais podem ser calculados sabendo-se o raio delas e sem a necessidade de definir as coordenadas. Então, foram colocados os pontos e linhas que definem as fundações laterais e, por fim, definidas as duas superfícies: superior e inferior, visando a posterior criação de volumes. Assim, foi criada uma seção paramétrica, que pode ser aproveitada em projetos de túnel de seção semelhante, mas com dimensões diferentes.

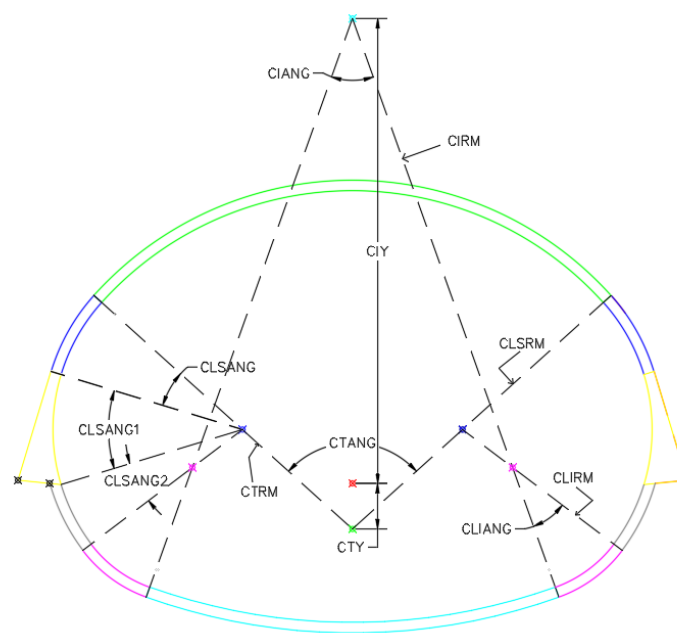


Figura 38 - Revestimento primário com os códigos dos dados de entrada

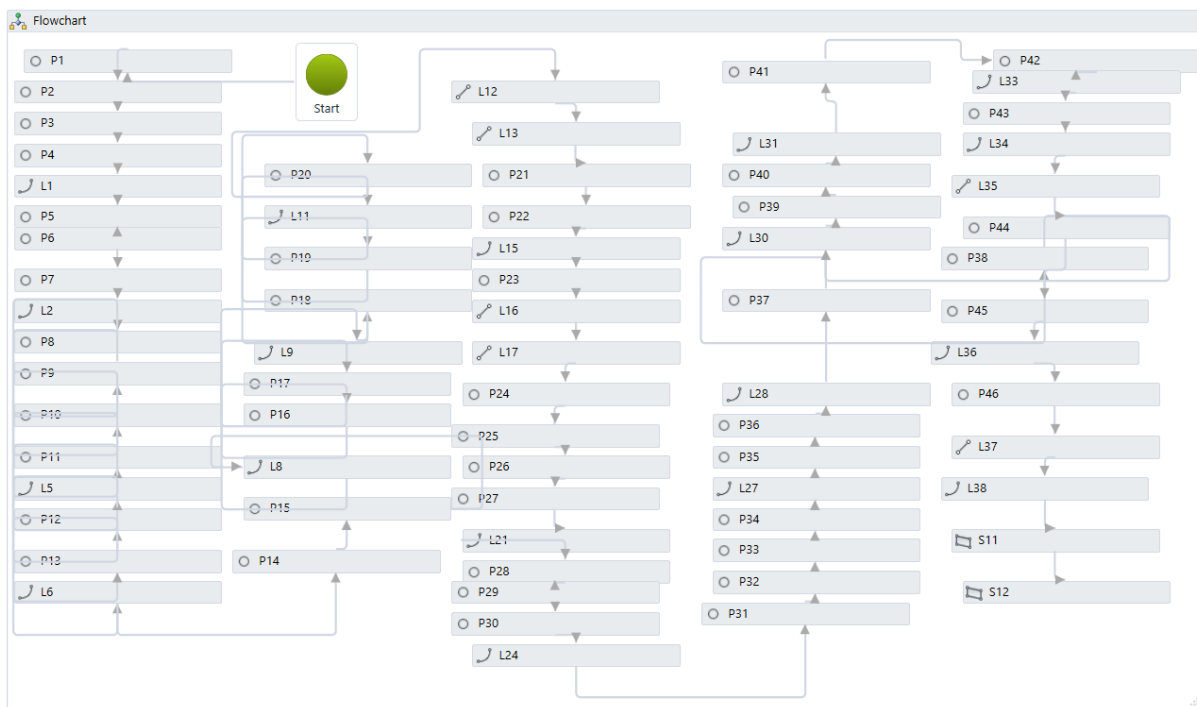


Figura 39 - Pontos, linhas e superfícies que definem o revestimento primário

Foi aproveitada, portanto, a seção de revestimento primário para a criação da seção de revestimento secundário e do contorno externo da seção, que será útil para o posterior cálculo de volume de escavação. A Figura 40 mostra as seções de revestimento primário e secundário, sendo possível ver a divisão das superfícies em superior e inferior. Já a Figura 41 mostra o contorno externo do túnel, também dividido em parte superior e parte inferior, com códigos de “TOPO” e “INF”, respectivamente.

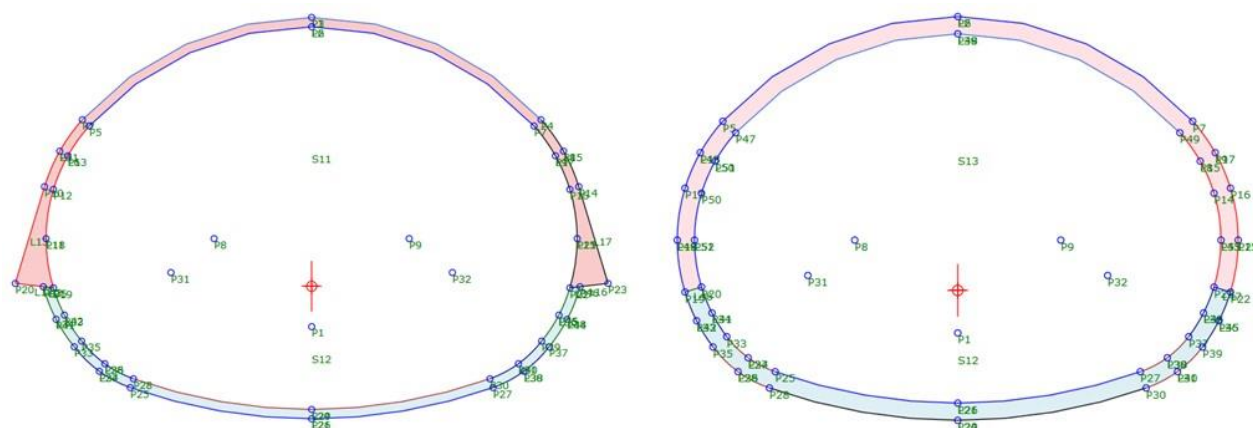


Figura 40 - Seções de Revestimento Primário e Secundário

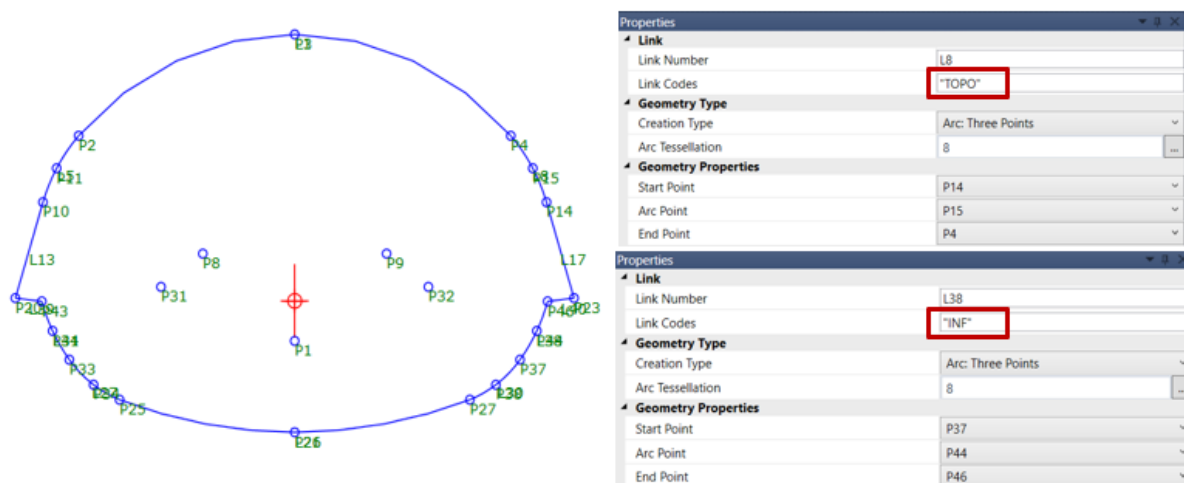


Figura 41 - Contorno externo da seção do túnel com parte superior e inferior

Os outros elementos da seção, como enchimento no interior do túnel, lajes e trilhos, também podem ser modelados pela ferramenta através da colocação da coordenada de cada ponto, ligação entre eles e definição de superfícies, como mostra a Figura 42.

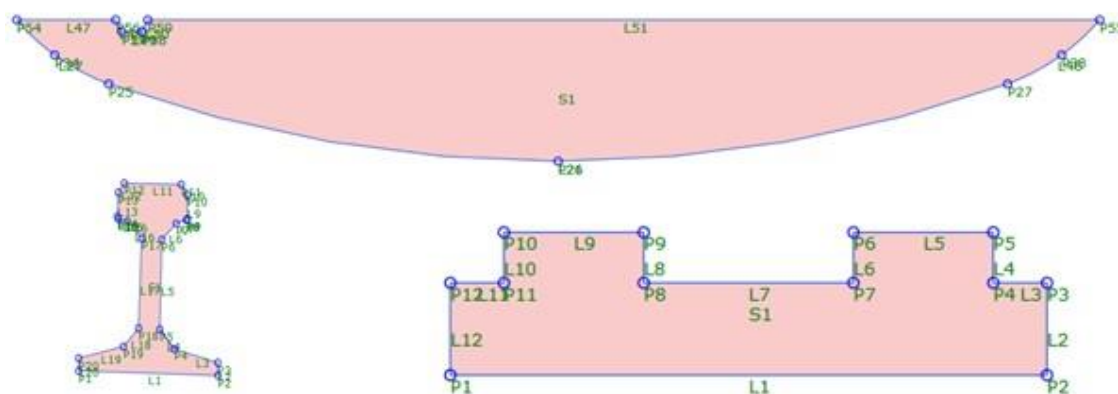


Figura 42 – Seções dos trilhos, dormentes e enchimento de argamassa

Com as seções definidas e importadas ao Civil 3D, foi possível caracterizar a seção do túnel e foi criado o *corredor*, que leva em consideração todos os elementos apresentados anteriormente: superfície, traçado em planta e elevação e seção do túnel. Ele é construído por meio de uma repetição da seção a cada certa distância indicada ao longo do eixo definido pelo traçado em planta e elevação. Assim, as seções são posteriormente ligadas por meio de superfícies.

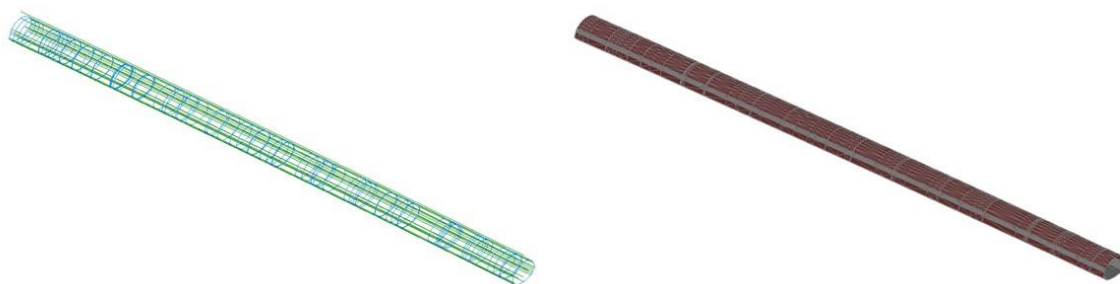


Figura 43 – Corredor e superfícies criadas

Como meios de visualização e interpretação da superfície gerada, o programa fornece algumas ferramentas. A primeira é a inserção da superfície gerada no alinhamento em planta e em perfil, o que facilita a geração de plantas construtivas para projetos, como mostram a Figura 44 e a Figura 45. Outra forma de visualização é a extração de seções de interesse ao longo do eixo do túnel em certos espaçamentos, sendo ilustrada inserida no maciço, como na Figura 46.

