

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE MATERIAIS PARA ATERRO EM PROJETOS FERROVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO E AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS

Comparative analysis between methods of obtaining materials for embankment in railway projects: case study and evaluation of alternatives

Análisis comparativo de métodos para la obtención de materiales de relleno en proyectos ferroviarios: estudio de caso y evaluación de alternativas

Andréia Oliveira Macedo

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais,
Brasil

E-mail: andreiaolimacedo@gmail.com

Jisela Aparecida Santanna Greco

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais,
Brasil

E-mail: jisela@etg.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho aborda conceitos de terraplenagem aplicados a um estudo de caso de um projeto ferroviário em uma região de planície, que demanda um grande volume de solo para a execução do corpo de aterro. No entanto, as escavações de corte são insuficientes para fornecer o material necessário. Para enfrentar esse desafio, foram analisadas e comparadas alternativas para a obtenção de material de aterro, aplicadas ao projeto ferroviário em questão com a utilização do programa Civil 3D. A análise incluiu a comparação do volume total de corte acumulado de cada solução proposta e a proporção de solo obtida por cada uma em relação ao pior cenário possível. Ao final das análises, foi discutida qual alternativa, ou conjunto de alternativas, melhor se aplica à problemática apresentada no estudo de caso, proporcionando uma solução eficiente e que não gera um incremento significativo nos custos do projeto. Este trabalho contribui para o campo da engenharia civil, analisando soluções práticas para projetos de terraplenagem, que podem ser aplicadas em futuros empreendimentos ferroviários e outros projetos de infraestrutura.

Palavras-chave: Terraplenagem. Área de empréstimo. Ferrovia. Corpo de aterro.

ABSTRACT

This work addresses earthmoving concepts applied to a case study of a railway project in a plain region, which requires a large volume of soil for the execution of the

embankment body. However, the cut excavations are insufficient to provide the necessary material. To tackle this challenge, alternatives for obtaining embankment material were analyzed and compared, applied to the railway project in question using the Civil 3D program. The analysis included comparing the total accumulated cut volume of each proposed solution and the proportion of soil obtained by each one concerning the worst possible scenario. At the end of the analyses, it was discussed which alternative, or set of alternatives, best applies to the problem presented in the case study, providing an efficient solution that does not significantly increase the project costs. This work contributes to the field of civil engineering by analyzing practical solutions for earthmoving projects, which can be applied to future railway projects and other infrastructure projects.

Keywords: Earthworks. Borrow pit. Railway. Backfill.

RESUMEN

Este trabajo aborda conceptos de movimiento de tierras aplicados a un estudio de caso de un proyecto ferroviario en una región de tierras bajas, que requiere un gran volumen de suelo para la construcción del terraplén. Sin embargo, las excavaciones tradicionales resultan insuficientes para proporcionar el material necesario. Para abordar este desafío, se analizaron y compararon alternativas para la obtención de material de relleno, aplicadas al proyecto ferroviario en cuestión mediante el programa Civil 3D. El análisis incluyó la comparación del volumen total de excavación acumulado de cada solución propuesta y la proporción de suelo obtenida por cada una en relación con el peor escenario posible. Al finalizar los análisis, se discutió qué alternativa, o conjunto de alternativas, se ajusta mejor al problema presentado en el estudio de caso, proporcionando una solución eficiente que no genera un aumento significativo en los costos del proyecto. Este trabajo contribuye al campo de la ingeniería civil, analizando soluciones prácticas para proyectos de movimiento de tierras que pueden aplicarse a futuros desarrollos ferroviarios y otros proyectos de infraestructura.

Palabras clave: Movimiento de tierras. Zona de préstamo. Ferrocarril. Terraplén.

INTRODUÇÃO

Desde o final do século passado até os dias atuais, é possível observar no Brasil a predominância das rodovias e a falta de manutenção e conservação das ferrovias, o que influenciou negativamente o crescimento desse modal. No entanto, estima-se que, em 2035, haverá uma equalização da matriz de transportes, com a participação das ferrovias passando de 1/5 para 1/3 das cargas transportadas (Santos, 2021). Segundo o Ministério dos Transportes, o setor ferroviário vive um momento de destaque na infraestrutura, tendo sido recentemente celebrado o novo marco legal do setor, a Lei nº 14.273/2021. Essa lei visa diminuir a burocracia, regular o modelo de autorização ferroviária e buscar uma maior racionalidade na matriz logística nacional. Atualmente, o

sistema ferroviário brasileiro possui cerca de 30 mil km de ferrovias federais existentes, distribuídas em 15 contratos de concessão/subconcessão, além de 10 mil km de ferrovias autorizadas a serem construídas por particulares.

Devido aos avanços e investimentos na malha ferroviária brasileira, é de suma importância realizar estudos de projetos ferroviários que contribuam para a adoção de práticas mais eficientes e sustentáveis em futuras implementações no setor. Durante a elaboração de um projeto de terraplenagem, frequentemente ocorre que o solo escavado não é suficiente ou adequado para ser utilizado em aterros. Nesses casos, é necessário realizar novas escavações para completar o volume de aterro requerido (Rosa; Ribeiro, 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho visa apresentar as principais etapas que compõem um projeto de terraplenagem em ferrovias, com o objetivo principal de identificar e analisar alternativas relevantes para a obtenção de material de aterro. Isso é especialmente importante em situações em que a obtenção desse material é dificultada pelas características do solo da região do projeto, pela topografia ou por outros fatores. As alternativas serão aplicadas no estudo de caso, sendo avaliadas e comparadas com base no volume de material de corte acumulado em cada solução, na viabilidade de sua aplicação e na sua adequação para a execução do projeto.

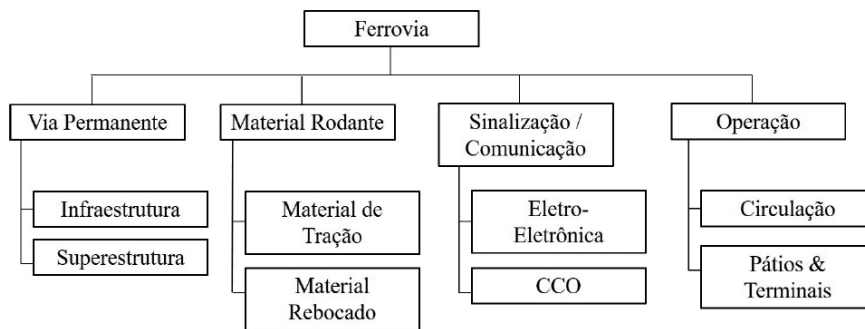
PROJETO DE FERROVIAS

Uma ferrovia é um sistema de transporte terrestre autoguiado, no qual os veículos, tanto motores quanto rebocados, se deslocam sobre rodas metálicas que percorrem duas vigas metálicas contínuas e longitudinais, conhecidas como trilhos (Rosa; Ribeiro, 2016). A ferrovia é constituída de quatro elementos conforme ilustrado na Figura 1.