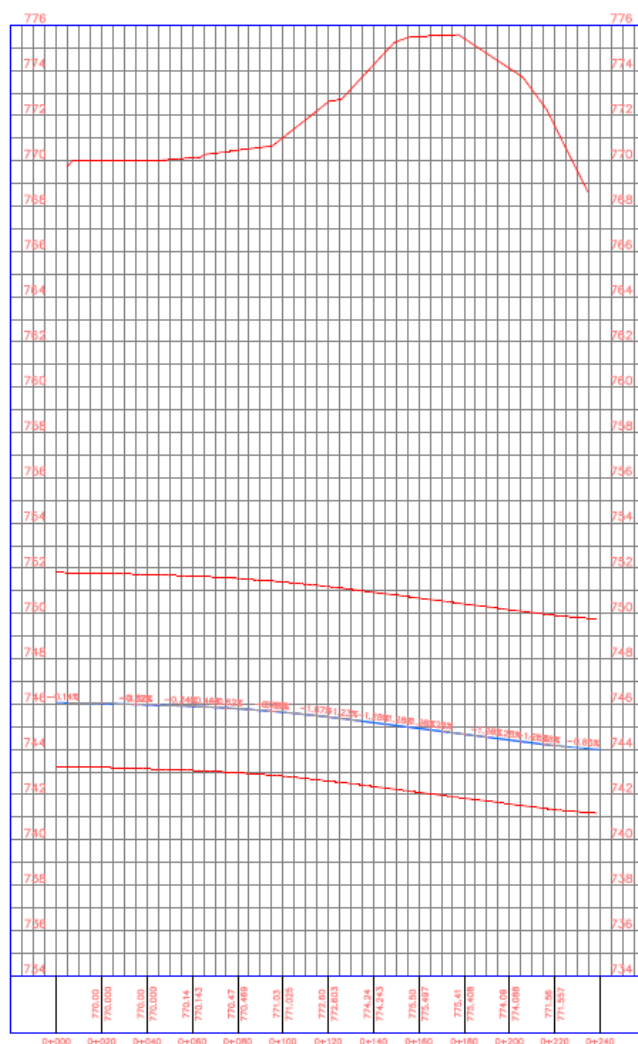


Figura 44 - Visualização da superfície em perfil

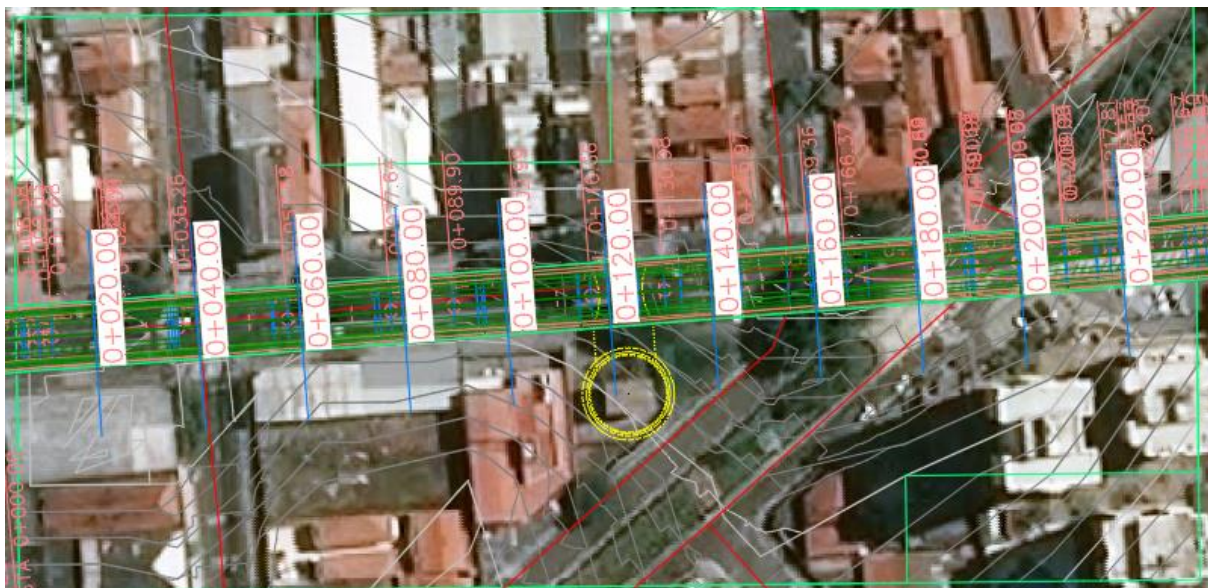


Figura 45 - Visualização da superfície em planta

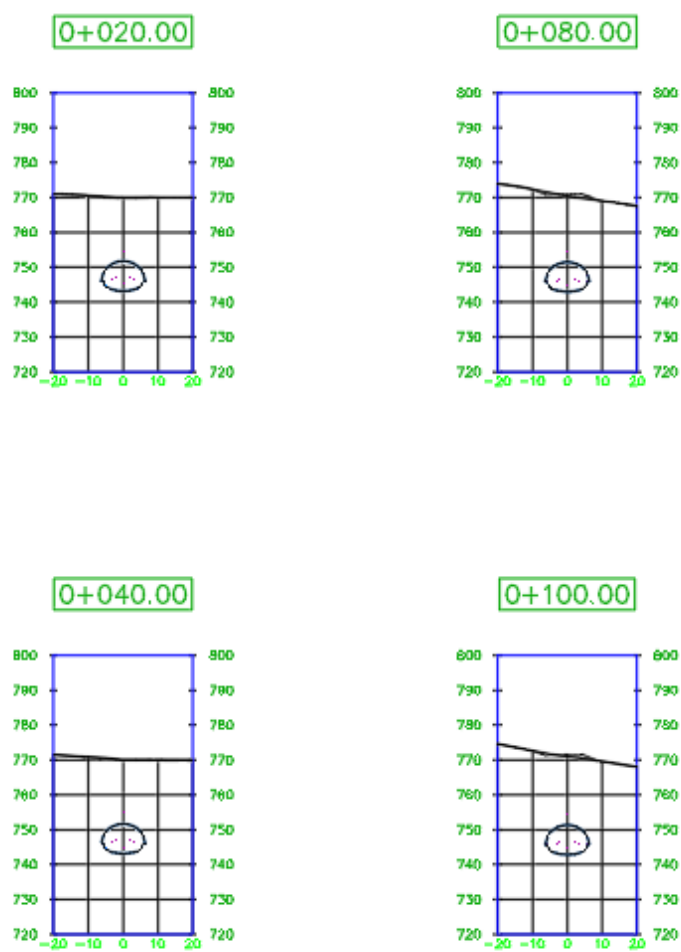


Figura 46 – Visualização de seções de interesse

Por fim, foi gerado um volume do túnel a partir das superfícies das seções no *corredor*. Visando a posterior representação das fases de construção e cronograma, dividiu-se o elemento em 12 corredores, cada um com 20 metros de comprimento. A inserção de materiais também pode ser feita no programa e permite discretizar cada parte em que o elemento foi subdividido com um material. Também foi possível gerar um volume que representa o maciço a partir da superfície do terreno.

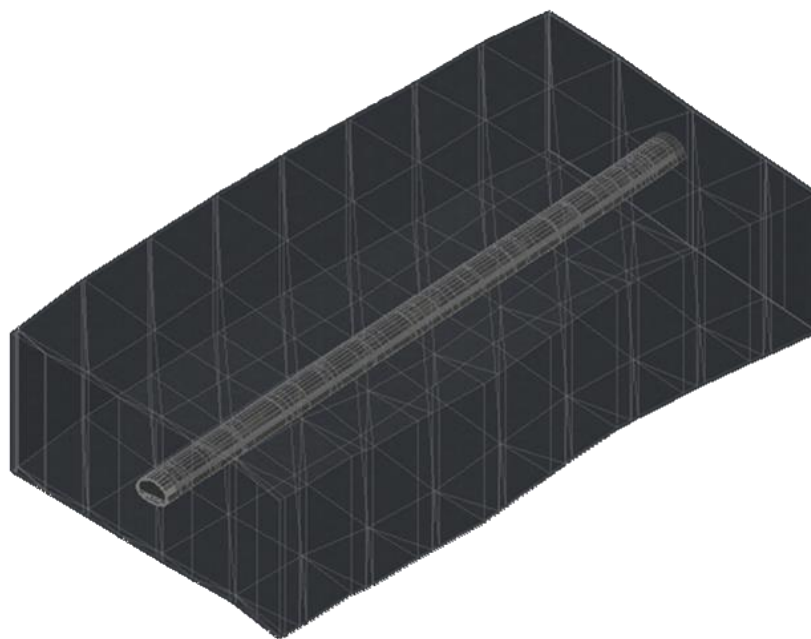


Figura 47 - Vista do modelo de maciço e túnel no Civil 3D

4.2.3.2) Modelagem no ambiente Dynamo

Paralelamente à modelagem originalmente planejada no software Civil 3D, foi explorado o ambiente *Dynamo*, da ferramenta Revit, para modelagem geométrica do túnel do projeto. Conforme apresentado na sessão de revisão bibliográfica por Tagliari (2018), o ambiente é de grande auxílio na modelagem de elementos de geometria mais complexa e que é de difícil concepção com as ferramentas usuais para edifícios. Além disso, foi realizada uma reunião bastante esclarecedora com o engenheiro José Soares, da empresa de projetos de engenharia Consultores BIM, na qual foram apresentadas as principais potencialidades da ferramenta. Dessa maneira, imaginou-se ser possível realizar a mesma modelagem de túnel prevista para o Civil 3D, no ambiente Dynamo.

A ferramenta é acessada com o download de uma extensão, que é diretamente reconhecida pelo programa Revit. A ferramenta pode tanto ser acessada no ambiente comum de projeto ou no ambiente de uma família. Assim, a modelagem é feita através de um ambiente de programação,

em que elementos com entradas e saídas são colocados no ambiente, podendo conectar-se com outros, formando uma lógica de programação, responsável pela criação de uma geometria diretamente no ambiente do Revit.

Para a modelagem do túnel utilizando o ambiente, primeiramente extraíram-se as coordenadas dos pontos do eixo do túnel do projeto original e inseriu-se em uma planilha Excel. Assim, utilizou-se uma combinação de elementos de importação de dados do Dynamo, que permitem a leitura e assimilação das coordenadas pelo programa, como mostra a Figura 48.

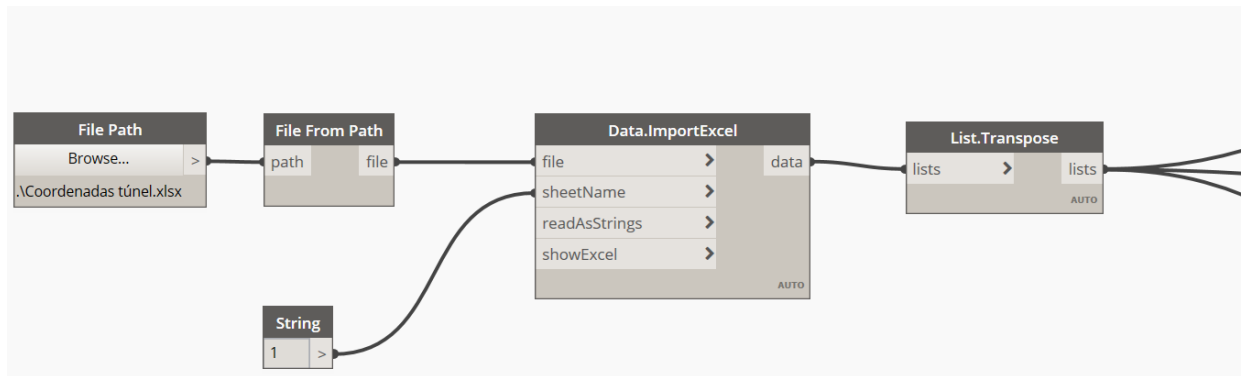


Figura 48 - Importação de coordenadas no Dynamo

Após esse passo, as coordenadas do Excel foram entendidas como pontos X, Y, Z nas coordenadas do Dynamo, através da criação de listas de coordenadas, com a seguinte combinação de elementos.

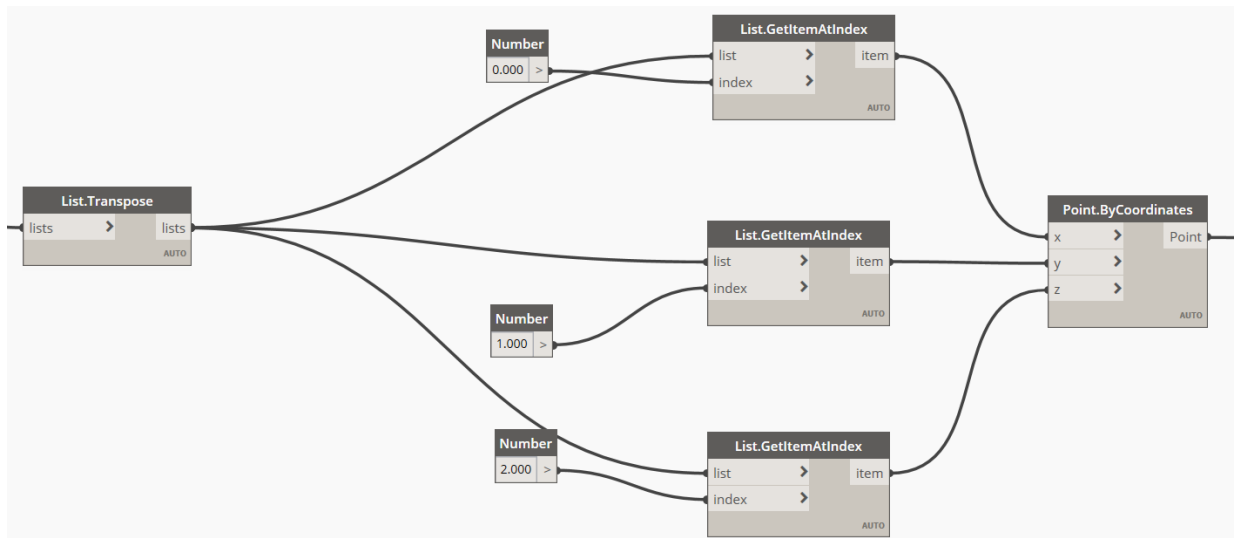


Figura 49 - Assimilação das coordenadas

Finalmente, as coordenadas no programa foram conectadas por meio de uma *Spline*, através do elemento *NurbsCurve* e posteriormente transformadas em uma curva física no Revit.

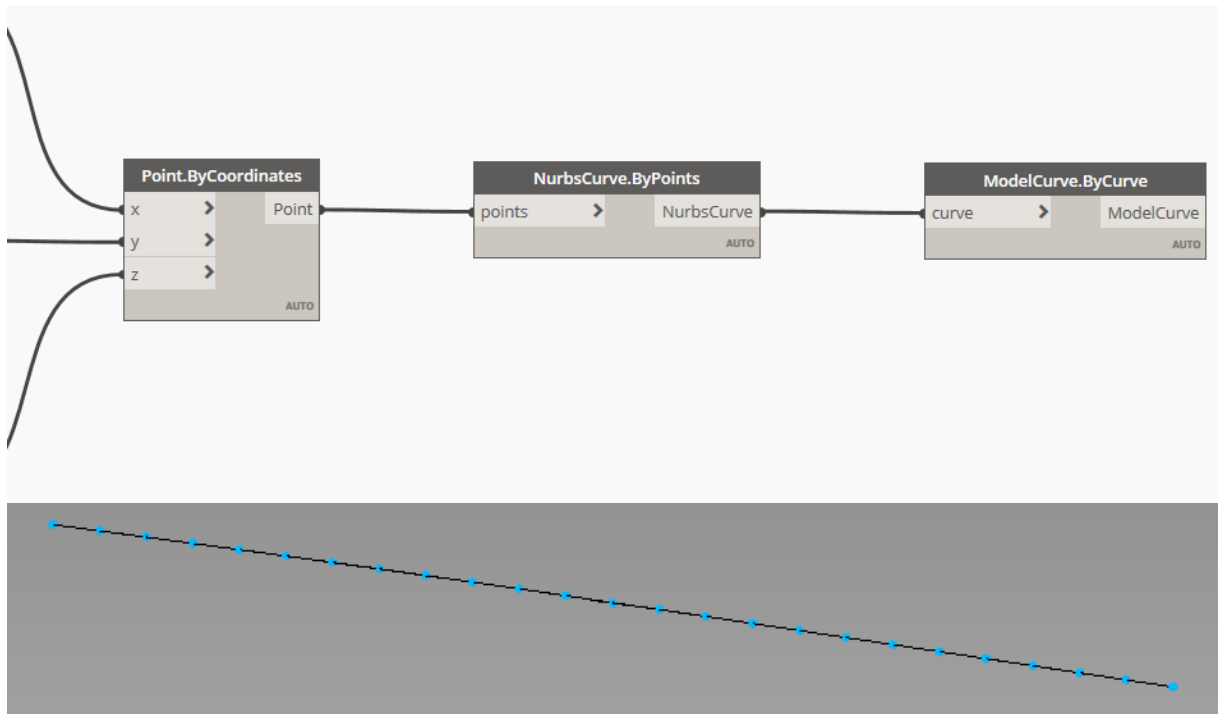


Figura 50 - Geração da curva no Revit

Com o eixo modelado, basta trabalhar novamente no ambiente do Revit para criar a seção do túnel ao longo do eixo. Assim, a curva foi subdividida em diversos outros pontos e foi inserido o contorno externo da seção de projeto como uma família em uma das extremidades da curva. Então, utilizou-se um comando de repetição para inserir a seção analogamente em cada ponto e criou-se uma extrusão de forma sólida. Para criar o vazio do interior, foi realizado o mesmo procedimento com o contorno interno da seção e criado uma extrusão de forma vazia. Dessa maneira, obteve-se o túnel mostrado na Figura 51.