A operação ferroviária envolve a gestão da circulação de trens, bem como as operações em pátios e terminais. A sinalização e a comunicação abrangem todos os sistemas utilizados nessas áreas, sendo compostas principalmente por tecnologias eletroeletrônicas e pelos sistemas de Centro de Controle Operacional

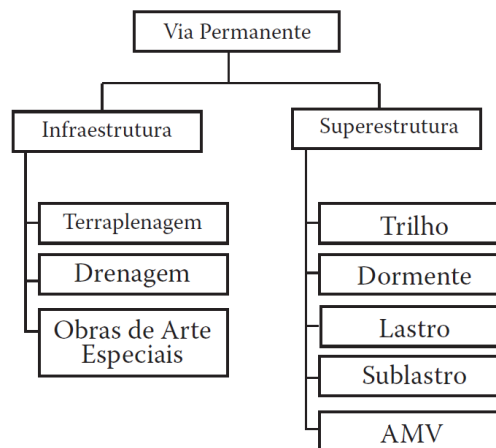
(CCO) e Centro de Controle de Pátios (CCP). O material rodante é dividido em duas categorias principais: material de tração, que inclui principalmente as locomotivas, e material rebocado, que consiste principalmente nos vagões. A via permanente é subdividida em infraestrutura e superestrutura, conforme a Figura 2. A infraestrutura inclui elementos como terraplenagem, drenagem e obras de arte especiais, enquanto a superestrutura abrange os trilhos, dormentes, lastro, sublastro e Aparelho de Mudança de Via (AMV).

Figura 1. Elementos de uma ferrovia.



Fonte: Rosa e Ribeiro, 2016.

Figura 2. Elementos da via permanente.



Fonte: Rosa e Ribeiro, 2016.

A elaboração de um projeto básico ou executivo da via permanente de uma ferrovia envolve a integração de diversas áreas técnicas. Entre essas áreas estão a geometria, geotecnia, terraplenagem, drenagem, superestrutura, entre

outras. Cada uma dessas áreas contribui com conhecimentos específicos e essenciais para a criação de um projeto ferroviário completo e funcional.

Neste contexto, o foco principal deste trabalho foi a área de terraplenagem. Isso inclui o estudo para a determinação das áreas e volumes, a definição das seções transversais tipo, além da análise das propriedades e classificações dos materiais. Também foram abordadas as técnicas para a obtenção de material destinado à utilização em aterros nas ferrovias. Posteriormente, esses elementos foram analisados em um estudo de caso para a escolha da melhor alternativa, de acordo com critérios de avaliação estabelecidos.

PROJETO DE TERRAPLENAGEM

A terraplenagem consiste em um conjunto de atividades que incluem a escavação de solos, o desmonte de rochas, o transporte e a deposição dos materiais em locais previamente selecionados para a construção de aterros compactados. O objetivo é remover os materiais acima do greide (cortes) e preencher as depressões (aterros), garantindo uma superfície nivelada e estável para a construção. Já a terraplenagem aplicada em obras viárias pode ser entendida como um conjunto de atividades destinadas a preparar o terreno para o uso seguro de veículos. Para isso, pode ser necessário realizar a escavação do solo ou o desmonte de rochas, de modo a garantir a estabilidade e a segurança da infraestrutura viária para os usuários (Antas, 2010).

A Norma VALEC 80-EG-000A-20-000 apresenta as diretrizes básicas para desenvolvimento do projeto de terraplenagem e estabelece que o projeto deverá ser elaborado a partir dos dados do projeto geométrico, dos estudos geotecnológicos e em conformidade com as demais disciplinas. O projeto geométrico determina a posição, a extensão e a geometria do traçado com base na topografia, Modelo Digital do Terreno (MDT). Esse processo resulta em maior ou menor escavação a partir do greide, influenciando diretamente os custos e os impactos na implantação da ferrovia. Os estudos geotécnicos têm como objetivo a caracterização granulométrica, geomecânica e hidrogeotécnica dos

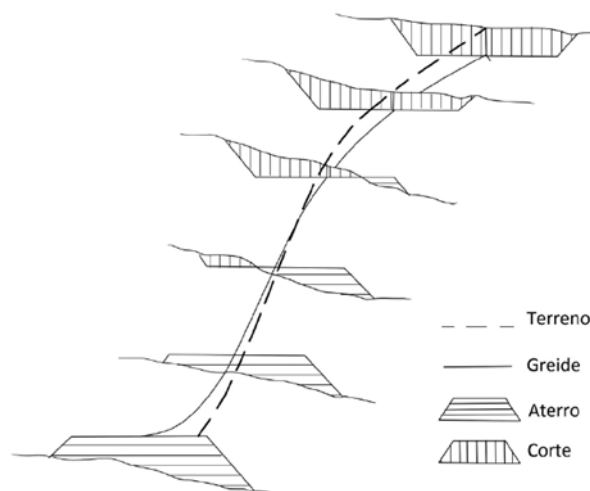
materiais presentes nos segmentos do projeto. Isso permite avaliar a viabilidade desses materiais para serem utilizados como fundação dos aterros, camadas constituintes do corpo do aterro, camadas finais de terraplenagem e camada de sublastro.

SEÇÕES TRANSVERSAIS TIPO DE CORTES E ATERROS

Ao longo do alinhamento da ferrovia, as seções transversais são representadas de 20 em 20 metros. Essas seções podem ser de corte, quando a cota do terreno está acima do greide de projeto; de aterro, quando a cota do terreno está abaixo do greide de projeto; ou mistas, quando ambas as situações ocorrem ao longo do alinhamento. Os três tipos de seções mencionados podem ser vistos na Figura 3.

Os serviços de corte envolvem escavações no terreno natural com o objetivo de preparar a plataforma da ferrovia. Já os serviços de aterro consistem na colocação de solo de um local para outro, seguida de compactação. Tanto os serviços de corte quanto os de aterro visam alcançar a cota de projeto definida para a ferrovia. Essa cota de projeto é estabelecida com base na topografia e nos limites de inclinação de rampas pré-estabelecidos por Normas.

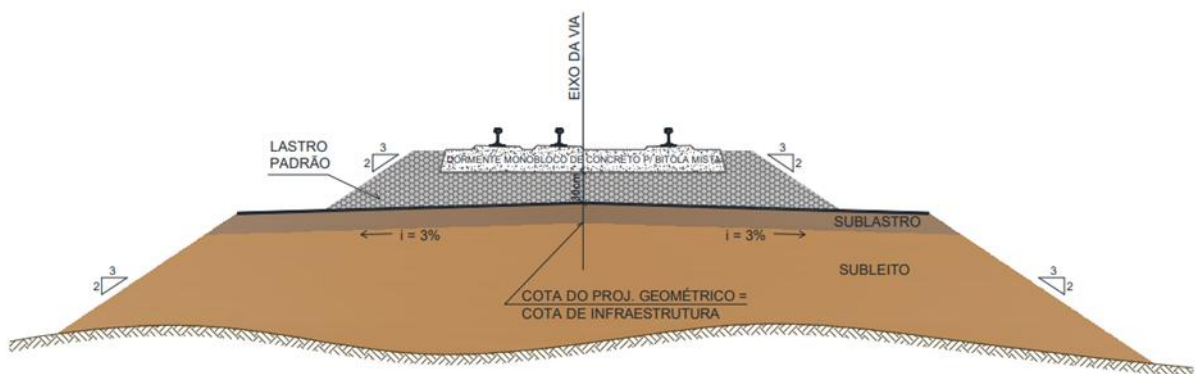
Figura 3. Seção tipo de corte, aterro e mista.



Fonte: Rosa e Ribeiro, 2016.

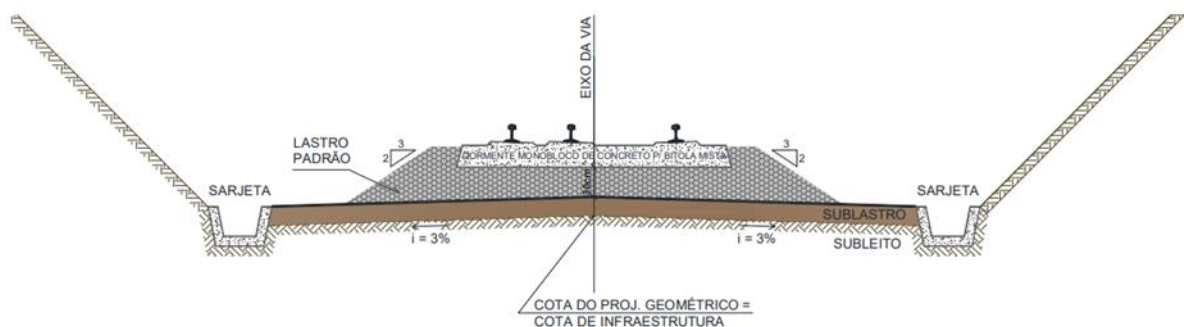
Para o cálculo do volume de corte e aterro necessário no projeto, é fundamental a definição prévia da seção tipo que será implantada. No contexto das ferrovias, um exemplo de seções transversais tipo recomendado pela Instrução DNIT ISF-211 sobre projeto de terraplenagem, pode ser visualizado nas Figura 4 e Figura 5. Esta Instrução estabelece que as seções tipo de terraplenagem devem conter todas as dimensões necessárias para sua perfeita caracterização, tais como eixos, afastamentos, cotas, posições de bermas e banquetas, inclinações de taludes e plataformas, levando em consideração as características geotécnicas estipuladas, as classificações prévias dos materiais de escavação e os critérios de compactação.

Figura 4. Seção tipo de aterro.



Fonte: DNIT ISF-211, 2015.

Figura 5. Seção tipo de corte em solo.



Fonte: DNIT ISF-211, 2015.

CLASSIFICAÇÃO QUANTO A CATEGORIA DOS MATERIAIS

A Norma VALEC 80-EG-000A-29-000 que estabelece as diretrizes para a elaboração de estudos geológicos e geotécnicos define que os materiais decorrentes das escavações em áreas de corte serão classificados quanto à escavabilidade para efeito de projeto e quantidades de acordo com as descrições a seguir:

Material de 1ª categoria: Compreendem solos em geral, residuais ou transportados, com diâmetro de partículas máximo inferior a 0,15 m, qualquer que seja o teor de umidade, escavado sem a exigência do emprego de explosivos, podendo exigir escarificação esporádica.

Material de 2ª categoria: Compreende aquele com resistência ao desmonte inferior à da rocha sã (não alterada), cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização de maior equipamento de escarificação, constituído por um trator de esteira de potência no volante igual ou superior a 270 HP e escarificador de dimensões adequadas para operar com o trator mencionado. A extração eventualmente poderá envolver o uso de explosivos para desagregação do material ou processo manual adequado. Estão incluídos nesta classificação os blocos de rocha de volume inferior a 2 m³ e os matacões de diâmetro médio entre 0,15 e 1,00 m, cuja extração se processe com o emprego de rompedor pneumático ou ripper.

Material de 3ª categoria: Compreende aquele com resistência ao desmonte equivalente à da rocha sã (não alterada) e blocos de rocha com volume superior a 1,00 m³ e matacões de diâmetro médio superior a 1,00 m, cuja extração se processe com o emprego de explosivos eventualmente associados a desmonte a frio.

CÁLCULO DOS VOLUMES

Para o cálculo dos volumes, existem métodos gráficos e analíticos. Esses métodos consistem em transformar a seção tipo em uma figura geométrica,

geralmente composta por triângulos e somar a área de todos os triângulos para obter a área total da seção.

O método gráfico é mais visual e manual, estando sujeito a ser menos preciso e a ter uma maior chance de erro humano nas interpretações gráficas e nos cálculos. Já o método analítico é mais matemático e sistemático, apresentando maior precisão e capacidade de calcular grandes volumes em menos tempo quando comparado ao método gráfico. Isto é possível porque utiliza expressões matemáticas e algoritmos para o cálculo das áreas, frequentemente através de softwares de engenharia que facilitam a determinação dos volumes.