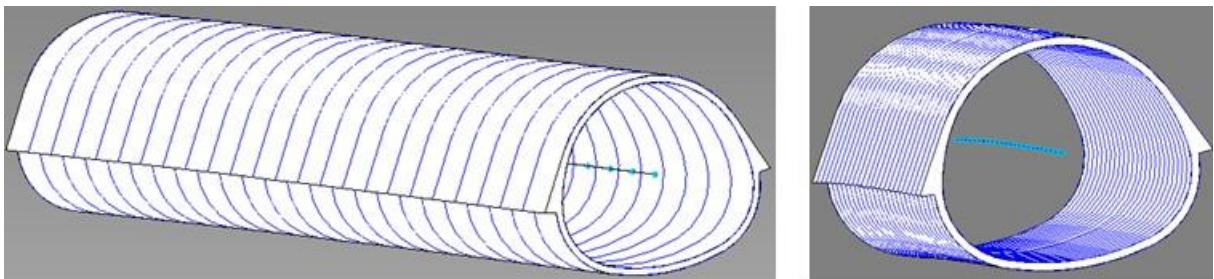


Figura 51 - Túnel finalizado no Revit

A conclusão dessa modelagem é que o túnel do projeto poderia também ser realizado com exatamente as mesmas dimensões numa família com o ambiente Dynamo do Revit. No entanto, por ser um programa mais utilizado no mercado e buscando-se verificar eventuais limitações na compatibilização dos modelos, optou-se por seguir o planejamento original e dar continuidade ao projeto com o modelo feito pela ferramenta Civil 3D.

4.4) Compatibilização de modelos

Tendo sido realizada a modelagem dos diversos elementos que compõem a construção, buscou-se nesta sessão explorar as ferramentas de compatibilização dos diversos modelos, mostrando possíveis limitações na interoperabilidade entre elas.

4.4.1) Integração Revit e Civil 3D

Como primeira alternativa para a integração dos modelos de poço de ventilação e túnel de ligação, concebidos no Revit, e no Civil 3D, respectivamente, optou-se pela exportação do túnel do Civil 3D ao Revit.

Neste processo já foi possível perceber algumas dificuldades de integração entre os dois softwares. Não foi possível realizar a exportação com a seção criada diretamente no Civil 3D, já que as superfícies criadas eram consideradas parte do corpo do túnel que sofreu extrusão (*corredor*). Já a outra seção, modelada através da ferramenta *Subassembly Composer*, permitiu a criação de elementos de volume, que puderam ser aproveitados no Revit mediante a criação de uma nova família. O programa entende os elementos como volumes e permite a definição do tipo de material e extração de quantitativos.

O próximo passo foi a junção dos dois modelos num mesmo arquivo, colocando a família do túnel no projeto do poço de ventilação. Neste procedimento houve um problema de compatibilização de coordenadas, já que a exportação do volume de túnel a uma família do Revit não permite a inserção em uma determinada coordenada. O mesmo ocorreu na inserção da família criada no projeto onde foi modelado o poço de ventilação. Para solucionar esse problema, foi necessário a colocação manual do túnel através da locação de um ponto dele em relação a distância a algum ponto conhecido, que no caso foi o centro da circunferência das paredes externas do poço na superfície do terreno. O modelo final obtido no Revit é mostrado na Figura 52.

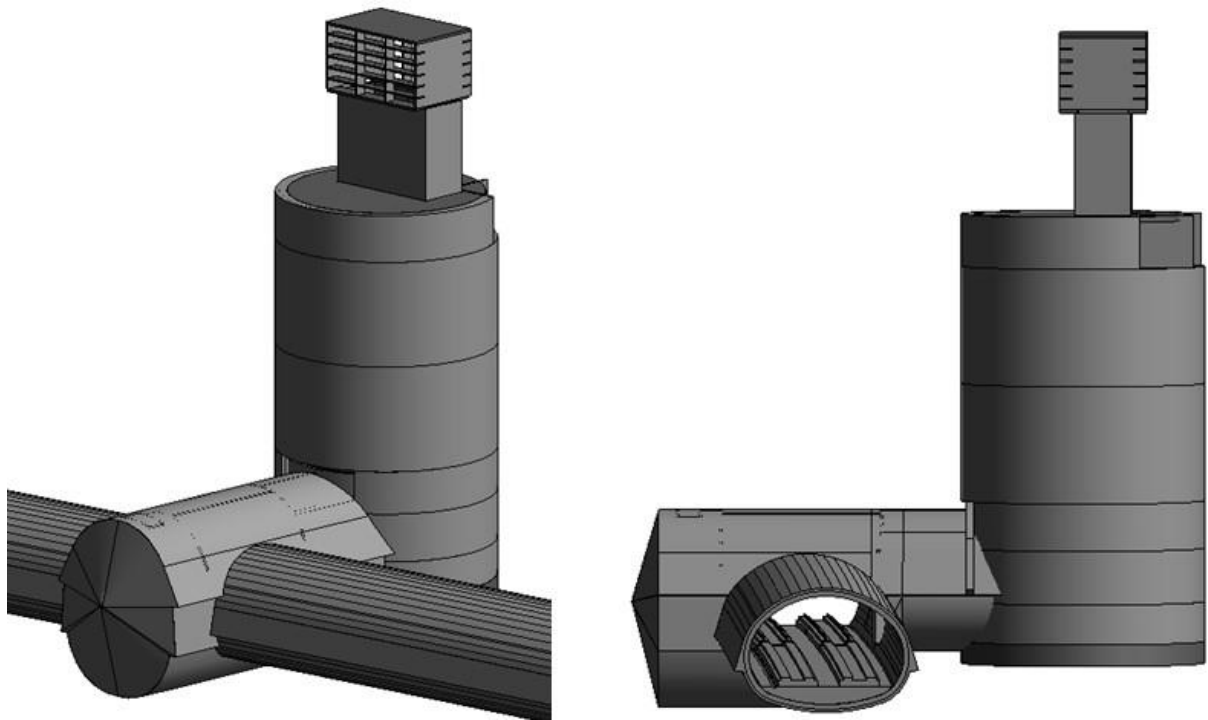


Figura 52 - Modelo integrado com poço e túnel no Revit

Vale ressaltar ainda algumas peculiaridades para a compatibilização final dos modelos no Revit. Ao se inserir o túnel fazendo uma intersecção com o túnel de ligação, os elementos ficam sobrepostos. Para isso, é preciso utilizar comandos de corte de duas em duas famílias, sendo uma delas delimitada na fronteira exata de contato com a outra. Além disso, foi preciso excluir parte da parede do túnel de ligação, que estava justamente na região central da seção do túnel. Isso é facilitado também através da ferramenta de corte, já que subdivide a família em partes, sendo possível excluir uma delas.

4.4.2) Ferramenta Navisworks

Como alternativa à compatibilização no Revit, foram buscadas outras ferramentas que auxiliem na otimização do processo. O software Autodesk Navisworks é um programa de análise de projetos no qual é possível combinar diferentes projetos e verificar interferências. Durante o seu uso, além da capacidade de combinar os modelos, identificaram-se outras duas funções interessantes: o auxílio no faseamento da obra e na extração de quantitativos, que serão abordadas na próxima sessão.

Os arquivos do Revit e Civil 3D foram então exportados ao Navisworks, cada um com suas próprias coordenadas. Dessa maneira, houve uma incompatibilidade de coordenadas, sendo necessário um ajuste para a locação exata dos modelos.

No caso do Revit há três tipos de pontos de origem: *Project Base Point*, que é o ponto de origem interno da estrutura, em que ajusta-se o ângulo da estrutura com o norte verdadeiro; *Survey Point Internal*, que é ponto de coordenadas globais que indica o norte verdadeiro; e *Internal Origin*, que é um ponto base para importação e exportação de arquivos. Assim, a compatibilização das coordenadas se deu através da alteração do ângulo do *Project Base Point*, que alterou também o *Survey Point Internal*. Este, então, foi movido para o centro da circunferência do poço, conforme mostra a Figura 53.

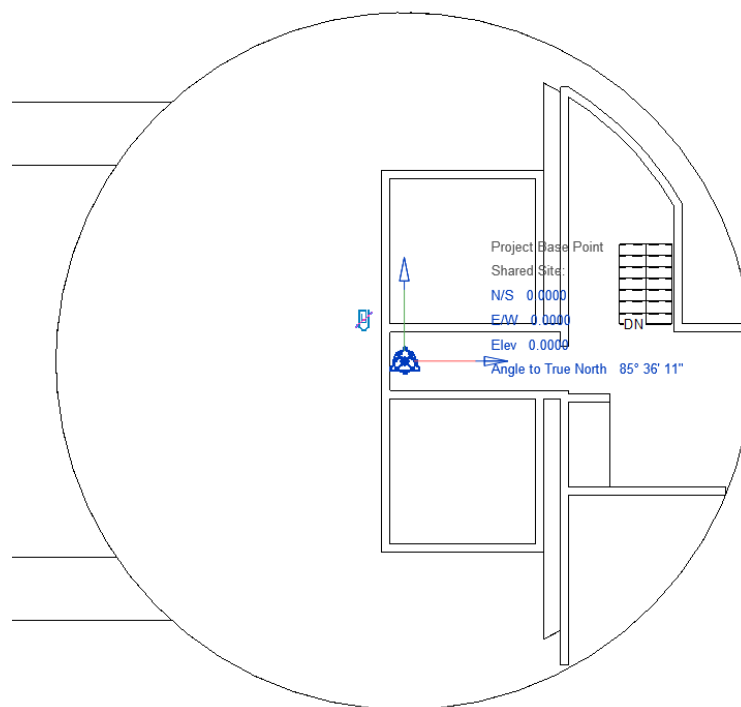


Figura 53 - Vista em planta do poço no Revit com a configuração do Project Base Point

No caso do túnel modelado no Civil 3D procurou-se o mesmo ponto de origem do Revit e locou-se o túnel em relação a esse ponto. Uma vez compatibilizadas as coordenadas, os modelos foram exportados ao software Navisworks.

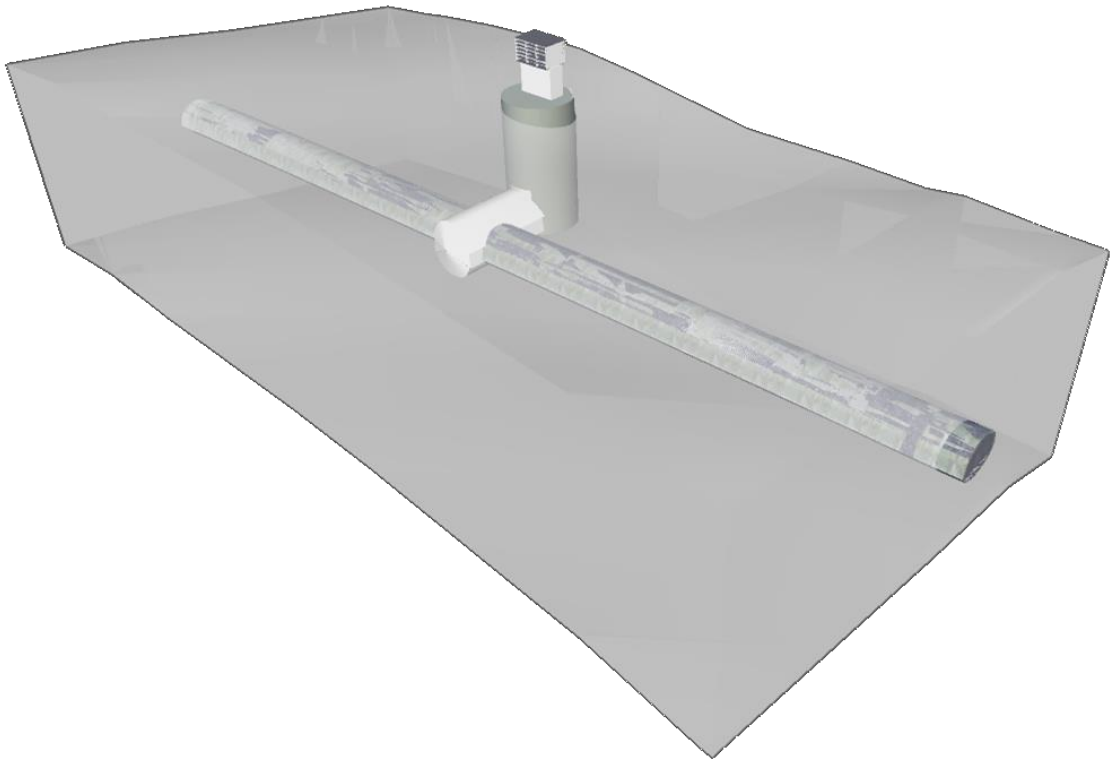


Figura 54 - Modelo integrado no Navisworks, com poço, túnel e maciço

Comprovou-se que após salvar o arquivo no Navisworks, qualquer alteração feita nos modelos do Civil 3D ou Revit era automaticamente assimilada pelo modelo no programa. Essa capacidade é um ponto muito interessante, já que reflete uma boa interoperabilidade entre os programas, permitindo que diversos projetistas trabalhem simultaneamente nos diversos componentes que integram o modelo final. A esse tipo de configuração no Navisworks, dá-se o nome de modelo federado.

4.5) Potencialidades do modelo integrado BIM

Além da já mencionada modelagem da geometria do projeto, foram identificadas e exploradas algumas potencialidades adicionais interessantes através das ferramentas utilizadas. São mostradas na sequência algumas características da modelagem 4D e da extração de quantitativos através do modelo gerado.

4.5.1) Modelagem 4D

A modelagem 4D trata da realização de um modelo que auxilie no planejamento e controle da obra. Assim, as fases da construção do trecho do túnel puderam ser representadas, assim como o do poço de ventilação. Devida à grande complexidade e demanda computacional da representação de todas as etapas de construção no trecho de túnel, buscou-se simplificar o processo através de uma quantidade menor de fases. Nesse contexto, tomando como referência o trabalho de Dallabrida (2017), que realiza uma modelagem semelhante de túnel por fases, tomou-se como comprimento de controle trechos de 20 metros, totalizando 12 trechos. Essa divisão em fases foi melhor explicada anteriormente na sessão da modelagem no Civil 3D.

Para o planejamento da obra utilizou-se o software Microsoft Project, no qual é possível realizar uma exportação de dados ao Navisworks. Por não dispor de um cronograma de atividades e nem das durações de cada atividade, estas foram estimadas, visando apenas ilustrar a potencialidade da ferramenta. Assim, simulou-se o início da obra no início de 2020 e foi considerado um avanço de 1 metro por dia, totalizando a escavação do trecho em 200 dias. Tomou-se como referência, portanto, ciclos de 20 dias para a escavação e concretagem do revestimento primário e do arco invertido. Dessa maneira, foram admitidos 5 dias para cada uma das atividades. A Figura 55 ilustra a inserção de datas do ciclo no programa e a repetição do ciclo ao longo do cronograma da obra.