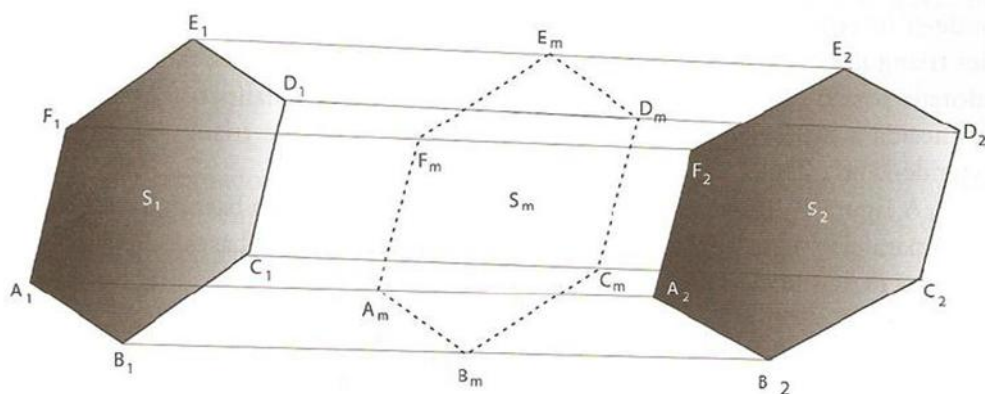
Com as informações das áreas das seções, pode-se calcular o volume de terraplenagem. No contexto das ferrovias, a Norma VALEC 80-EG-000A-20-000 para projetos executivos de terraplenagem determina que o cálculo dos volumes deve ser realizado utilizando a média das áreas dos interperfis, multiplicada pela distância entre eles.

Uma seção média é uma seção intermediária entre as seções extremas do interperfil, de forma a conter as particularidades dessas seções, conforme representado na

Figura 6. A média das áreas dos interperfis é um método aproximado para o cálculo da seção média, considerando a dificuldade de se obter com precisão e em tempo hábil a definição da seção média em cada interperfil. A expressão para este cálculo é:

$$\text{Vol} = \frac{d}{6}(S_1 + 4S_m + S_2) \rightarrow \text{Vol} = \frac{d}{6} \left[S_1 + S_2 + 4 \left(\frac{S_1 + S_2}{2} \right) \right] = \frac{d}{2}(S_1 + S_2)$$

Figura 6. Seção média.



Fonte: Antas, 2010.

TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DE MATERIAIS DE ATERRO

Ao realizar o balanço de volumes e constatar que o volume de corte é insuficiente para preencher os aterros, torna-se necessário realizar novas escavações e estudar técnicas para obter material de aterro. Assim, serão apresentadas algumas alternativas relevantes e mais utilizadas para obter material de aterro, que serão analisadas mais profundamente no estudo de caso e avaliadas de acordo com critérios específicos.

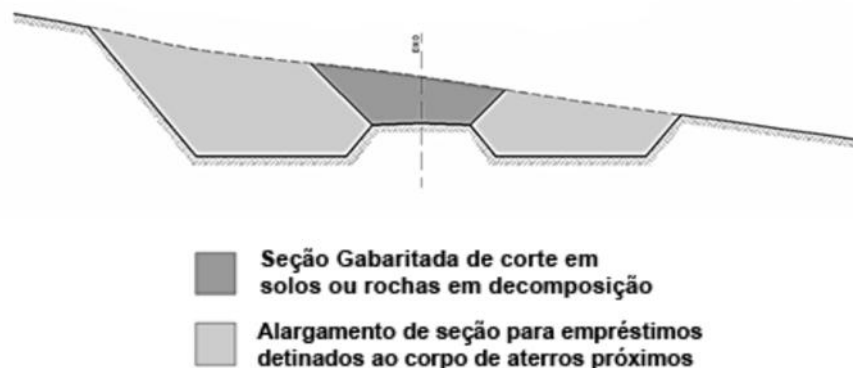
Maior inclinação para taludes de aterro: para utilizar o menor volume de material no aterro, deve-se adotar a maior inclinação possível para os taludes, desde que esta atenda às Normas vigentes e as análises de estabilidade dos

taludes. A Instrução DNIT ISF-211 recomenda a utilização de uma inclinação de 1,0 (V):1,5 (H) para o corpo de aterro.

Menor inclinação para taludes de corte: consiste na redução da inclinação dos taludes de corte, caso a menor inclinação atenda à análise de estabilidade com o fator de segurança especificado em projeto. Essa medida gera mais material de corte para o aterro e pode, adicionalmente, contribuir para o aumento do fator de segurança dos taludes.

Falso aterro: de acordo com a Instrução DNIT ISF-211, o falso aterro consiste em alargar a seção transversal de corte, criando valetões com 1,5 metros de profundidade abaixo do greide. Esses valetões possuem uma base trapezoidal de 3 metros de largura, com os taludes de cada lado da plataforma apresentando a mesma inclinação, conforme Figura 6.

Figura 6. Solução de falso aterro.



Fonte: DNIT ISF-2011, 2015.

Empréstimo lateral: as caixas de empréstimo lateral estão localizadas dentro da faixa de domínio, contendo material de 1ª ou 2ª categoria que atende às especificações do projeto. De acordo com a Norma DNIT 107/2009-ES, áreas de empréstimo são áreas indicadas no projeto ou selecionadas, onde devem ser escavados materiais a serem utilizados na execução da plataforma nos segmentos em aterro.

Reutilização de materiais de escavação: aproveitamento de materiais provenientes de outras escavações dos projetos de ferrovia anteriores ou obras próximas, que atendam às especificações do projeto.

Jazidas: transporte de solo de outras regiões ou fornecedores externos que possuam materiais compatíveis com as especificações do projeto.

As diferentes alternativas para a obtenção de material de aterro serão aplicadas ao estudo de caso, analisadas e comparadas com base no volume de corte acumulado. O objetivo é determinar qual alternativa, individualmente ou em conjunto, seria a mais eficiente para a ferrovia analisada no estudo de caso.

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso em questão refere-se a um projeto de ferrovia que, devido à confidencialidade dos dados, teve algumas informações ocultadas ou modificadas para proteger a privacidade das informações, sem invalidar a análise desenvolvida. Foi utilizado o software Civil 3D como ferramenta principal para modelar as superfícies da ferrovia e realizar os cálculos e análises necessários do projeto ferroviário.

O projeto aborda a construção de uma ferrovia em uma região de planície, onde grande parte do solo é inadequado para ser utilizado como material de aterro devido à sua baixa capacidade de suporte. Além disso, o nível da água está próximo à superfície, e durante as épocas de chuva, o rio mais próximo transborda, inundando a área. Dessa forma, o projeto enfrenta três desafios principais.

Primeiro, devido à topografia plana, não é possível obter material de aterro apenas com o corte de material, como ocorre em regiões montanhosas, sendo necessário estudar alternativas para a obtenção de material para aterro. Em segundo lugar, parte do solo presente no local não possui resistência suficiente para atender às normas técnicas e deve ser removido para a colocação de um solo mais resistente, agravando a escassez de material para ser utilizado nos aterros. Por último, devido à cheia do rio, o greide do projeto deve estar a uma

altura maior que o terreno natural para que a cheia do rio não interfira no funcionamento da ferrovia, necessitando assim de mais material para aterro.

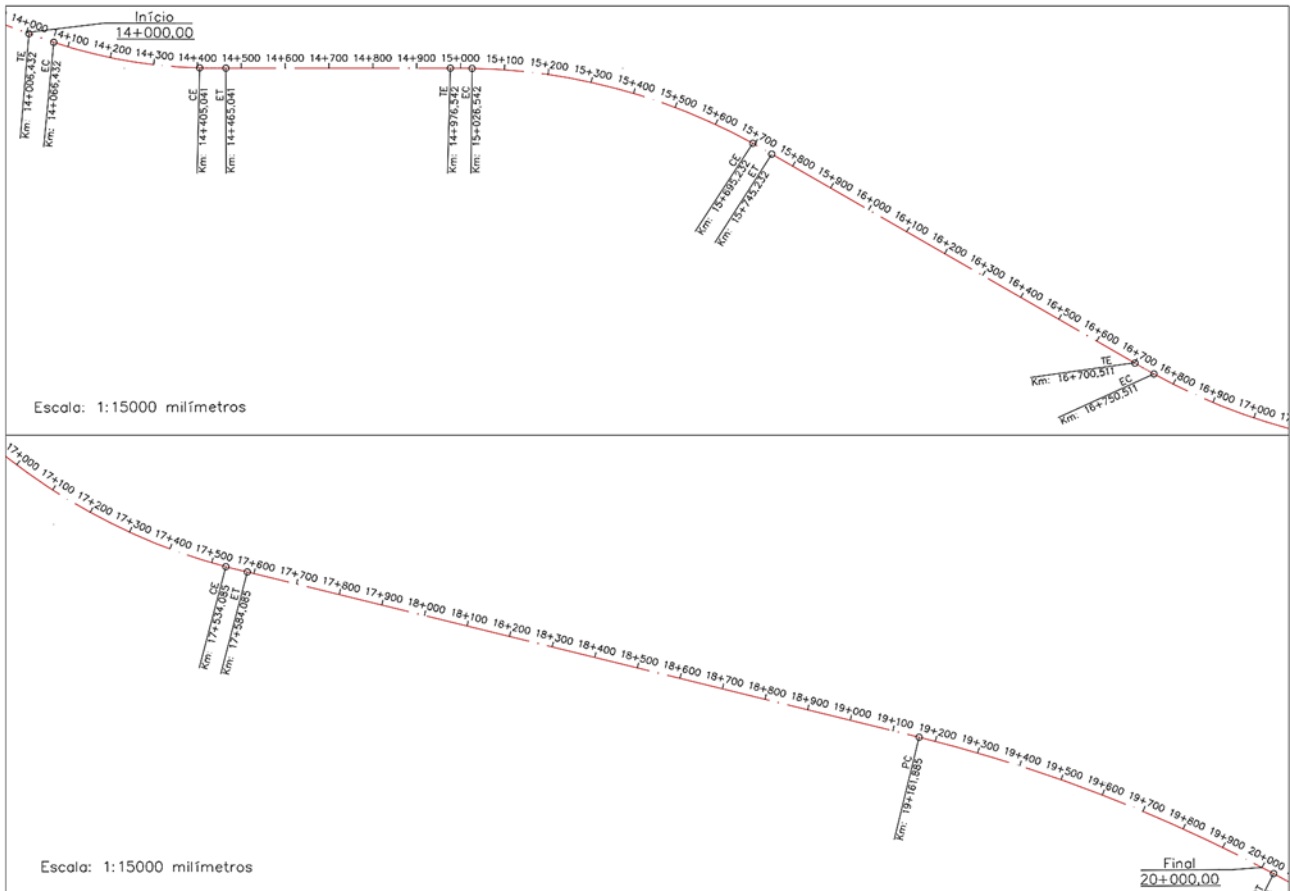
PROJETO GEOMÉTRICO

As estacas do projeto são posicionadas a cada um quilômetro ao longo do alinhamento. O trecho da ferrovia escolhido para o estudo de caso possui uma extensão de 6 km, começando na estaca 14+000,00 e terminando na estaca 20+000,00 do alinhamento.

O projeto geométrico foi elaborado utilizando um Modelo Digital do Terreno (MDT), obtido a partir de dados de campo levantados por topografia convencional e restituição por perfilamento a laser. Com base no MDT, foram traçados o greide e o alinhamento da ferrovia, Figura 7 e

Figura 8, seguindo as características técnicas básicas de planimetria e altimetria preconizadas pela VALEC 80-EG-000A-17-0000: Projeto Geométrico.

Figura 7. Alinhamento do estudo de caso.



Fonte: autoria própria.

Figura 8. Greide do estudo de caso.

aplicado sobre o volume do aterro como multiplicador para se obter o volume de corte. Logo temos:

$$V_{\text{corte}} = Fh * V_{\text{aterro}}$$

Onde:

V_{corte} = Volume do solo escavado no corte;

Fh = Fator de homogeneização;

V_{aterro} = Volume de solo compactado no aterro.

Drenagem: No segmento analisado, o nível de água (N.A) não irá percolar nos taludes e no greide de terraplanagem, logo nos cortes estudados não será necessário dimensionamento de drenos.