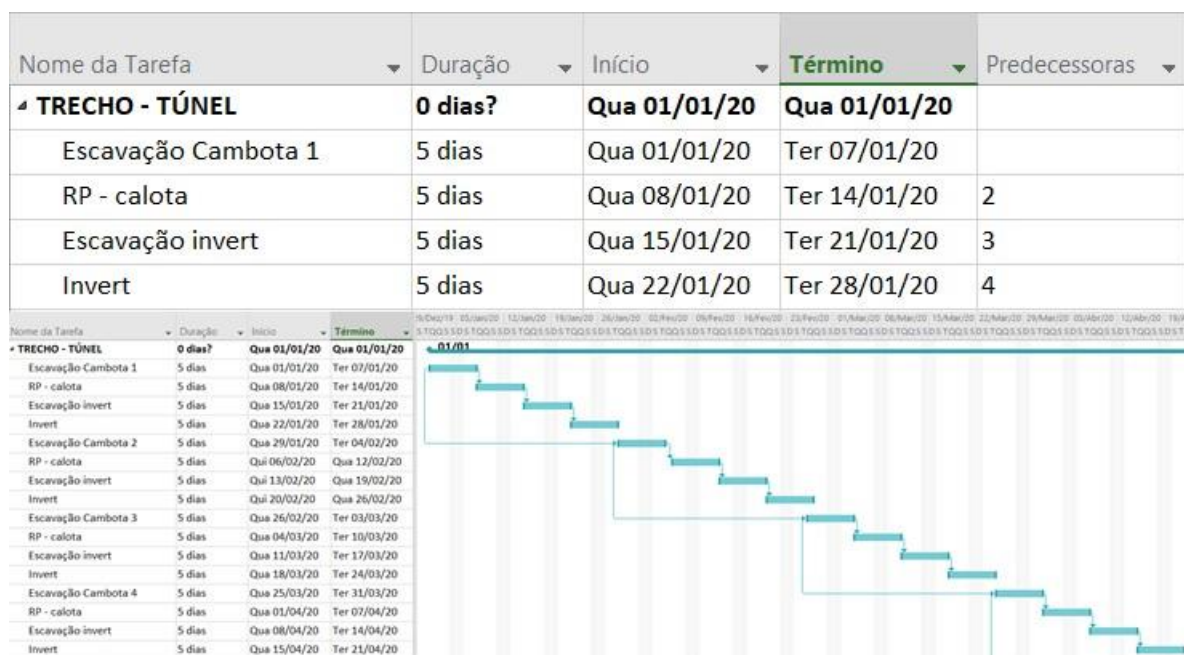


Figura 55 - Datas de início e término de cada trecho e cronograma completo

Para utilizar o cronograma gerado no Navisworks, foi realizada a importação do arquivo e utilizou-se a função de Linha do Tempo. Assim, também foi comprovada a funcionalidade de alteração automática no Navisworks ao se realizar uma alteração no MS Project.

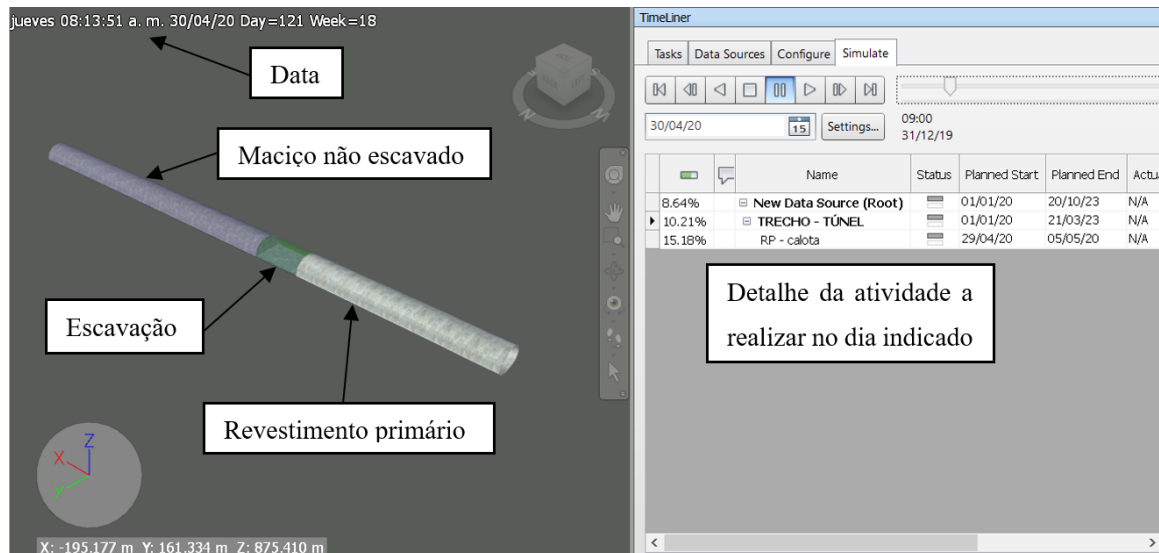


Figura 56 - Construção do túnel no Navisworks utilizando o cronograma de projeto

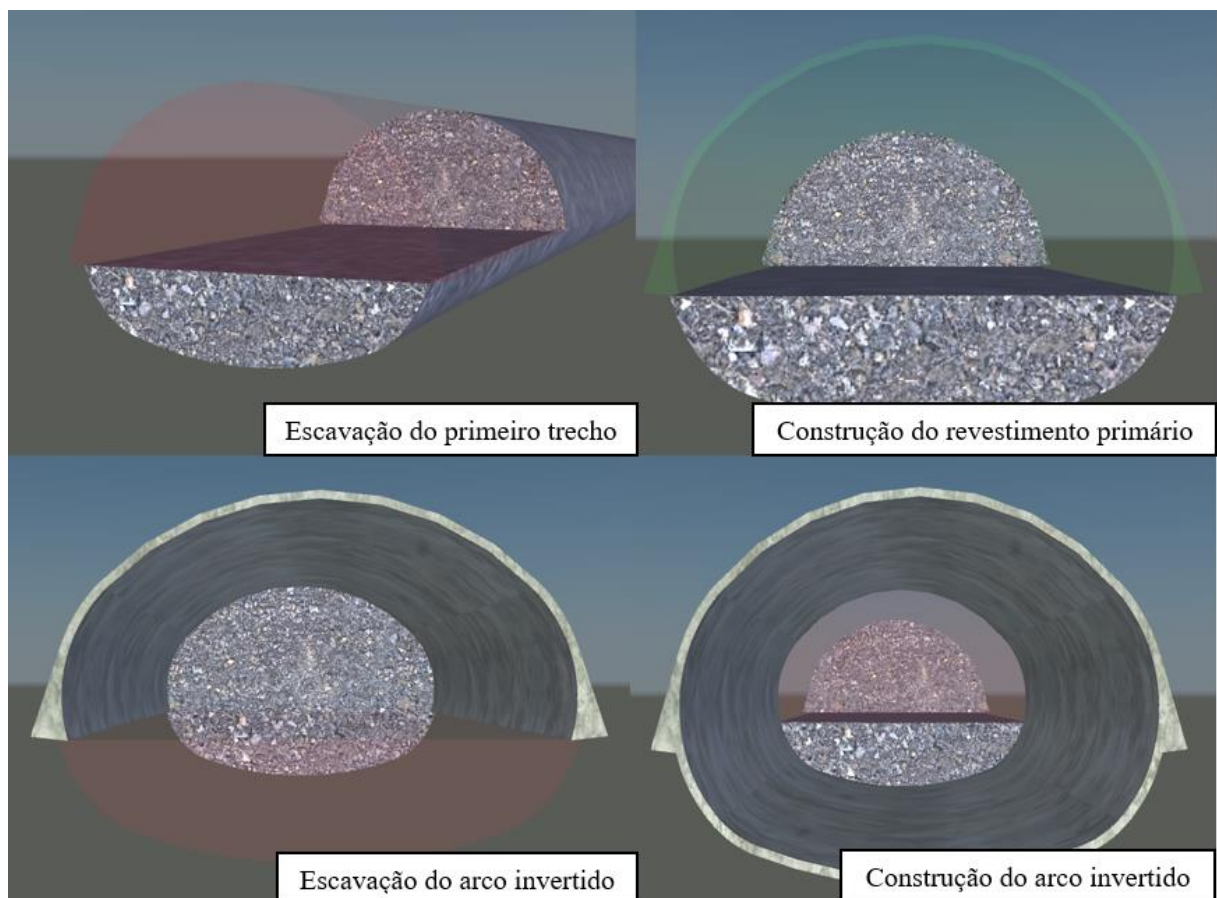


Figura 57 - Simulação de atividades construtivas no trecho no Navisworks

Concluída a construção do revestimento primário dos 12 trechos do túnel, foi realizada a construção do revestimento secundário e depois dos elementos internos considerados: enchimento de argamassa, lajes e trilhos.

Para construção do revestimento secundário considerou-se 10 dias por cada trecho de 20 m e uma restrição de construção sequencial na qual o início da construção de algum trecho do secundário só pode ser realizado com a finalização do secundário do trecho anterior. Os elementos internos também seguem a restrição. Adotou-se 10 dias para o enchimento e laje da via permanente como duração para essas atividades no trecho e mais 5 dias para a instalação dos trilhos.

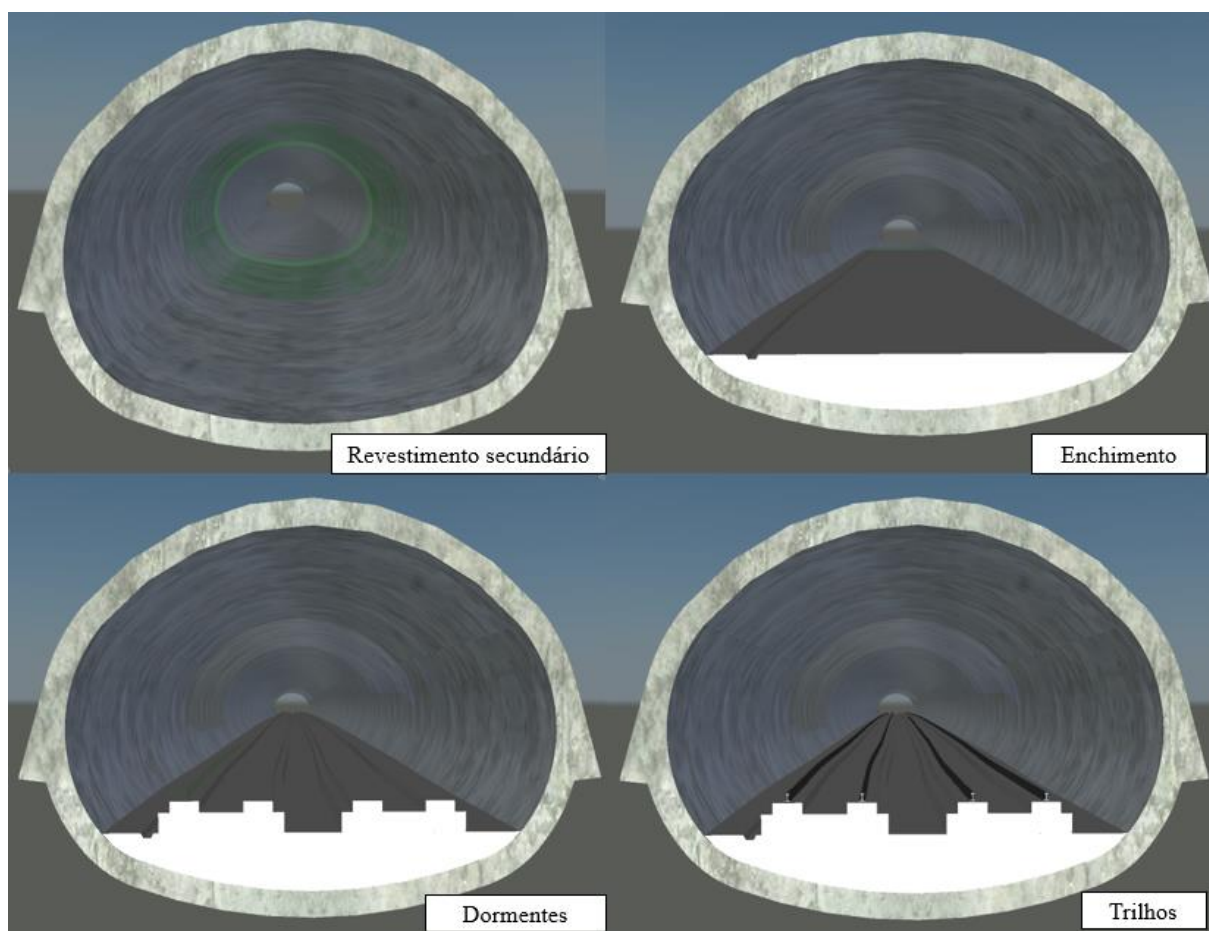


Figura 58 - Faseamento de construção dos elementos internos do túnel

Para o poço de ventilação, procurou-se representar o método construtivo para este tipo de estrutura, que consiste numa escavação por camadas onde cada camada possui um revestimento primário (ou provisório). Quando este chega à cota desejada é construída a laje de fundo e inicia-se o revestimento secundário (ou permanente) e outros elementos estruturais internos. Esse processo é realizado em cada nível até a chegada na superfície.

A modelagem no Navisworks seguiu esse processo. A construção do revestimento provisório foi feita de cima para baixo, dividindo as camadas nos níveis do poço de ventilação. Posteriormente são construídos os elementos internos de baixo para cima, como o revestimento permanente, as paredes internas, escadas e laje. Em paralelo, após a construção do revestimento provisório, iniciou-se a construção do túnel de ligação e de seus elementos internos. A programação da construção foi planejada da mesma maneira que as fases do poço. Foi considerada uma semana para a escavação e construção do revestimento primário, uma semana para os elementos internos de cada nível e o túnel de ligação em 14 dias, como mostra a Figura 59. A Figura 60 e a Figura 61 ilustram a simulação da construção no programa Navisworks.