Estabilidade de taludes: Estudos geotécnicos demonstraram que uma inclinação de 1,0 (V):1,0 (H) para os cortes apresenta um fator de segurança que atende às especificações do projeto. Para os aterros, a inclinação recomendada é de 1,0 (V):1,5 (H) conforme a Instrução DNIT ISF-211.

Material de baixa capacidade de suporte: Todo o material resultante das escavações em regiões que exigem a substituição de reforços do subleito, solos de baixa capacidade de suporte e valas foi encaminhado para as áreas de destinação de materiais de escavação (ADME). No trecho final do alinhamento da ferrovia, identificou-se a presença de material com baixa capacidade de suporte. O volume total de material destinado às ADME foi de 1.700,34 m³.

Remoção da camada vegetal: a limpeza da camada vegetal deve ser realizada para garantir que toda a terraplenagem seja executada sem a presença de material orgânico, evitando comprometer a estabilidade e durabilidade da obra. Dessa forma, o projeto de terraplenagem deve iniciar no terreno natural rebaixado em 15 cm, sem a camada vegetal.

DEFINIÇÕES DA SEÇÃO TRANSVERSAL

A seção transversal de corte e aterro de terraplenagem foi definida conforme as recomendações da norma VALEC 80-EG-000A-20-000. As demais características definidas são apresentadas a seguir:

Semi-seção de corte: 5,35 metros.

Semi-seção de aterro: 4,45 metros.

Banquetas: altura máxima de 8,00m, sempre a partir da plataforma de terraplenagem e largura de 4,00m;

Inclinação de corte: 1,0(H):1,0(V);

Inclinação de aterro: 1,5(H):1,0(V).

Os aterros devem ser compostos das seguintes camadas:

Camada final: altura de 0,60 m, em solo com CBR $\geq 8\%$ e expansão $\leq 2\%$, com grau de compactação estabelecido em 100% do proctor normal;

Corpo de aterro, em material de 1ª categoria, CBR $> 2\%$ e expansão $\leq 4\%$, com grau de compactação estabelecido em 95% do proctor normal.

ETAPAS PARA ANÁLISE NO SOFTWARE CIVIL 3D

Utilizando o software Civil 3D, o Modelo Digital do Terreno (MDT) foi utilizado como base para calcular as áreas de corte e aterro, essenciais para os volumes de terraplenagem. A etapa seguinte consiste em gerar o corredor, que modela o terreno metro a metro com as informações pré-definidas de alinhamento da ferrovia (perfil horizontal), greide do projeto (perfil vertical) e seção tipo. Essa etapa inclui a definição da semi plataforma para corte e aterro, bem como as inclinações dos taludes em diversas situações.

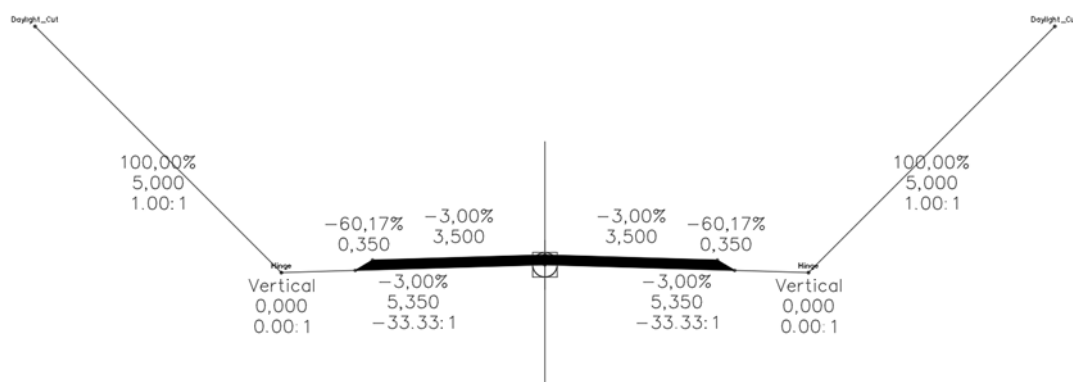
Com o uso do Civil 3D, cria-se a superfície do projeto, conhecida como Modelo Digital do Projeto (MDP), a partir do corredor da ferrovia. Esta superfície será utilizada nas seções gabaritadas para o cálculo de material de corte e aterro pelo método da média das áreas.

Após a criação e revisão de todos os elementos, utilizam-se as ferramentas do Civil 3D para os cálculos de volumes, com o fator de homogeneização aplicado. O relatório de volumes foi gerado pelo método das semi-distâncias, com a representação de todas as áreas separadas por estacas.

CASO 1: MAIOR INCLINAÇÃO PARA TALUDES DE ATERRO

Nesta primeira análise, foi utilizada a inclinação máxima e recomendada de 1,0(V):1,5(H) para os aterros, com o objetivo de minimizar a quantidade de material necessário. O volume de corte acumulado obtido nesta análise serviu como base de comparação para os demais métodos. Dessa forma, foi utilizada a inclinação máxima para os cortes que 1,0(V):1,0(H) que atende ao fator de segurança e especificações do projeto, permitindo posteriormente uma comparação com a solução de alargamento de corte. A seção tipo e os parâmetros adotados são apresentados na Figura 9.

Figura 9. Caso 1 - seção tipo.



Fonte: autoria própria.

Com a seção tipo, alinhamento e greide, criou-se o corredor e modelou-se o Modelo Digital do Projeto (MDP) da ferrovia. A partir desse modelo, foram geradas as seções gabaritadas, possibilitando a emissão da tabela de volumes acumulados, apresentada de forma resumida na Tabela 1.

Tabela 1. Caso 1 - tabela de volumes acumulados.

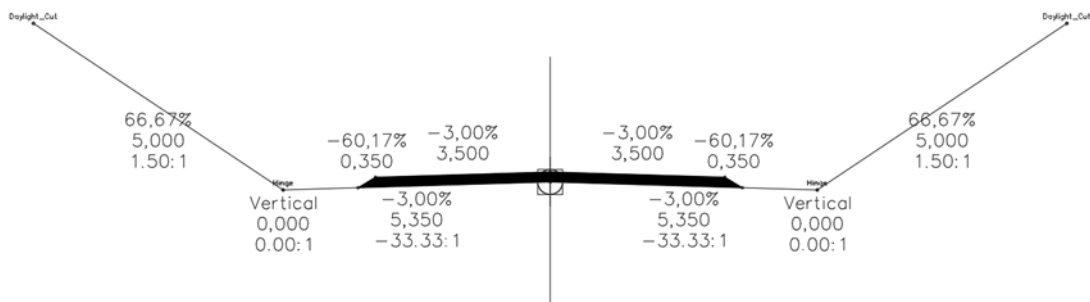
Volumes Acumulados de Corte e Aterro			
Início	Final	Vol, de corte acumulado (m³)	Vol, de aterro acumulado (m³)
14+000,000	20+000,000	75.655,36	193.479,28

Fonte: autoria própria.