Nome da Tarefa ▼	Duração ▼	Início ▼	Término ▼	Predecessoras ▼
POÇO DE VENTILAÇÃO	143 dias	Qua 05/04/23	Sex 20/10/23	
Revestimento Secundário 1	7 dias	Qua 05/04/23	Qui 13/04/23	157TI+10 dias
Revestimento Secundário 2	7 dias	Sex 14/04/23	Seg 24/04/23	159
Revestimento Secundário 3	7 dias	Ter 25/04/23	Qua 03/05/23	160
Revestimento Secundário 4	7 dias	Qui 20/04/23	Sex 28/04/23	161
Revestimento Secundário 4-2	7 dias	Qui 04/05/23	Sex 12/05/23	161
Revestimento Secundário 5	7 dias	Seg 15/05/23	Ter 23/05/23	163
Revestimento Secundário 6	7 dias	Qua 24/05/23	Qui 01/06/23	164
Revestimento Secundário 6-2	7 dias	Qua 24/05/23	Qui 01/06/23	164
Laje inferior e paredes 1	7 dias	Sex 02/06/23	Seg 12/06/23	166
Laje inferior e paredes 2	7 dias	Ter 13/06/23	Qua 21/06/23	167
Laje inferior e paredes 3	7 dias	Qui 22/06/23	Sex 30/06/23	168
Laje inferior e paredes 4	7 dias	Seg 03/07/23	Ter 11/07/23	169
Laje inferior e paredes 5	7 dias	Qua 12/07/23	Qui 20/07/23	170
Laje inferior e paredes 6	7 dias	Sex 21/07/23	Seg 31/07/23	171
Ext. 1	5 dias	Ter 01/08/23	Seg 07/08/23	172
Ext. 2	5 dias	Ter 08/08/23	Seg 14/08/23	173
Ext. 3	5 dias	Ter 15/08/23	Seg 21/08/23	174
Ext. 4	5 dias	Ter 22/08/23	Seg 28/08/23	175
Ext. 5	5 dias	Ter 29/08/23	Seg 04/09/23	176
Ext. 6	5 dias	Ter 05/09/23	Seg 11/09/23	177
Ext. 7	5 dias	Ter 12/09/23	Seg 18/09/23	178
Ext. 8	5 dias	Ter 19/09/23	Seg 25/09/23	179
Ext. 9	5 dias	Ter 26/09/23	Seg 02/10/23	180
Túnel de ligação	14 dias	Ter 03/10/23	Sex 20/10/23	166

Figura 59 - Programação da construção do poço de ventilação no Microsoft Project

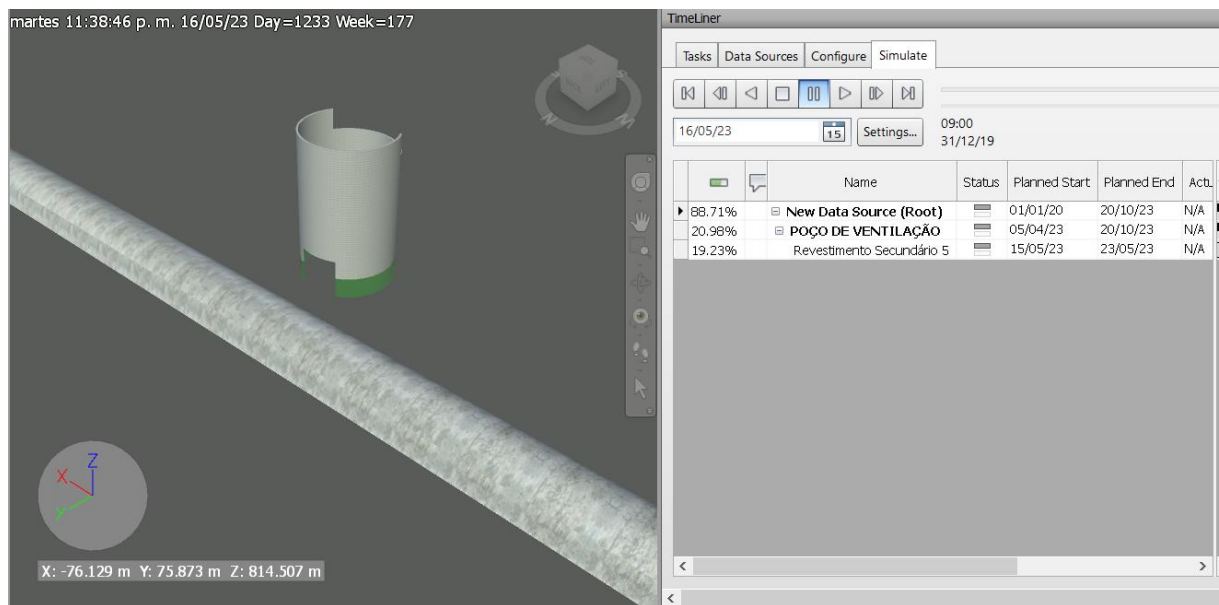


Figura 60 - Construção do poço no Navisworks utilizando o cronograma de projeto

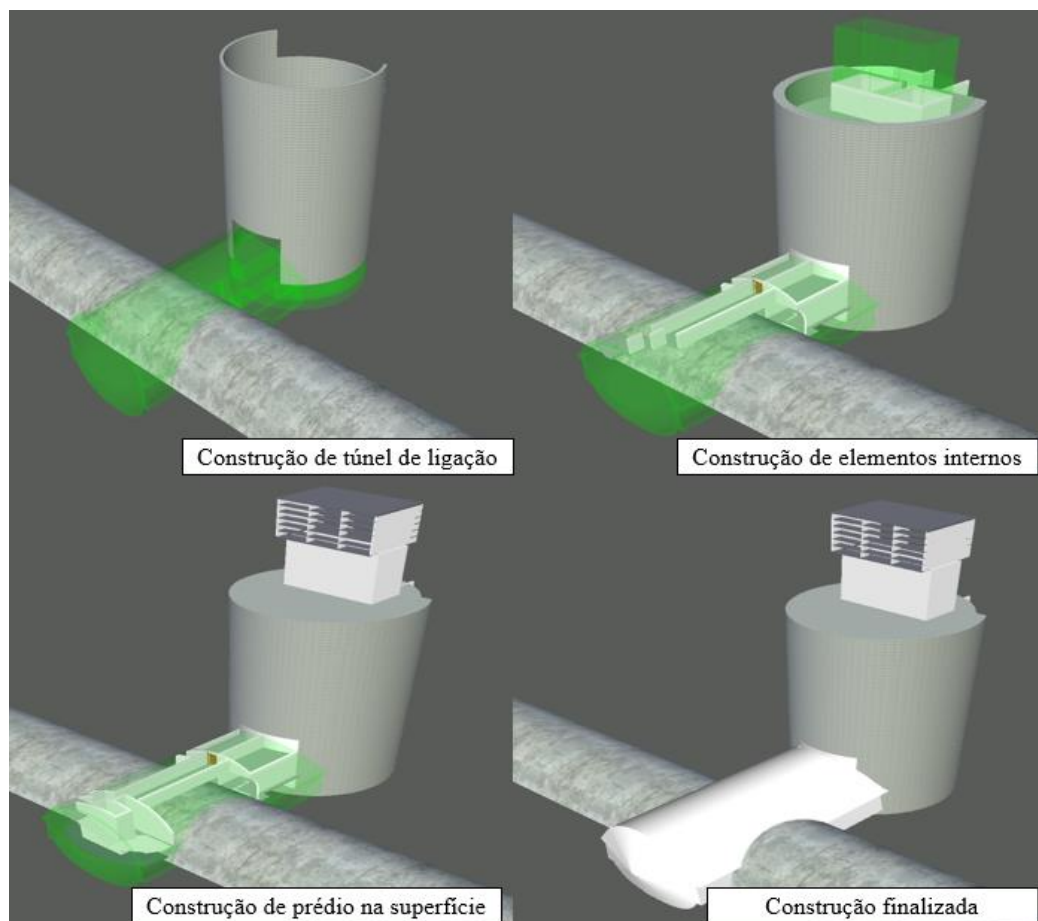


Figura 61 - Fases da construção do poço de ventilação

4.5.2) Extração de quantitativos

Com relação à extração de quantitativos, foram avaliadas as ferramentas do programa Civil 3D e Navisworks. No modelo realizado no Civil 3D foi possível extrair o volume projetado de escavação, calculado sobre condições geométricas ideais, sem considerar as reais complexidades do processo. Para o cálculo, foi indicada a superfície inferior e superior do túnel. O programa calcula a área acima das linhas de superfície, sendo o volume de cada trecho obtido pela diferença entre elas, multiplicado pelo comprimento do eixo do túnel no trecho. O programa também permite inserir outros critérios de cálculo de volumes. O volume total de escavação dos 220 metros do túnel foi de 16283,87 m³. Também é possível visualizar essas informações em cada seção da estrutura do túnel. A Figura 62 e a Figura 63 mostram a informação de escavação na seção transversal e no perfil do túnel.

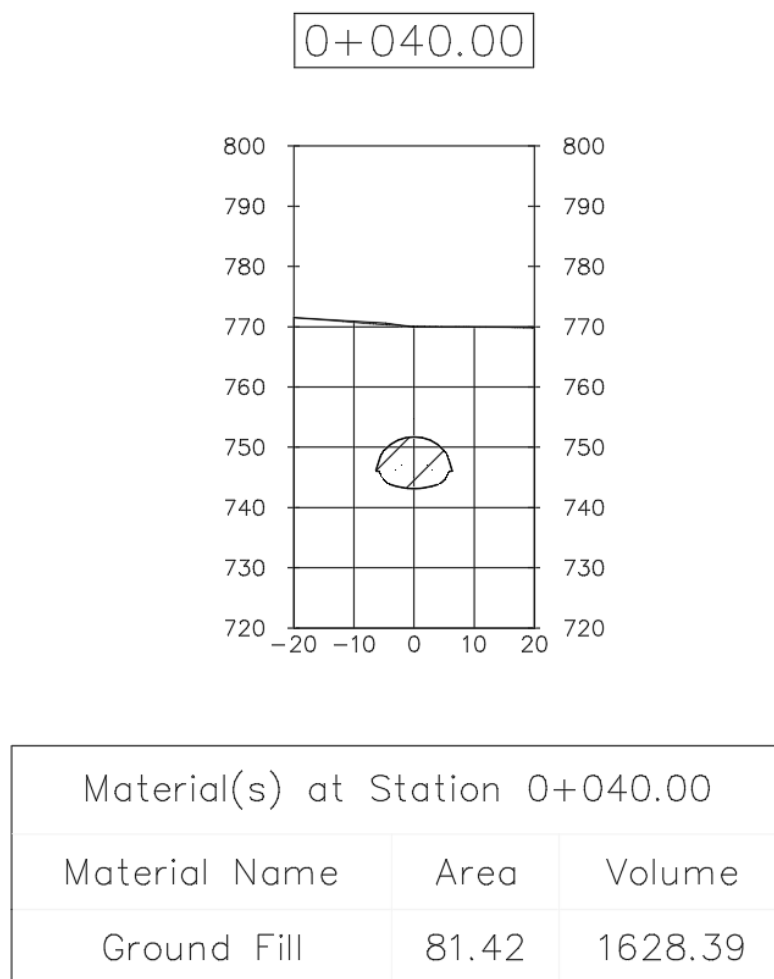


Figura 62 - Informação de área e volume de escavação numa seção

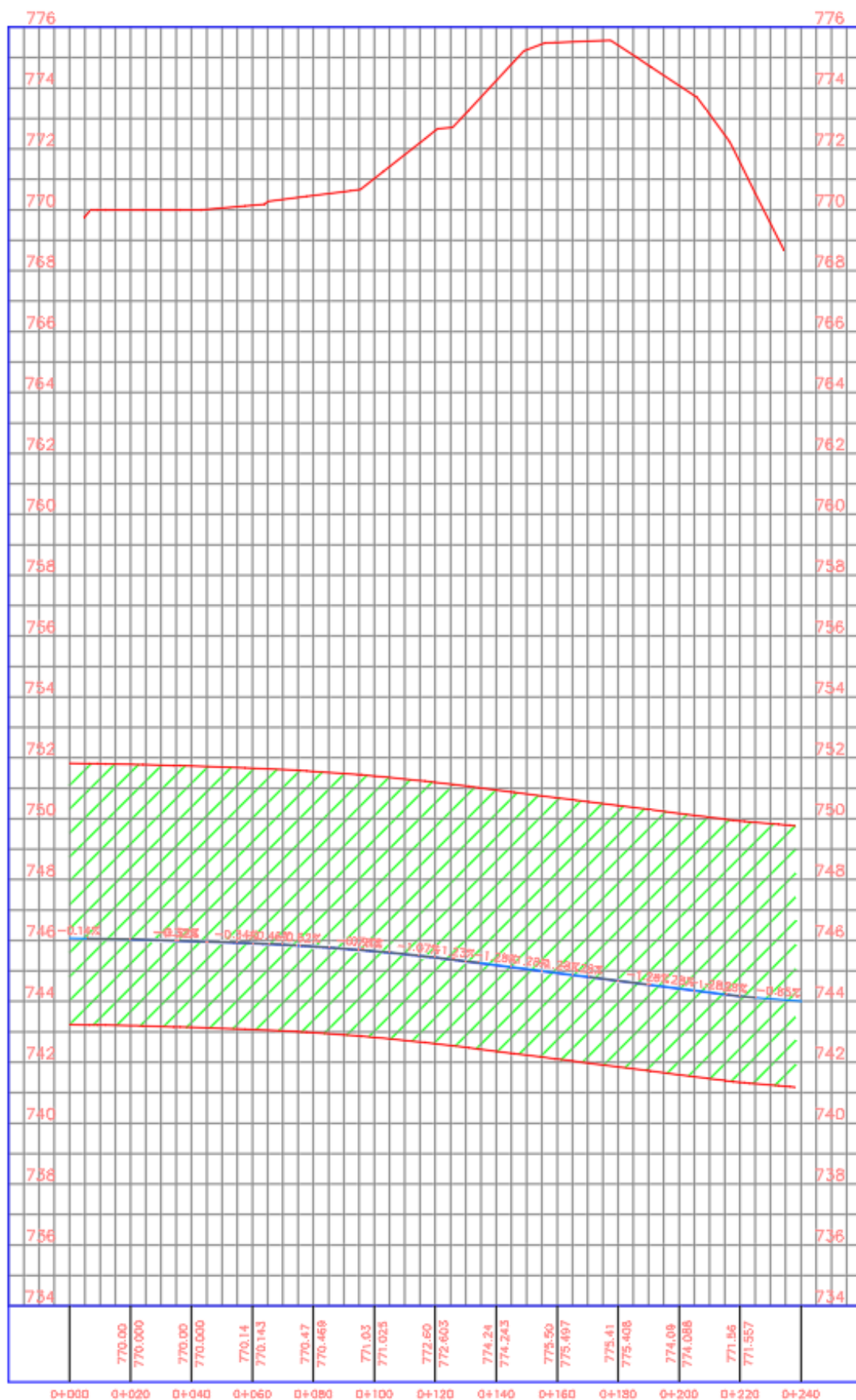


Figura 63 - Seção de escavação indicada no perfil do túnel

Já no modelo exportado ao Navisworks, também foi possível extrair os quantitativos de volume de concreto do poço e do túnel. O programa permite a visualização do volume e dimensões detalhadas de cada elemento modelado, como lajes e paredes, e a exportação desses valores para um arquivo em Excel. No entanto, os elementos que constituem o túnel não tiveram suas quantificações discretizadas mas sim como uma estrutura única, já que o Revit assimilou a estrutura toda como um único objeto. Para obterem-se os volumes detalhados de cada elemento, os revestimentos, enchimento, lajes e trilhos, foi preciso exportar os elementos separadamente ao Revit, para que sejam inseridos em diferentes famílias. A Figura 64 mostra os elementos quantificados separados por cores e uma tabela dos volumes obtidos.