CASO 2: MENOR INCLINAÇÃO PARA TALUDES DE CORTE

No caso 2, foi mantida a utilização da inclinação de 1,0(V):1,5(H) para os aterros. Para a seção tipo de corte, foi adotada a inclinação mínima especificada no projeto, também de 1,0(V):1,5(H). Esta inclinação permitiu a obtenção do maior volume de aterro possível no projeto. A seção tipo e os parâmetros adotados estão apresentados na Figura .

Figura 11. Caso 2 - seção tipo.



Fonte: autoria própria.

Com a seção tipo, alinhamento e greide, criou-se o corredor e modelou-se o Modelo Digital do Projeto (MDP) da ferrovia. A partir desse modelo, foram geradas as seções gabaritadas, possibilitando a emissão da tabela de volumes acumulados, apresentada de forma resumida na Tabela 2.

Tabela 2. Caso 2 - tabela de volumes acumulados.

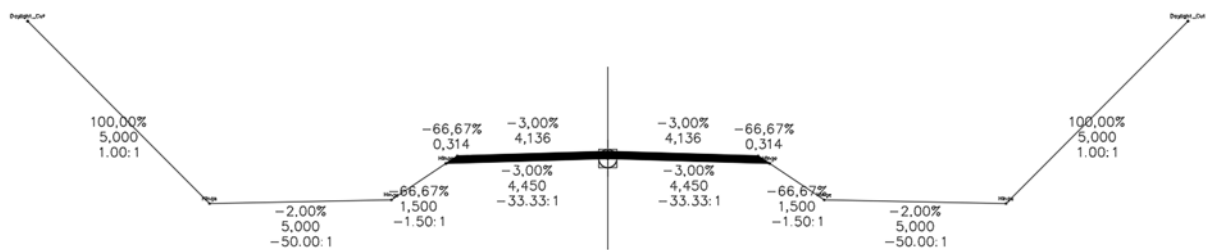
Volumes Acumulados de Corte e Aterro			
Início	Final	Vol, de corte acumulado (m³)	Vol, de aterro acumulado (m³)
14+000,000	20+000,000	89.414,91	193.452,01

Fonte: autoria própria.

CASO 3: FALSO ATERRO

No caso 3, foi mantida a utilização da inclinação de 1,0(V):1,5(H) para os aterros. Para a seção tipo de corte, foi adotada a inclinação de 1,0(V):1,0(H), de modo que o volume de aterro obtido dessa solução foi composto apenas pelo falso aterro. Desse modo, essa solução pode ser analisada em comparação com as demais. A seção tipo e os parâmetros adotados estão apresentados na Figura

Figura 12. Caso 3 - seção tipo.



Fonte: autoria própria.

Com a seção tipo, alinhamento e greide, criou-se o corredor e modelou-se o Modelo Digital do Projeto (MDP) da ferrovia. A partir desse modelo, foram geradas as seções gabaritadas, possibilitando a emissão da tabela de volumes acumulados, apresentada de forma resumida na Tabela 3.

Tabela 3. Caso 3 - tabela de volumes acumulados.

Volumes Acumulados de Corte e Aterro			
Início	Final	Vol, de corte acumulado (m ³)	Vol, de aterro acumulado (m ³)
14+000,000	20+000,000	154.047,79	192.458,92

Fonte: autoria própria.

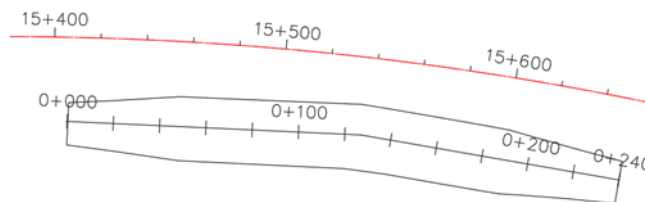
CASO 4: EMPRÉSTIMO LATERAL

As áreas de empréstimo lateral (AEL) foram selecionadas dentro da faixa de domínio, levando em consideração a qualidade do solo conforme as especificações do projeto, para serem utilizadas no corpo de aterro. Além disso, a localização foi escolhida de forma a não interferir em outros projetos da

ferrovia. Ao todo, foram analisadas três opções, cuja localização e alinhamento das AEL podem ser observados nas Figura e 14.

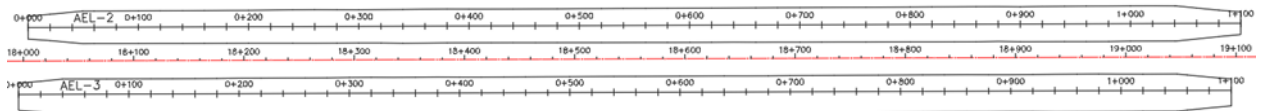
As áreas de empréstimo lateral apresentam uma seção tipo semelhante à apresentada no Caso 2, com uma inclinação de 1,0(V):1,5(H), permitindo o aproveitamento máximo do material de corte, de acordo com o fator de segurança verificado nas análises de estabilidade de taludes. A largura da base de cada área de empréstimo lateral foi ajustada individualmente para maximizar o aproveitamento do material de corte.

Figura 13. Área de empréstimo lateral 1.



Fonte: autoria própria.

Figura 14. Área de empréstimo lateral 2 e 3.



Fonte: autoria própria.

Com a seção tipo, alinhamento e greide das áreas de empréstimo lateral, criou-se o corredor e modelou-se o Modelo Digital do Projeto (MDP). A partir desse modelo, foram geradas as seções gabaritadas, possibilitando a emissão da tabela de volumes acumulados, apresentada de forma resumida na Tabela 4.

Tabela 4. Caso 4 - tabela de volumes acumulados.

Volumes de Corte - Áreas de Empréstimo Lateral				
Opção	Lado	Início	Final	Vol., de corte acumulado (m³)
1	Direito	15+406,555	15+652,016	13.971,88
2	Esquerdo	18+004,354	19+104,354	93.644,12
3	Direito	17+995,504	19+095,504	87.480,24

Fonte: autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta um resumo dos valores acumulados de corte e aterro para cada solução analisada. Este estudo de caso acumulou um volume de aterro de aproximadamente 193.500 m³, um volume 2,5 vezes maior que o volume de corte acumulado no Caso 1, que é o pior cenário. Adicionando o volume necessário de 1.700,34 m³ para substituir o solo de baixa capacidade de suporte, o volume total de material necessário para o corpo de aterro foi de aproximadamente 195.000 m³. Portanto, torna-se necessário considerar alternativas para a obtenção de material adicional para o corpo de aterro.

Tabela 5. Resultado dos volumes acumulados de corte e aterro.

Resultado dos Volumes Acumulados de Corte e Aterro			
Caso	Solução	Vol., de corte acumulado (m ³)	Vol., de aterro Acumulado (m ³)
1	Maior inclinação para taludes de aterro	75.655,36	193.479,28
2	Maior inclinação para taludes de corte	89.414,91	193.452,01
3	Falso aterro	154.047,79	192.458,92
4	Empréstimo lateral - opção 1	13.971,88	-
4	Empréstimo lateral - opção 2	93.644,12	-
4	Empréstimo lateral - opção 3	87.480,24	-

Fonte: autoria própria.

O caso 1 representa o pior cenário em termos de obtenção de material. A inclinação dos taludes de corte é a mais acentuada, resultando em menor volume de corte, enquanto a inclinação dos taludes de aterro é constante para todos os casos. O volume de corte foi insuficiente, necessitando de alternativas para obtenção de material adicional.

No caso 2 houve um aumento de 18,19% no volume de corte acumulado em comparação com o caso 1. Embora o aumento da inclinação dos taludes de corte não seja uma alternativa significativa para a obtenção de material, esta solução é interessante por aumentar o fator de segurança dos taludes.

O caso 3 apresentou um aumento de 103,62% no volume de corte acumulado, demonstrando maior sucesso na obtenção de material para aterro.

Esta alternativa é mais vantajosa do que áreas de empréstimo lateral, pois aproveita a seção de corte já prevista para a ferrovia para obter mais material.

Ao adotar as soluções dos Casos 1, 2 e 3 em um único projeto, obtém-se um volume de corte acumulado de 167.807,34 m³, que ainda não seria suficiente para a execução do corpo de aterro. Nesse cenário, é necessário considerar outras soluções, como áreas de empréstimo, reutilização de material de escavação de projetos ferroviários anteriores ou aquisição de material em jazidas próximas.

Conforme recomendado pela instrução do DNIT ISF-211 sobre projetos de terraplenagem, o material para aterros deve ser obtido, sempre que possível, por meio de alargamento dos cortes. Caso isso não seja viável, deve-se procurar por áreas de empréstimo. Para este estudo de caso, o empréstimo lateral é a opção mais aconselhada, pois essa solução visa também diminuir a distância de transporte do equipamento. No entanto, a opção 1 de empréstimo lateral não seria suficiente, sendo necessário recorrer às áreas de empréstimo lateral 2 ou 3. Outra alternativa seria adotar as soluções dos casos 1 e 2, sem recorrer à solução de falso aterro, utilizando as áreas de empréstimo lateral 2 e 3.

Projetos de ferrovias são geralmente divididos em segmentos, que costumam ser executados de forma sequencial. Caso o segmento anterior apresente um volume excedente de material de corte, originalmente destinado às ADMP, esse material pode ser aproveitado no segmento em estudo. Essa estratégia evita a necessidade de novas escavações para obtenção de material no local, contribuindo para a redução dos custos da obra. Em último caso, no cenário mais desfavorável, pode-se recorrer à compra de material de jazidas de fornecedores externos.

CONCLUSÃO

Projetos de ferrovias em regiões de planícies podem demandar uma quantidade significativa de material para o corpo de aterro, especialmente quando enfrentam desafios como solos de baixa capacidade de suporte e nível

de água próximo à superfície, conforme observado no estudo de caso. Mesmo com uma demanda significativa de material para o corpo de aterro, foi possível identificar alternativas viáveis para a execução do projeto. Ao analisar as alternativas para obtenção de material para aterro, verificou-se que as soluções de falso aterro e áreas de empréstimo lateral são satisfatórias, pois obtêm um grande volume de material sem um incremento significativo nos custos do projeto, fornecendo opções de execução diversificadas. Além disso, outras alternativas, como a reutilização de material de escavação de projetos ferroviários anteriores ou a aquisição de material em jazidas próximas, podem ser consideradas caso não seja possível executar falso aterro e áreas de empréstimo lateral. Por fim, este estudo de caso contribuiu para a análise das melhores alternativas de obtenção de material para o corpo de aterro, encontrando soluções que não aumentam significativamente os custos do projeto. Devido aos avanços e investimentos na malha ferroviária brasileira, é de fundamental importância continuar analisando e adotando alternativas de obtenção de material de aterro que sejam economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ANTAS, Paulo Mendes et al. **Estradas: projeto geométrico e de terraplanagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 264 p.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Ferrovias Brasileiras**. Brasília: Ministério dos Transportes, 31 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.go.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/ferrovias-brasileiras>>. Acesso em: 10 out. 2024.

CATALANI, G.; RICARDO, H. S. **Manual Prático de Escavação: Terraplanagem e Escavação em Rocha**. Rio de Janeiro: Pini, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT ISF-211: Projeto de Terraplanagem**. Brasília: DNIT, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 107/2009-ES: Terraplenagem – Empréstimos – Especificação de serviço.** Brasília: DNIT, 2009.

ROSA, Rodrigo de Alvarenga; RIBEIRO, Rômulo Castello Henriques. **Estradas de ferro: projeto, especificação e construção.** 1 ed. Vitória: EDUFES, 2016, 352 p.

SANTOS, Sílvio dos. **Transporte Ferroviário: história e técnicas.** 2 ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2021, 320 p.

VALEC, **Especificação de Projeto 80-EG-000A-20-000: Projeto executivo de terraplenagem.** 2011.

VALEC, **Especificação de Projeto 80-EG-000A-29-000: Estudos Geotecnológicos.** 2019.

VALEC, **Especificação de Projeto 80-EG-000A-17-0000: Projeto Geométrico.** 2017.