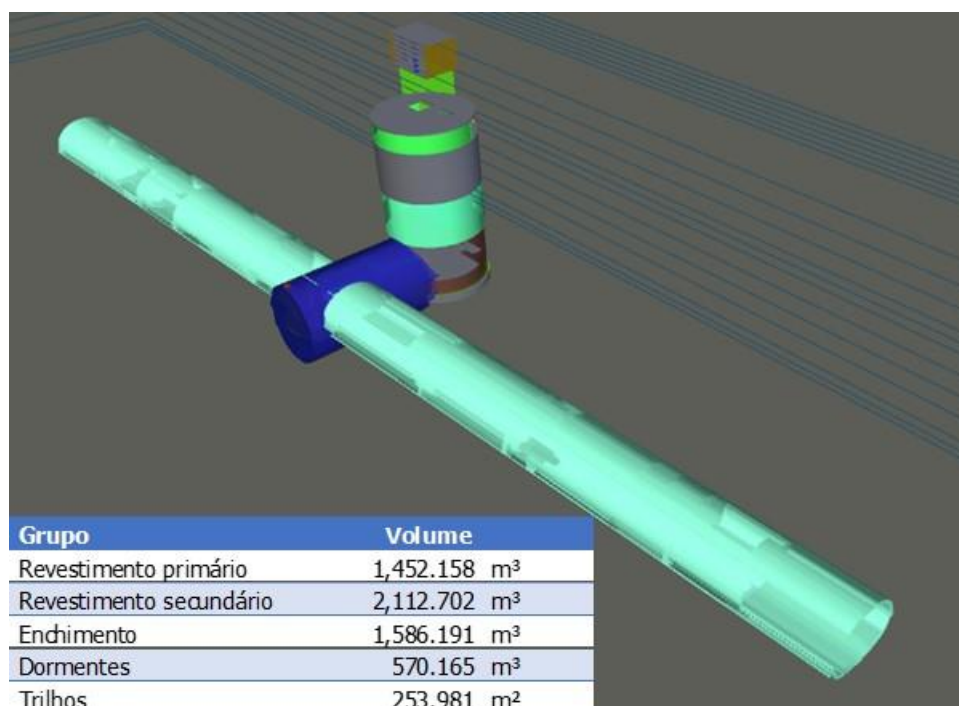


Figura 64 - Elementos quantificados no Navisworks e volumes dos elementos do túnel

4.6) Exportação para análise estrutural

4.6.1) Análise da estrutura do poço de ventilação

Optou-se por realizar uma análise estrutural com a ferramenta Autodesk Robot Structural Analysis. Como esperado, comprovou-se a maior facilidade no processo de análise em comparação ao modelo de túnel visto na seção 3.3). Para exploração da interoperabilidade da ferramenta, foi feito um modelo simplificado do poço de ventilação mantendo o revestimento secundário, as lajes sem os furos e algumas paredes, como se observa na Figura 65.

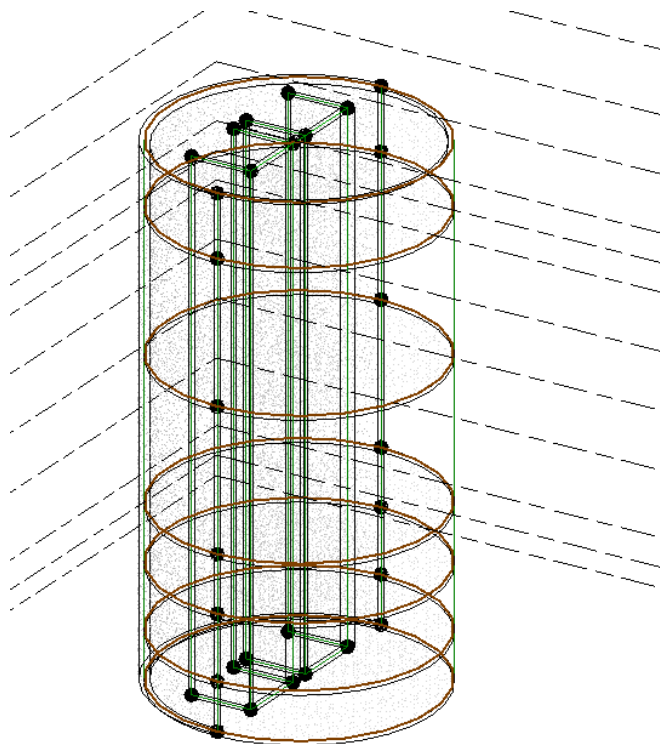


Figura 65 - Modelo simplificado do poço de ventilação no Robot

Para realização da análise é necessário que os elementos importados do Revit tenham características estruturais e sejam verificadas suas conexões com os demais elementos. Também é possível o reconhecimento pelo programa de condições de contorno e forças colocadas no Revit. O processo de exportação é direto, havendo no Revit uma sessão com a opção de exportação para o Robot, o que facilita o intercâmbio de dados entre os dois softwares. Foi observado também que o Robot reconhece as propriedades do material previamente inserido no Revit. A malha de elementos finitos, o carregamento aplicado e os resultados obtidos são expostos na Figura 66.

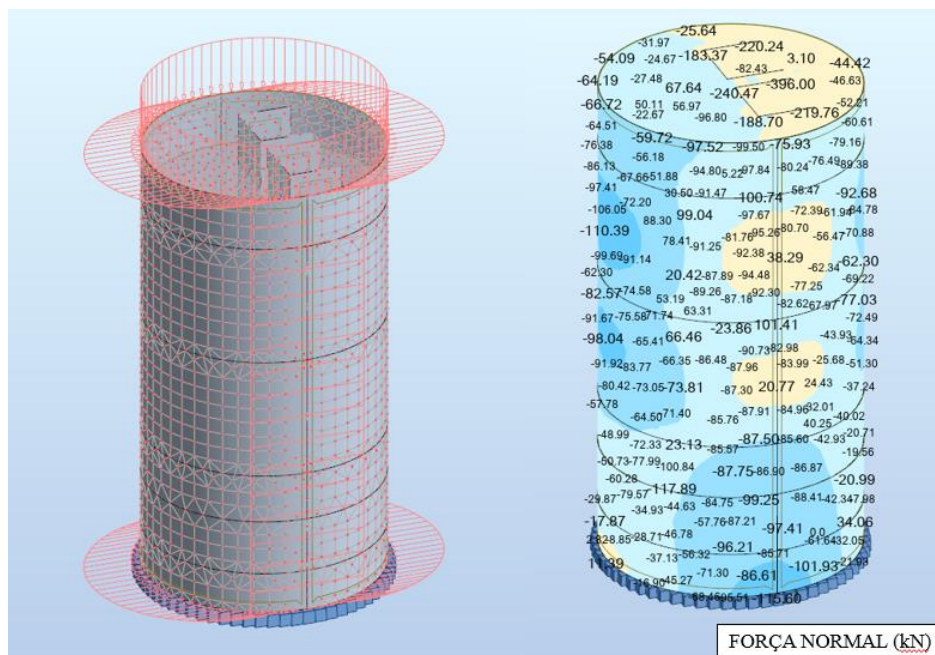


Figura 66 - Malha de elementos finitos, carregamento aplicado e resultados da análise

4.6.2) Análise da estrutura do túnel em 2D

Como é usual nas empresas projetistas de obras subterrâneas, as seções geradas no Civil 3D são aproveitadas em softwares de elementos finitos para realização de análise por fases. Nelas, procura-se adicionar os efeitos em 3D gerados em zonas próximas à frente de escavação, como explicitado na sessão 2.1.4).

Por não se tratar do objetivo do trabalho, não será realizada a análise estrutural em 2D, porém, será explicado qual o melhor aproveitamento do modelo de túnel feito no Civil 3D e os próximos passos a serem seguidos de acordo com os conceitos apresentados na parte de revisão bibliográfica de projeto de túneis.

O primeiro passo é a extração de uma seção de interesse do modelo de túnel feito no Civil 3D, que deve ser um dos casos críticos, segundo as considerações dos projetistas. A Figura 67 mostra a seção extraída com a superfície suavizada, sem as linhas retas dadas pelo mesmo programa. Além disso, a seção é simplificada, não considerando as fundações laterais.

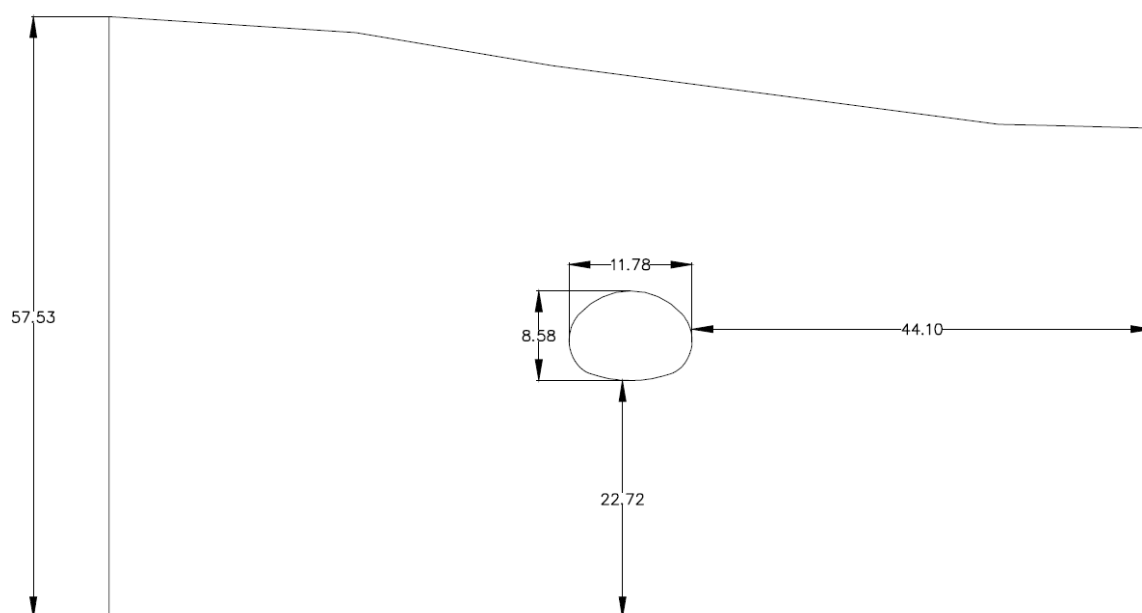


Figura 67 - Seção selecionada para análise estrutural

A seção foi exportada para um software de elementos finitos em 2D para análise geotécnica (Phase 2). A elaboração da malha de elementos finitos foi elaborada considerando as diferentes seções ao longo da zona de influência da frente. Também foi considerada a mudança do módulo de elasticidade do concreto no revestimento em cada fase e o alívio nos carregamentos na frente de escavação.

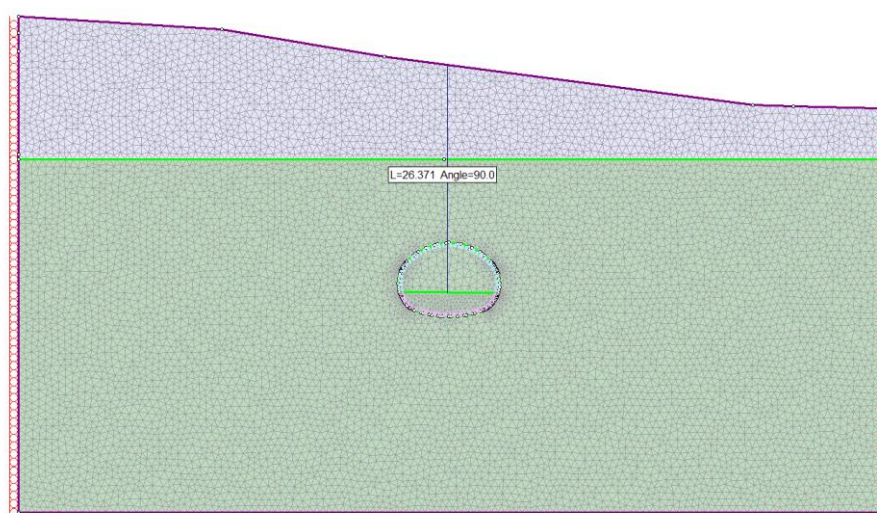


Figura 68 – Malha de elementos finitos no programa Phase 2

Nota-se que, embora seja possível aproveitar o modelo do túnel realizado no Civil 3D, a análise descrita não pode ser considerada parte da metodologia BIM, já que apenas a parte geométrica é aproveitada, não sendo reconhecido o tipo do elemento nem os materiais.

4.6.3) Análise da estrutura do túnel em 3D

Como primeira tentativa de análise em 3D do modelo do túnel, foi utilizado o software Plaxis 3D. O software reconhece elementos do tipo superfícies em 3D (*3DFACE*) geradas no Civil 3D, sendo possível exportá-las ao Plaxis 3D. A Figura 69 mostra o modelo com o maciço e o túnel no ambiente do programa. Apesar de não ter sido possível o reconhecimento dos materiais, pode-se configurar as propriedades físicas.

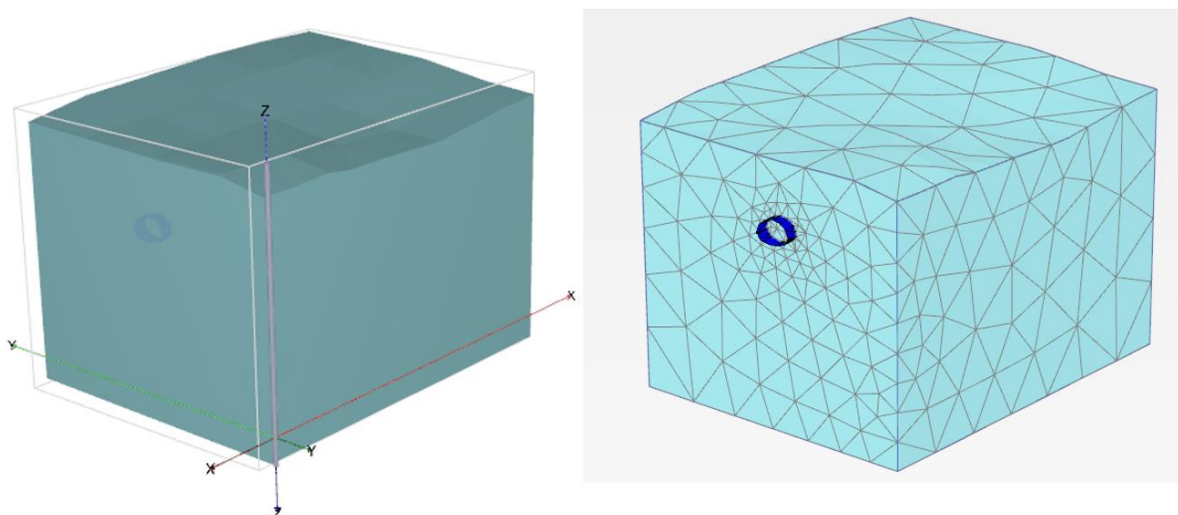


Figura 69 - Modelos de maciço e túnel no software Plaxis 3D

O programa, no entanto, apresenta algumas limitações para a representação precisa das escavações.

Outra tentativa de modelagem/análise estrutural foi realizada utilizando-se o Midas GTS NX, software de análise geotécnica 3D. Nele, comprovou-se a facilidade de comunicação com o Civil 3D e a praticidade para criação de fases de escavação do túnel.

Foi possível gerar um maciço a partir de curvas de nível do modelo do túnel no Civil 3D, obtidas anteriormente através do Infracworks. A Figura 70 mostra a superfície do projeto e a geração do maciço no Midas GTS NX. Nota-se que, em comparação com o Plaxis 3D, não foi necessária a extração de uma superfície em 3D do Civil 3D.

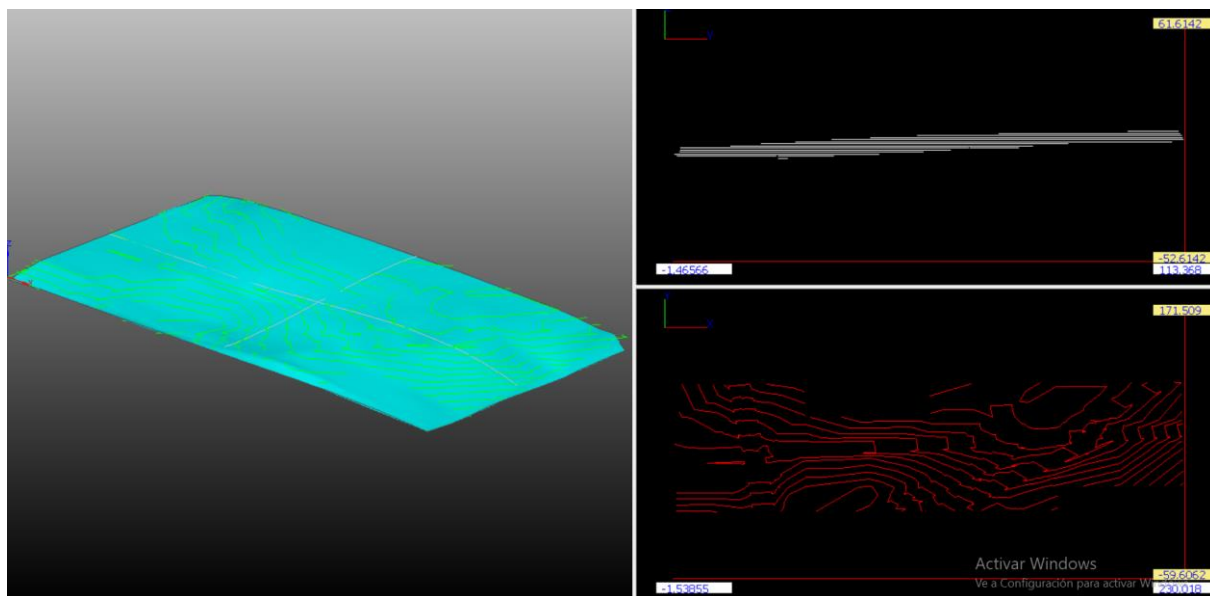


Figura 70 - Geração de superfície a partir de curvas de nível importadas do Civil 3D

Uma potencialidade interessante do programa é que, através da superfície criada, é possível gerar um sólido e separá-lo por camadas, cujas cotas podem ser delimitadas em uma tabela do Excel. Na Figura 71 estão representadas, como exemplo, superfícies e volumes de camadas provenientes de 5 sondagens. É possível realizar a exportação desse volume novamente de volta ao programa Civil 3D.

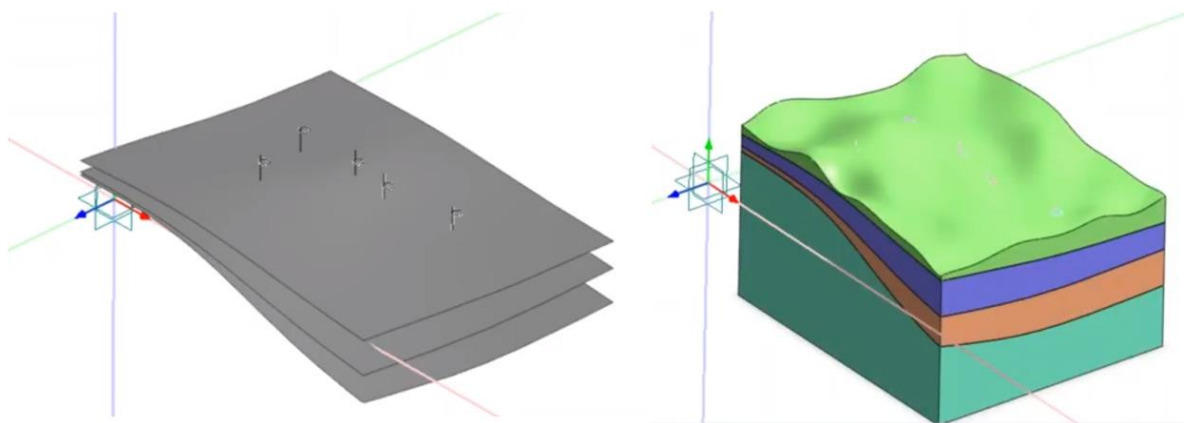


Figura 71 - Criação de camadas a partir de cotas no Excel no programa Midas GTS NX (Midas LA, 2017)

Com relação à análise estrutural no programa, foi escolhido um trecho de 40 metros do túnel, que é a zona de influência da frente (aproximadamente 4 vezes o diâmetro do túnel). Considerou-se, no entanto, uma única camada do maciço, com o único fim de avaliar o potencial do programa. O volume de túnel gerado no civil 3D também foi exportado ao Midas GTS NX

e foi gerada a malha com parâmetros do solo e concreto. Realizou-se, então, uma primeira análise sem considerar as fases de construção, porém a grande complexidade do modelo foi refletida em problemas computacionais, tomando muito tempo, não possibilitando a conclusão da análise. A Figura 72 mostra as características do modelo no programa com o maciço e túnel importados.

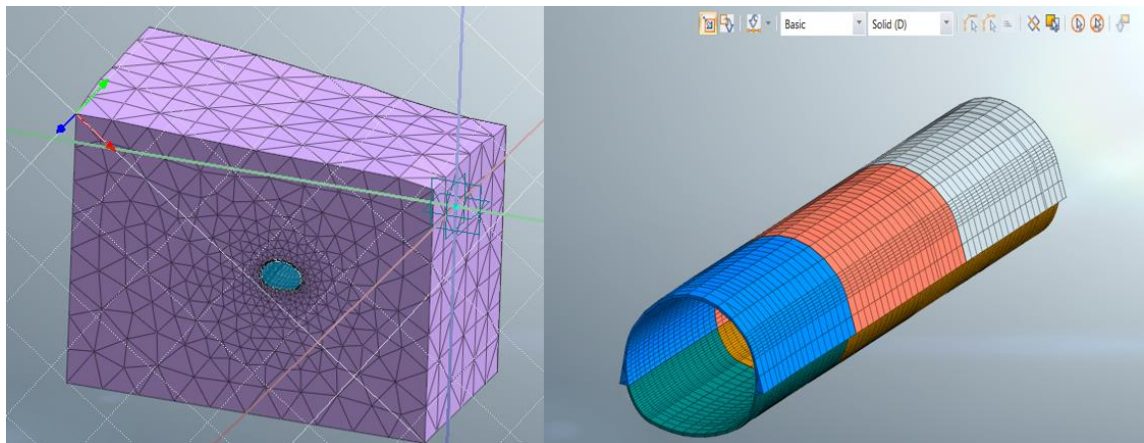


Figura 72 - Malha de elementos finitos para o maciço e túnel no Midas GTS NX

Outra tentativa foi realizada modelando-se o problema diretamente no software de análise estrutural. Através da função de túnel do Midas GTS NX, o maciço pode ser inserido com um conjunto de coordenadas do eixo vertical de um arquivo de Excel e uma seção de túnel pode ser caracterizada pelos raios que a compõem. Neste caso, foi possível a criação de um modelo que considera as fases de construção, obtendo resultados de esforços, como mostra a Figura 73

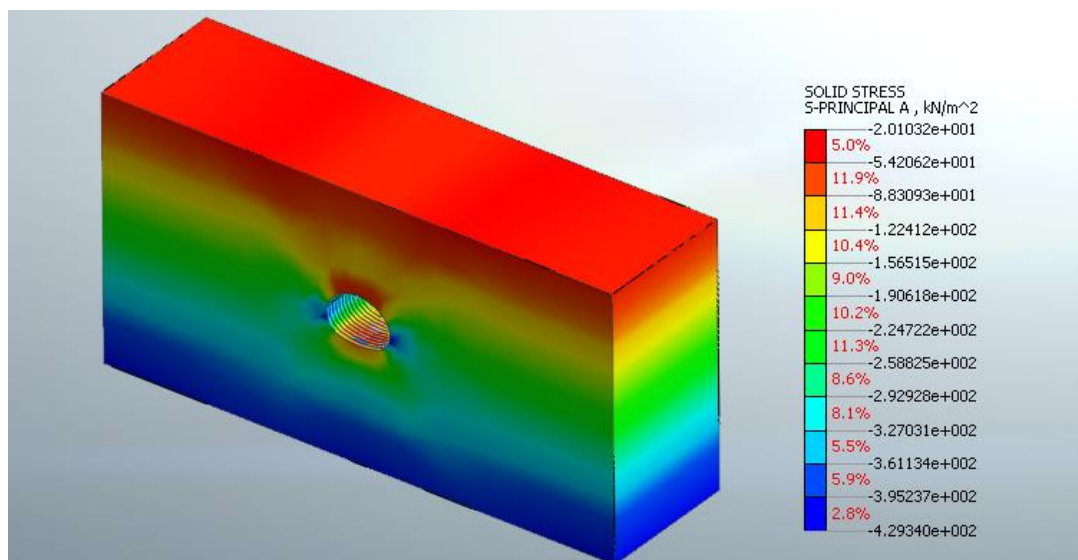


Figura 73 – Resultados de esforços no modelo simplificado

4.7) Detalhamento de armaduras

Um modelo mais robusto, tanto do poço quanto do túnel, se daria com informações relativas à armadura imersa no concreto, que seriam dimensionadas no projeto após a obtenção dos resultados da análise estrutural. Como não foi objetivo deste trabalho a realização de uma análise estrutural refinada, optou-se por testar arranjos típicos.

No poço de ventilação, os elementos que demandam armação são parede externas, internas e lajes. Para as paredes externas (revestimento primário e secundário) foram adotadas telas soldadas, enquanto nas paredes internas são colocadas barras longitudinais e estribos. Nas lajes colocaram-se barras nas duas direções (armadura positiva e negativa). É possível colocar as armaduras das paredes no próprio software Revit, porém não há famílias com telas soldadas, sendo possível a inserção com barras longitudinais nas duas direções. No programa, é possível se ajustar o trajeto das barras ao longo de figuras geométricas, que no caso seria a superfície de meio cilindro, como mostra a Figura 74 . Também é possível indicar os recobrimentos mas não há como limitar o comprimento das barras nem detalhar suas ancoragens. Já nas paredes internas a armadura é facilmente gerada por se tratar de um elemento comum em edifícios. As armaduras da laje também são facilmente inseridas com comandos apropriados, porém o formato circular não pode ser bem representado.

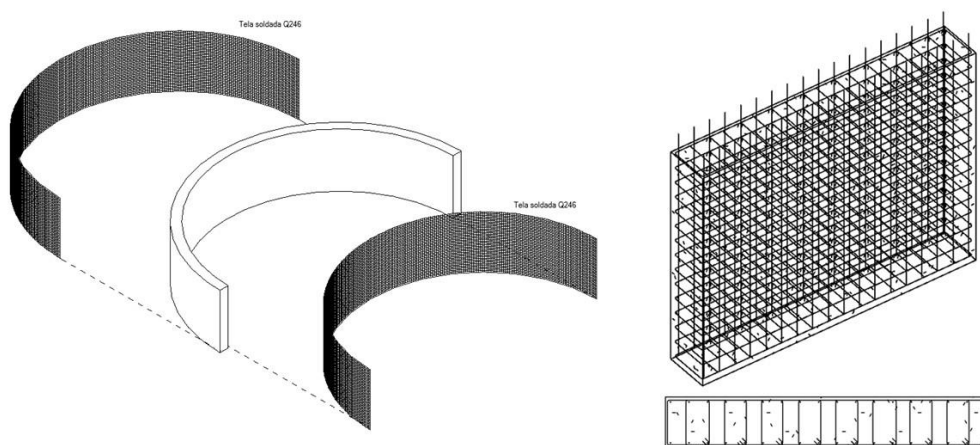


Figura 74 - Detalhe de armaduras das paredes externas e internas no Revit

Para a estrutura do túnel, tentou-se colocar telas soldadas no revestimento secundário e treliça metálica (cambota) no revestimento primário. No entanto, não foi possível a geração de armadura no Revit, já que se trata de uma superfície composta por circunferências de raios diferentes e que mudam de trajeto no plano e na elevação.

Após novas conversas com o engenheiro Gabriel Castaño, da Castaño Engenharia, e com o engenheiro Gustavo Peres, da empresa BIM Works, foi recomendado o software AllPlan, que permite o detalhamento de armadura de concreto armado e interoperabilidade BIM. Ele possui a capacidade de detalhar a armadura de estruturas mais complexas, muito presentes em obras de infraestruturas, como pontes e túneis.

Assim, foi elaborada a geometria da cambota (treliça metálica), mostrada na Figura 75, sendo exportada do Civil 3D ao software AllPlan juntamente com o revestimento primário, revestimento secundário e eixo do túnel. Foi considerado um trecho de apenas 20 metros por simplicidade. No programa, as cambotas foram convertidas em barras de aço, sendo possível indicar o tipo e o diâmetro, e repetidas a cada 80 cm no eixo do túnel. A Figura 76 e Figura 77 mostram os detalhes das cambotas geradas no programa AllPlan.

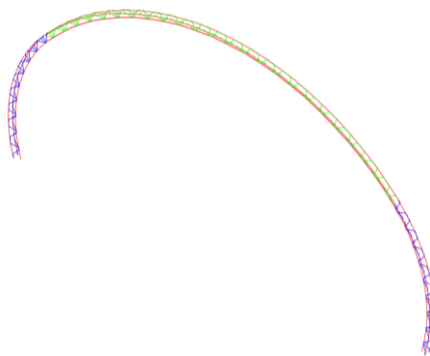


Figura 75 - Geometria de treliça metálica realizada no Civil 3D

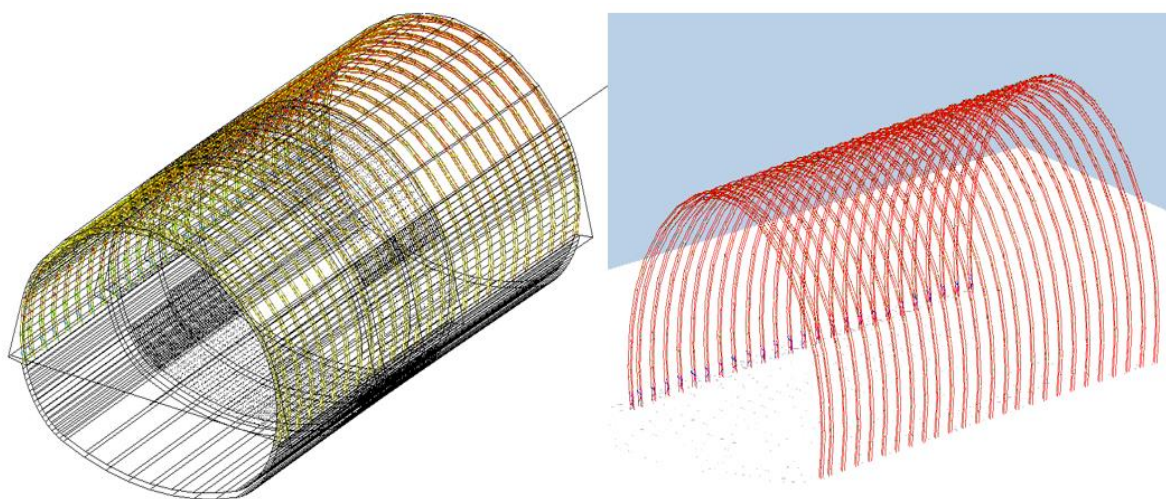


Figura 76 - Cambotas no revestimento primário do túnel no AllPlan



Figura 77 - Detalhe das cambotas no AllPlan

Seguindo também uma sugestão do engenheiro Gustavo Peres, foi possível a criação de uma tela soldada utilizando barras longitudinais e transversais espaçadas cada 10 cm (características da tela Q246). O programa permite a colocação de telas soldadas, porém a geometria complexa do túnel novamente não permitiu sua inserção. Portanto, barras transversais e longitudinais foram mais uma vez colocadas. O programa também permite definir comprimentos de transpasse e comprimentos e diâmetros das barras. Assim, a geometria das barras transversais foi facilmente inserida na seção e as barras longitudinais colocadas em pontos a cada 10 cm e extrudadas no eixo do túnel. A Figura 78 ilustra a seção com a cambota e as telas soldadas e um detalhe da tela soldada em 3D.

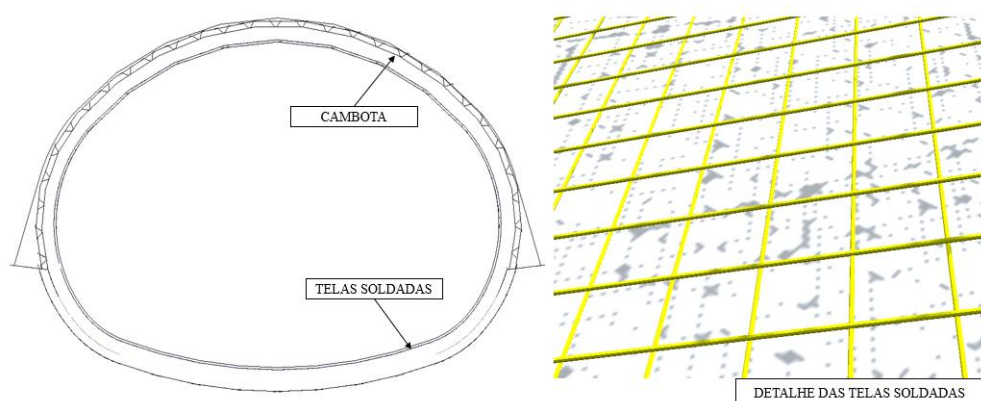


Figura 78 - Seção de túnel com detalhe das armaduras geradas no Allplan

O programa, diferentemente da maioria dos apresentados anteriormente, é um produto da Nemetschek. No entanto, visando a integração das armaduras com o modelo de túnel, ele permite a exportação do modelo para diversos outros softwares BIM, como o Civil 3D ou Revit, por meio da interoperabilidade das classes IFC.

5. CONCLUSÕES

Após o estudo, revisão bibliográfica e experiências práticas nos estudos de caso das diversas ferramentas digitais da metodologia BIM mencionadas ao longo do trabalho, é possível traçar algumas conclusões a respeito da utilidade de cada uma delas. Serão feitas algumas considerações relacionadas aos potenciais e limitações observados ao longo do desenvolvimento do trabalho. As conclusões aqui apresentadas seguem uma ordem cronológica de fluxo de trabalho, que pode ser considerada uma sequência de atividades para um projeto utilizando o método BIM.

Na modelagem geométrica de uma obra de túnel metroviário, verificou-se muito útil o programa Autodesk Revit para a modelagem de um poço de ventilação. Por apresentar elementos e uma distribuição estrutural muito semelhante à de edifícios, contendo paredes e lajes, o programa possui todas as ferramentas necessárias para a modelagem geométrica. Já a modelagem de uma estrutura de túnel é limitada em algumas situações. Não é possível criar um eixo para o túnel em elevação, como a maioria dos túneis metroviários possui. Entretanto, a modelagem de túneis cujo eixo está contido em um plano horizontal mostrou-se bastante viável, sendo inclusive possível a realização de mudanças de seção ao longo do eixo.

A modelagem geométrica de um túnel propriamente dito pode ser feita em outros programas, que possuem uma boa interoperabilidade com o Revit. A ferramenta digital Civil 3D comprovou ser bastante viável para a modelagem de uma estrutura de túnel, como esperado, já que foi fabricada para modelagem de obras lineares de infraestrutura, além de ser também um produto Autodesk. No entanto, possui alguns empecilhos que tornam o processo mais demorado e trabalhoso. O programa não possui seções pré-determinadas de túneis, sendo necessária sua criação. A extensão *Subassembly Composer* mostrou-se bastante promissora para essa criação, com a capacidade de desenho de seções paramétricas em que as dimensões geométricas criadas podem ser facilmente alteradas em projetos futuros. Outra ferramenta em que é possível realizar a modelagem de um túnel é o Dynamo, que pode ser utilizado como um ambiente do Revit. Nele, é possível a modelagem de estruturas complexas mediante um ambiente de programação. Dessa maneira, é possível modelar na ferramenta um túnel com eixo curvo e realizar a extrusão de sua seção no Revit. Também é possível explorar variações na seção ao longo do eixo e superelevações. Entretanto, a ferramenta não possui uma interface intuitiva, sendo necessária uma considerável destinação de tempo para aprendizado de suas funcionalidades.

Para a criação do maciço em que o túnel está inserido, a ferramenta digital Autodesk Infracore verificou-se bastante útil, podendo extrair superfícies existentes e exportar facilmente ao Civil 3D. No entanto, ela apresenta como desvantagem a imprecisão das cotas do terreno em escalas pequenas, sendo útil apenas em projetos básicos e não em executivos, já que nestes um levantamento topográfico é imprescindível. Também é possível a modelagem de maciços no próprio Revit e Civil 3D, através da caracterização de pontos e curvas de nível. Entretanto, no caso do presente trabalho, os dados necessários para este tipo de modelagem não estavam disponíveis.

Com relação à compatibilização dos modelos citados, é possível a integração no Revit, que possui uma boa interoperabilidade com o Civil 3D para elementos de túnel, permitindo sua associação na forma de novas famílias. Também se verificou que a ferramenta digital Autodesk Navisworks cumpre muito bem o seu papel nessa integração de modelos e visualização. Ela possui uma boa interoperabilidade com o Revit, porém mostrou-se limitada para reconhecer elementos do tipo *corredor* do Civil 3D como túnel, sendo necessária uma exportação intermediária para o Revit. Além disso, os materiais exportados também foram reconhecidos pelo Navisworks. O software mostrou-se uma ferramenta de grande potencial, já que sua interoperabilidade permite que mudanças feitas nos outros programas sejam diretamente reconhecidas por ele, permitindo o trabalho simultâneo de diversas partes do processo construtivo. Em resumo, mesmo que simplificado, foi possível a construção de um modelo federado, que permitiria, caso necessário, a atuação simultânea nos dois arquivos de referência.

Com o modelo BIM integrado gerado, há diversos potenciais que podem ser explorados. A ferramenta Navisworks também é de grande auxílio para o planejamento das fases construtivas e cronograma de obra, permitindo uma integração muito positiva com o programa MS Project. Assim, é possível a visualização de uma modelagem 4D no programa, englobando a geometria presente em todo o ciclo de construção. Além disso, a ferramenta possui como diferencial a detecção prévia de interferências de sobreposição entre os diversos objetos. No entanto, por não existirem tais interferências nos projetos abordados, não foi possível explorar essas capacidades durante o trabalho. Outro grande potencial da ferramenta é a extração de dados quantitativos do projeto. Foi possível através da ferramenta obter volumes de concreto para cada um dos elementos modelados separadamente, com os dados podendo ser visualizados em tabelas de Excel, e calcular o volume total de concreto para a obra.

Com relação à realização de uma análise estrutural, foi observado que o software Autodesk Robot Structural Analysis se adequa bem a uma metodologia BIM de projetos comuns, como

edifícios. Assim, a análise da estrutura de um poço de ventilação de um túnel metroviário poderia ser feita com êxito no programa, através do aproveitamento tanto da geometria quanto das propriedades dos materiais devido à boa interoperabilidade com o Revit. Contudo, o programa não apresentou uma boa capacidade para se analisar modelos de túnel. Este é um tópico que ainda possui muito a ser melhorado no que diz respeito à integração à metodologia BIM.

A colocação de armaduras provenientes de uma análise estrutural pode ser bem integrada ao fluxo de trabalho BIM. No Revit há ferramentas que permitem facilmente armar elementos estruturais comuns e o software AllPlan, da Nemetschek, possibilita a inserção em geometrias mais complexas como túneis. Nele, foi comprovada a capacidade de inserir tanto cambotas quanto telas soldadas, além de permitir uma integração com os softwares mencionados da Autodesk, através de classes IFC.

A metodologia BIM se baseia na interação entre programas de construção civil, buscando a melhor ferramenta para cada tipo de atividade de projeto e a interoperabilidade entre elas. Verificou-se que o campo de pesquisa relacionado ao tema é bastante extenso, contendo inúmeras ferramentas com focos diversificados. Ainda há muito a ser explorado nesse universo, que está em constante mudança e expansão, com novas ferramentas digitais surgindo e outras se inovando o tempo todo. Dessa maneira, o trabalho apresentado buscou contribuir para o desenvolvimento da pesquisa sobre o tema, comprovando potenciais e limitações de algumas das principais ferramentas no processo, assim como destacando diversos “usos BIM” possíveis num projeto de infraestrutura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

13 Tips to Understand Revit Base Points and Coordinate System. **Revit Pure**, 2018. Disponível em: <<https://revitpure.com/blog/13-tips-to-understand-revit-base-points-and-coordinate-system>>. Acesso em: 21 Novembro 2019.

Building Smart, 05 jun. 2019. Disponível em: <<https://www.buildingsmart.org/standards/technical-vision/>>. Acesso em: 05 Junho 2019.

ALMEIDA E SOUSA, J. **Projeto de Túneis**. Universidade de Coimbra. Coimbra. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13044: Concreto projetado — Reconstituição da mistura recém-projetada**. Rio de Janeiro, p. 5. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, p. 225. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Rio de Janeiro, p. 23. 2015.

BIM Level of Development (LOD) 100, 200, 300, 400 & 500. **SrinSoftTech**, 2019. Disponível em: <<https://www.srinsofttech.com/bim-level-of-development-lod-300-400-500.html>>. Acesso em: 05 Junho 2019.

CARLOS E. M. MAFFEI ENGENHARIA S/C LTDA. **Cálculo de Túneis em Solo**. Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo. 1995.

CASTAÑO, G. **Entrevista concedida aos alunos para esclarecimento de dúvidas**. São Paulo. 2019.

CHONG, H. Y. et al. Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects. **Journal of Management in Engineering**, p. 13, Junho 2016.

DALLABRIDA, E. C. **Planejamento BIM 4D para Gerenciamento de Obras de Túnel: Informações do Modelo para cada Nível Hierárquico**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, p. 58. 2017.

DUTRA, L. G. F. **Túneis Revestidos por Concreto Projetado: Análise da Interação Maciço-Revestimento**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 58. 2011.

FANNING, B. et al. Implementing BIM on Infrastructure: Comparison of Two Bridge Construction Projects. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, p. 8, Janeiro 2015.

FGV-EBAPE. Perspectivas do Investimento em Infraestrutura no Brasil. **SlideShare**, 2014. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/fgv-oficial/fgv-ebapeseminriogestopblica3>>. Acesso em: 05 Junho 2019.

FRAZILLIO, E. M.; CARDOSO, M. C. **Autodesk Autocad Civil 3d 2014: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.

GOMES, R. A. M. P. **Análise Tridimensional de Túneis Considerando o Comportamento Dependente do Tempo na Interação Maciço-Suporte**. Tese (Dissertação de Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006.

HUNG, C. et al. **Technical Manual For Design And Construction Of Road Tunnels**. National Highway Institute. Nova York, p. 694. 2009.

IBRACON. Tecnologia da Informação no Projeto e Modelagem de estruturas de Concreto. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, 2016. 100.

LUNARDI, P. **Design and Construction of Tunnels**. Berlim: Springer-Verlag, 2008.

MARQUES, E. O. R. **Simulação Numérica da Construção de Túneis: Análises Bidimensionais versus Análises**. Tese (Dissertação de Mestrado) - Universidade de Coimbra. Coimbra, p. 86. 2014.

MARQUES, F. **Comportamento de Túneis Superficiais Escavados em Solos Porosos: O Caso do Metrô de Brasília/DF**. Tese (Dissertação de Doutorado) - Universidade de Coimbra. Coimbra. 2006.

MARTINS, P. A. **Análise Numérica de Escavações Subterrâneas com Ênfase na Interação entre o Maciço e o Suporte em Concreto Projetado a Baixas Idades**. Tese (Dissertação de Doutorado) - Universidade de Brasília. Brasília, p. 215. 2008.

METRÔ – Métodos Construtivos. **METROSP**, 2018. Disponível em: <<http://metrosp.blog.br/metro-metodos-construtivos.html>>. Acesso em: 06 Junho 2019.

MIDAS LA. **Interfaces de midas GTS NX con AutoCAD y midas Gen para Análisis de Interacción** Su, 2017. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=0QwUGaDtAIo&list=LLV-6uKs63OnM6ilGLLNFJag&index=11&t=839s>>. Acesso em: 14 Novembro 2019.

MÖLLER, S. C. **Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings**. Tese (Dissertação de Doutorado) - Universitat Stuttgart. Estugarda, p. 174. 2006.

MURAKAMI, C. A. **Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis**. Tese (Dissertação de Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 113. 2001.

OSELLO, A.; RAPETTI, N.; SEMERARO, F. **BIM Methodology Approach to Infrastructure Design: Case Study of Paniga Tunnel**. Politecnico di Torino. Turim, p. 10. 2017.

PALERMO, G. **Concreto Projetado como Revestimento de Túneis**. Tese (Dissertação de Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 26. 1997.

PECK, R. B. **Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground**. Proc. 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cidade do México: State of the Art Volume. 1969. p. 225-290.

PERES, G. F. **Entrevista concedida aos alunos para esclarecimento de dúvidas**. São Paulo. 2019.

SCODELER, B. M. G. **Os efeitos de escavações acima de túneis já existentes**. Tese (Dissertação de Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 217. 2017.

SOARES, J. C. **Entrevista concedida aos alunos para esclarecimento de dúvidas**. São Paulo. 2019.

TAGLIARI, P. **Análise Preliminar de Traçado de Túneis Utilizando Tecnologia BIM**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 89. 2018.

TÚNEIS NATM. **Solotrat**, 2019. Disponível em: <<http://www.solotrat.com.br/tuneis-natm-solotrat>>. Acesso em: 05 Junho 2019.